

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ № ИМ-21.33-12		
Ревизия 01	Дата	30.04.2025
Определение долговечности, наработки до первой инспекции, периодичности инспекций, назначенного ресурса основных деталей, ресурс которых устанавливается в циклах, с учётом наличия в них дефектов		
Москва, 2025 г.		

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№	Описание изменения	Номер ревизии	Дата
1.	Введение в действие первоначального документа	01	30.04.2025
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			

Первоначальная редакция данных методических рекомендаций подготовлена Авиарегистром России.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель и назначение	4
2 Нормативные ссылки и источники информации.....	5
3 Термины и определения.....	9
4 Сокращения и обозначения	12
5 Методические рекомендации по определению долговечности, наработки до первой инспекции, периодичности инспекций, назначенного ресурса основных деталей, ресурс которых устанавливается в циклах, с учётом наличия в них дефектов.....	16
Приложение А. Назначение размеров дефектов для ОД на основе анализа применяемых методов НК и требования к кривым вероятности выявляемости дефектов.....	54
Приложение Б. Определение параметров НДС и циклической повреждаемости в наиболее нагруженных зонах ОД.....	58
Приложение В. Расчетное определение изменения формы фронта трещины, развивающейся в неоднородном поле напряжений.....	61

1 Цель и назначение

Данные Методические рекомендации предназначены для выполнения расчётно-экспериментальных работ по определению эксплуатационных ограничений для основных деталей, ресурс которых устанавливается в полётных циклах, в предположении наличия в них (основных деталях) дефектов, не выявляемых применяемыми при производстве и в эксплуатации (в том числе, при ремонте) методами неразрушающего контроля.

К указанным эксплуатационным ограничениям для основных деталей относятся:

- назначенный ресурс по Концепции безопасного развития трещины;
- наработка до первой инспекции;
- наработка между инспекциями.

2 Нормативные ссылки и источники информации

- 1 Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Соппротивление материалов// М.:Наука. 1986. - 560 с.
2. Нормы лётной годности двигателей воздушных судов НЛГ 33. Федеральное агенство воздушного транспорта. 2022 г.
- 3 Потапов С.Д. Способ эксплуатации авиационного двигателя по его техническому состоянию // Патент РФ № 2393451, 2010, Бюл. №18
- 4 Кирюхин В.В., Колотников М.Е., Марчуков Е.Ю., Мельник В.И., Чепкин В.М. Способ эксплуатации авиационного газотурбинного двигателя по его техническому состоянию// Патент РФ 2236671, 2004, Бюл. №26
- 5 Потапов С.Д. Способ эксплуатации авиационного газотурбинного двигателя по его техническому состоянию// Патент РФ № 2439527, 2012, Бюл. №1
- 6 ОСТ 1 82127-90 Металлы. Метод определения скорости роста усталостных трещин при испытаниях с постоянной амплитудой нагружения.
- 7 Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний металлов. Определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. ГОСТ 25.506-85.
- 8 Металлы. Метод определения скорости роста усталостной трещины. ОСТ1 90268-78.
- 9 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates., ASTM E647-00, pp. 1-42.
- 10 Туманов Н.В., Черкасова С.А., Лаврентьева М.А. Особенности кинетики усталостных трещин в дисках авиационных ГТД из жаропрочных титановых сплавов. // Труды международной конференции «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение». М., ВИАМ, 2006, С. 213-216.
- 11 Туманов Н.В., Лаврентьева М.А., Черкасова С.А. Реконструкция и прогнозирование развития усталостных трещин в дисках авиационных ГТД // Конверсия в машиностроении, № 4-5, 2005г., С. 98-106
- 12 Машиностроение. Энциклопедия/Ред. Совет: К.В. Фролов (пред.) и др. - М.: Машиностроение. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. Т. II-И/Л.В. Агамиров, М.А. Алимов и др.; под общ. ред. Е.И. Мамаевой. 2010. - 852 с.
- 13 Межгосударственный авиационный комитет. Рекомендательный циркуляр РЦ-АП-33.15-1. Методические рекомендации по определению расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов. 2013, С.47.
- 14 Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Исследование циклической скорости роста трещин в материалах основных деталей авиационных ГТД. Научно-технический журнал «Технология легких сплавов», №2, 2013г., С. 5-19.

- 15 Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Способ обработки результатов испытаний образцов на трещиностойкость с целью определения коэффициентов уравнения Пэриса. Вестник Московского авиационного института. Том 17. №6. 2010, С. 49-54.
- 16 Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Способ обработки результатов испытаний образцов на скорость роста трещины при постоянной амплитуде нагружения// Вестник Московского авиационного института. Том 19, № 2. 2012г., С. 94-100.
- 17 Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Способ определения скорости роста трещины от циклических нагрузок // Патент РФ №2469290, 2012, Бюл. №34.
- 18 Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Методика определения характеристик трещиностойкости материалов по результатам испытаний образцов с постоянной амплитудой нагружения// Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2011г.)/Под общей научной редакцией В.И. Бабкина, В.А. Скибина, М.Я. Иванова. - М., ЦИАМ, 2012г. С. 493-497
- 19 Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Исследование характеристик циклической скорости роста трещин в материалах основных деталей авиационных газотурбинных двигателей. Вестник Московского авиационного института. Том 20, № 1. 2013г., С. 124-139.
- 20 Джонстон Дж. Эконометрические методы/Пер. с англ. и предисл. А.А. Рывкина. - М.: Статистика, 1980. – 444с.
- 21 Коллакот Р. Диагностика повреждений. М.: «Мир», 1989, 518 стр.
- 22 Damage Tolerance Assessment Handbook. FAA, 1993. Introduction Fracture Mechanics Fatigue Crack Propagation (Volume 1).
- 23 Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. Под ред. Ю. Мураками. М. Мир. В 2-х томах. 1990.
- 24 Нихамкин М. Ш. Прогнозирование живучести газотурбинных двигателей. Научно-технический журнал Двигатель. № 4(16), 2001г., С.24-25.
- 25 Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. М.: Наука, 1974, 416 стр.
- 26 ANSYS в руках инженера: Механика разрушения// Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. - М.:ЛЕНАНД, 2008. - 456 с.
- 27 Слезкин Д.В. Расчет Коэффициентов Интенсивности Напряжений (K1) для цилиндрического образца с применением MSC.Nastran/MSC.Marc. Анализ полученных результатов. Представительство MSC.Software в СНГ, 2006г.
- 28 Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Исследование влияния остаточных сжимающих напряжений в зоне расположения трещины на скорость ее роста при циклическом нагружении// Вестник Московского авиационного института. Т.21. №1 - 2014г.- С. 104-110.

- 29 Методические указания по оценке эффективности неразрушающего контроля, применяемого для дисков при производстве, в эксплуатации и при ремонте ГТД. Методические указания. ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова". 2008г., 11 стр.
- 30 Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads. ASTM. Stp. 595, American Society for Testing and Materials, 1976, p. 389.
- 31 Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. - М.: «Машиностроение», 1985. - 234 стр.
- 32 Межгосударственный авиационный комитет. Рекомендательный циркуляр РЦ-АП33.14. Ресурсы и сроки службы газотурбинных двигателей, их агрегатов и комплектующих изделий. 2006 г.
- 33 Деврой Л., Дьёфри Л. Непараметрическое оценивание плотности. L1-подход//Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 408 с.
- 34 U.S. Department of Transportation. Federal Aviation administration. Advisory Circular. Subject: Damage Tolerance for High Energy Turbine Engine Rotors. Date: 1/8/01. AC No: AC 33.14-1.
- 35 U.S. Department of Transportation. Federal Aviation administration. Advisory Circular. Subject: Damage Tolerance of Hole Features in High-Energy Turbine Engine Rotors. Date: 28/08/09. AC No: AC 33.70-2.
- 36 Grison J., Remy L. Fatigue failure probability in a powder metallurgy Ni-base superalloy// Engineering Fracture Mechanics Vol. 57, No. 1, pp. 41-55, 1997.
- 37 Gayda J., Gabb T.P., Miner R.V. Fatigue Crack Propagation of Nickel-Base Superalloys at 650°C// Nasa TM-87150, 1985, 21 p.
- 38 Everitt S., Starink M.J., Reed P.A.S. Temperature and dwell dependence of fatigue crack propagation in various heat treated turbine disc alloys// 11th International Symposium on Superalloys (Superalloys 2008) Warrendale, USA, The Minerals, Metals and Materials Society, pp. 741-750.
- 39 Enright M.P., Huysse L., McClung R.C. 2005. Fracture mechanics-based probabilistic life prediction of components with large numbers of inherent material anomalies. Ninth International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), Rome, Italy, June 19-22 (submitted).
- 40 Авиационный стандарт. Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей. ОСТ 1 01207-2012.
- 41 Цыкунов Н.В. Тест-образец для ультразвукового контроля // Патент РФ № 2324172, 2008, Бюл. №13
- 42 Цыкунов Н.В., Когай Ю.Л., Кудинов И.И., Митин С.В., Якубин С.П. Экспериментальное определение параметров дефектов, выявляемых и не выявляемых методами

неразрушающего контроля при дефектоскопии основных деталей ГТД. Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2011г.)/Под общей научной редакцией В.И. Бабкина, В.А. Скибина, М.Я. Иванова. - М., ЦИАМ, 2012г. С. 510-513

43 Немцев Д.В., Потапов С.Д., Артамонов М.А. Исследование циклической трещиностойкости в вакууме для дисков газотурбинного двигателя, изготавливаемых из гранулируемого никелевого сплава ЭП741НП. //Вестник МАИ. №2, 2023. – с. 99-105

44 Немцев Д.В., Потапов С.Д., Артамонов М.А. Предварительный анализ результатов испытаний цилиндрических образцов с внедрённым дефектом для определения скорости роста трещины усталости в вакууме. //Технология лёгких сплавов №2, 2023. – с. 54-61

3 Термины и определения

В настоящих рекомендациях используются термины с соответствующими определениями, представленные в текущем разделе.

Таблица 3.1 – Термины и определения

Термин	Определение
Долговечность основной детали	наработка основной детали (в обобщенных типовых полетных циклах) до наступления предельного состояния
Инспекция	процедуры контроля технического состояния основной детали (их частей) в установленное руководством по эксплуатации время
Критический размер трещины	величина, при которой начинается ее ускоренный рост, создающий опасность быстрого разрушения детали или приводящий к появлению недопустимого дисбаланса, недопустимому снижению несущей способности (с учетом возможной раскрутки ротора) или к другим опасным последствиям
Кинетическая диаграмма	зависимость скорости роста трещины усталости от размаха коэффициента интенсивности напряжений
Наработка	продолжительность или объем работы объекта. Нарработка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов)
Неблагоприятная кристаллографическая текстура титановых сплавов	микрообласть, в которой базовая плоскость α -фазы ориентирована по нормали к направлению напряжений, под действием которых от этой микрообласти зарождается трещина малоциклового усталости
Обобщенный типовой полетный цикл	полётный цикл, полученный на основе типовых полётных циклов с учётом их повторяемости, включающий характеристики условий полёта и работы двигателя при установившихся режимах и переменных процессах от запуска двигателя перед полетом до выключения его после полета

Продолжение таблицы 3.1

Практически невероятное событие (отказ)	событие, имеющее вероятность не более 10^{-8} на час полёта
Предельное состояние	состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна: <ul style="list-style-type: none"> – для детерминированного подхода в качестве предельного состояния принимается характерный размер трещины, при достижении которого наступает потеря функциональной способности основной детали (появление недопустимого дисбаланса, недопустимое снижение несущей способности, достижение трещиной размера, соответствующего верхней границе устойчивого участка кинетической диаграммы, или другие опасные последствия); – для вероятностного подхода в качестве предельного состояния принимается вероятность потери функциональной способности основной детали $P=10^{-4}$ за ресурс
Разработчик	юридическое лицо, имеющее сертификат Работчика
Ресурс основной детали	наработка основной детали (в обобщенных типовых полетных циклах), при достижении которой вероятность наступления предельного состояния будет соответствовать заранее установленной величине
Уполномоченный орган	орган, на который Правительством Российской Федерации возложены организация и проведение обязательной сертификации авиационных двигателей
Фокусная точка	точка, в которой пересекаются прямые (или продолжения прямых), характеризующие устойчивые участки кинетических диаграмм развития трещин для данного материала в исследованном диапазоне температур

Окончание таблицы 3.1

Элементарный цикл	последовательность двух переменных процессов противоположного направления при равных значениях исходного и конечного режимов работы двигателя
Эксплуатационные ограничения основной детали по наработке	предельные величины наработки основной детали (в обобщенных типовых полетных циклах), выход за которые в процессе эксплуатации основной детали недопустим. В данных методических рекомендациях рассматриваются следующие виды эксплуатационных ограничений: назначенный ресурс, наработка до первой инспекции и периодичность инспекций (наработка между двумя последовательными операциями контроля)

4 Сокращения и обозначения

В настоящих рекомендациях используются сокращения и обозначения, представленные в текущем разделе.

Таблица 4.1 – Сокращения и обозначения

Сокращение и обозначение	Значение
НЛГ-33	Нормы лётной годности двигателей воздушных судов НЛГ 33
ГТД	газотурбинный двигатель
ГУ	граничные условия
КБД	концепция безопасной долговечности
КБРТ	концепция безопасного развития трещины
КД	кинетическая диаграмма
КИН	коэффициент интенсивности напряжений
КР	крейсерский режим
КЭМ	конечно-элементная модель
МАХ	максимальный режим
Мг	режим малого газа
МнЦУ	многоцикловая усталость
МЦУ	малоцикловая усталость
НДС	напряженно-деформированное состояние
НД	нормативный документ
НК	неразрушающий контроль
НР	назначенный ресурс
НУ	начальные условия
ОД	основная деталь
ОТПЦ	обобщенный типовой полетный цикл
СРТ	скорость роста трещины
СРТУ	скорость роста трещины усталости
ТЗ	техническое задание
УО	Уполномоченный орган
FAR-33	Federal Aviation Rules. Part 33 (<i>англ.</i>) – Федеральные авиационные правила
FAA	Federal Aviation Agency – Федеральное Авиационное Агентство

Продолжение таблицы 4.1

EASA	European Aviation Safety Agency – Европейское Агентство Авиационной Безопасности
AC	Advisory Circular (<i>англ.</i>) – Рекомендательный Циркуляр
CS-E	Certification Specification for Engines (<i>англ.</i>) – Инструкция к сертификации двигателей
AMC	Acceptable Means of Compliance (<i>англ.</i>) – Допустимые методы установления соответствия
C	коэффициент уравнения Пэриса;
$C_{пзув}$	коэффициент уравнения Пэриса для полуэллиптических поверхностных, угловых или внутренних трещины
$C_{ср}$	средняя величина коэффициента уравнения Пэриса
$D_{ВП}$	долговечность ОД по вероятностному подходу
$D_{И1_ДП}$	долговечность ОД при определении наработки до первой инспекции по детерминированному подходу
$D_{ПИ_ДП}$	долговечность ОД при определении периодичности инспекций по детерминированному подходу
E	модуль упругости
G	интенсивность освобождающейся упругой энергии
J	J-интеграл
K	КИН
$K_{N_ВП}$	величина запаса по количеству ОТПЦ
$K_{эфф}$	эффективное значение КИН
ΔK	размах КИН
ΔK_{1C}	критический КИН
ΔK_{12}	размах КИН, соответствующий нижней границе участка Пэриса (устойчивого участка развития трещины)
ΔK_{23}	размах КИН, соответствующий верхней границе участка Пэриса (устойчивого участка развития трещины)
$\Delta K_{фт}$	размах КИН, соответствующий расположению фокусной точки
ΔK_{th}	размах КИН, соответствующий порогу страгивания трещины
k	коэффициент, учитывающий влияние на СРТУ формы трещины
l	характерный размер трещины

Продолжение таблицы 4.1

l_0	начальный характерный размер трещины
l_{12}	характерный размер трещины, соответствующий нижней границе участка Пэриса (устойчивого участка развития трещины)
l_{23}	характерный размер трещины, соответствующий верхней границе участка Пэриса (устойчивого участка развития трещины)
l_{\min}	минимальный характерный размер трещины
l_{\max}	максимальный характерный размер трещины
$l_{кр}$	критический характерный размер трещины
m	показатель степени уравнения Пэриса
$m_{пзув}$	показатель степени уравнения Пэриса для полуэллиптических поверхностных, угловых или внутренних трещины
$m_{ср}$	средняя величина показателя степени уравнения Пэриса
n	количество образцов
N	количество циклов нагружения
$N_{ПЦ}$	количество ОТПЦ
$N_{ср}$	среднее значение долговечности
$[N]_{и1_дп}$	наработка ОД до первой инспекции, определенная по детерминированному подходу
$[N]_{НР}$	НР ОД
$[N]_{НР_ВП}$	НР ОД по вероятностному подходу
$[N]_{пи_дп}$	периодичность инспекций ОД, определенная по детерминированному подходу
$[N]_{пи_ВП}$	периодичность инспекций ОД, скорректированная на основе вероятностного подхода
$[N]_{НР_КБД}$	НР ОД по КБД
$[N]_{НР_КБРТ}$	НР ОД по КБРТ
P	сила нагружения
P_v	вероятность обнаружения дефекта при ремонте или инспекции ОД
$P_{ОД}$	вероятность разрушения ОД
P_n	вероятность появления (попадания) дефекта в материале
r	расстояние до вершины трещины
t	толщина компактного образца

Окончание таблицы 4.1

T	температура
V	СРТУ
V_3	объем зоны ОД
$V_{фт}$	СРТУ, соответствующая расположению фокусной точки
W	расстояние от линии приложения нагрузки до боковой поверхности компактного образца, в направлении которой развивается трещина
τ	время нагружения
σ_1	первые главные напряжения
σ_e	интенсивность квазиупругих напряжений
$\sigma_{ост}$	модуль величины остаточных сжимающих напряжений
σ_T	предел текучести
$\Delta\sigma$	размах напряжений
ν	коэффициент Пуассона

5 Методические рекомендации по определению долговечности, наработки до первой инспекции, периодичности инспекций, назначенного ресурса основных деталей, ресурс которых устанавливается в циклах, с учётом наличия в них дефектов

Ресурсы ОД авиационных ГТД в соответствии с требованиями НД определяются по КБД (до появления трещины МЦУ) и по КБРТ¹ (с учетом возможного наличия дефектов в ОД). Методические рекомендации разработаны для определения ресурсов ОД авиационных ГТД по КБРТ на основе методов линейной механики разрушения с использованием детерминированного и вероятностного подходов.

Детерминированный подход основывается на предположении, что в самом неблагоприятном месте ОД располагается дефект с максимально возможным размером.

Вероятностный подход основывается на предположении, что дефекты разной природы и размеров распределены по всему объему ОД. Для реализации указанных подходов в методических рекомендациях приведены:

- требования к исходным данным (расчетно-экспериментальные исследования СРТУ, данные о дефектности материала, данные о дефектности поверхности ОД после механической обработки, вероятностные кривые обнаружения дефектов для применяемых методов НК и т.д.);
- расчетные методы, позволяющие определять долговечность ОД по детерминированному и вероятностному подходам.

В методических рекомендациях также приведен порядок определения эксплуатационных ограничений ОД по наработке на основе КБРТ. На рисунке 5.1 приведена схема определения эксплуатационных ограничений, положенная в основу методических рекомендаций.

¹ Работы по определению ресурса ОД на основе КБРТ можно не выполнять, если опытом эксплуатации аналогов и/или прототипов показано, что частота отказов ОД от дефектов материала, изготовления и эксплуатации относится к практически невероятному событию.

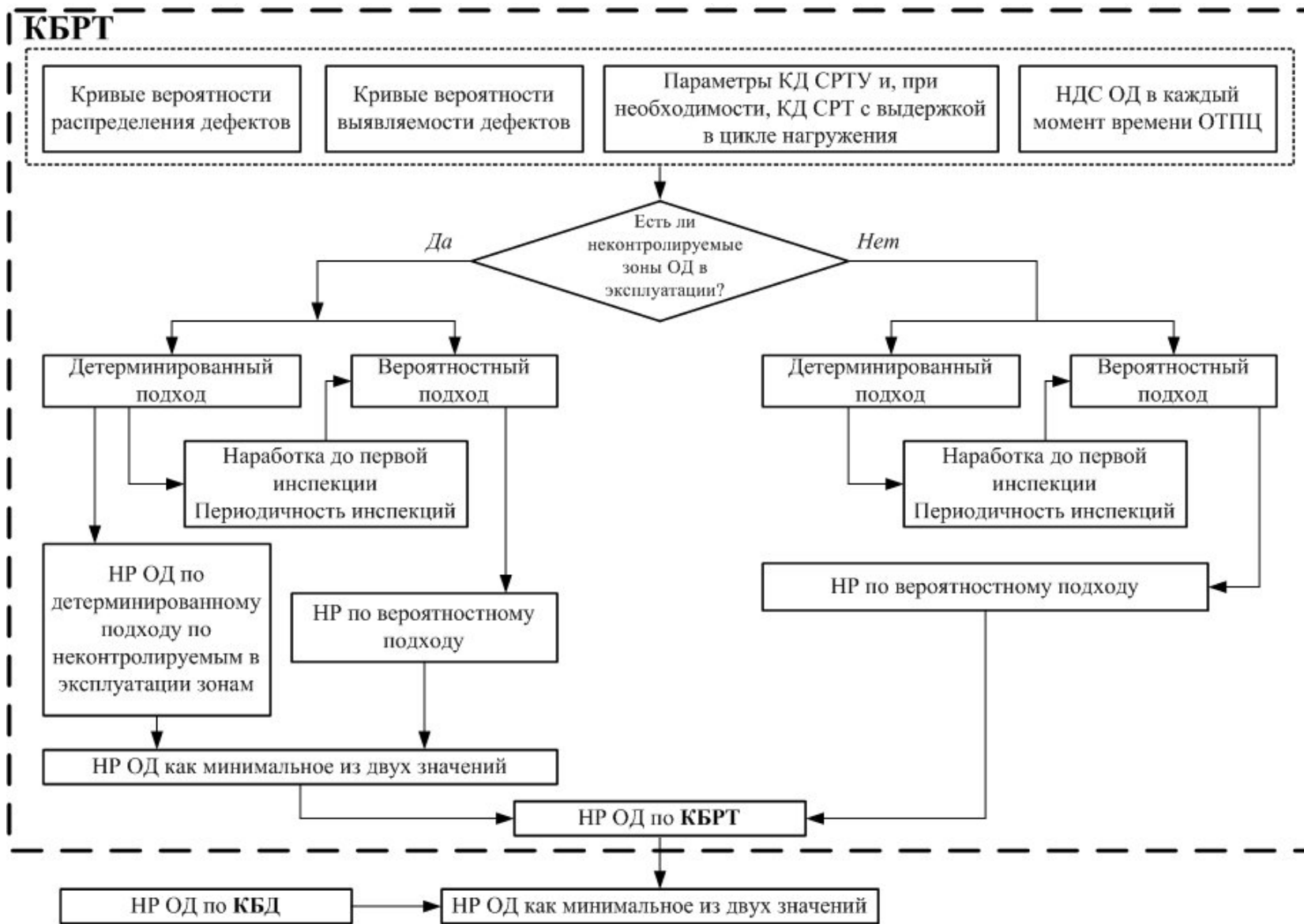


Рисунок 5.1 – Общая схема определения ресурсов по КБРТ

Методы и подходы, реализованные в методических рекомендациях, имеют следующие ограничения:

- в методических рекомендациях рассматриваются только трещины отрыва;
- не допускается использование данных методических рекомендаций для оценки долговечности и ресурсов (наработка до первой инспекции, периодичность инспекций и НР) ОД по КБРТ, в случаях, когда интенсивность квазиупругих напряжений σ_e в зонах концентрации напряжений в полуцикле нагружения превышает удвоенный предел текучести $\sigma_e > 2 \cdot \sigma_T^l$.

Учитывая, что на полученные в результате выполнения расчетно-экспериментальных работ значения долговечностей и ресурсов большое влияние будут оказывать полнота и достоверность исходных данных:

- данных о ОТПЦ;
- данных о тепловом состоянии ОД;
- данных о НДС;
- данных о характеристиках СРТ в материале ОД (С, m, ΔK_{12} , ΔK_{23} и т.д.);
- данных о выявляемости дефектов применяемыми методами НК;
- данных о дефектности материала ОД и т.д.,

работы по определению долговечностей и ресурсов не должны ограничиваться этапом проектирования, где большинство из перечисленных данных принимаются на основе информации об ОД–прототипах. Возможность получения данных, непосредственно относящихся к разрабатываемому изделию, появляется на других этапах жизненного цикла. Так, данные о механических свойствах материалов, получаемые при испытаниях образцов, вырезанных из заготовок ОД, и данные по выявляемости дефектов появляются на этапе производства. На этапе испытаний (доводки двигателя) появляются экспериментальные данные по тепловому состоянию ОД, а, следовательно, достоверные данные по НДС элементов конструкций. На этапе эксплуатации появляются данные о циклической нагруженности ОД (на основе использования алгоритмов контроля нагруженности и выработки ресурса), позволяющие провести уточнение ОТПЦ, заданного в ТЗ на проектирование двигателя.

Таким образом, определение (уточнение) ресурсов ОД по КБРТ должно проводиться на каждом этапе жизненного цикла ОД (проектирование, производство, доводка и

¹ При выполнении условия $\sigma_e < 2 \cdot \sigma_T$ после нескольких циклов нагрузки-разгрузки ГТД (количество циклов зависит от особенностей материала ОД и условий ее работы) характеристики упругопластического цикла в зоне концентратора стабилизируются, и материал ОД в зоне концентратора напряжений, получив упрочнение, будет работать в условиях упругого напряженно-деформированного состояния с новым значением предела текучести [1], что позволяет применять методы линейной механики разрушения.

эксплуатация) с учетом факторов, оказывающих влияние на долговечность ОД, уточняемых на каждом этапе жизненного цикла ОД.

5.1 Порядок определения эксплуатационных ограничений по наработке для ОД по КБРТ

5.1.1 По КБРТ для ОД определяются следующие виды эксплуатационных ограничений по наработке (наработка определяется в количестве ОТПЦ, а в случае влияния выдержки в цикле нагружения на СРТ, дополнительно, в часах):

- НР по КБРТ $[N]_{НР_КБРТ}$ (п.5.1.2);
- наработка до первой инспекции $[N]_{И1_ДП}$ (п.5.1.3);
- периодичность инспекций $[N]_{ПИ_ДП}$ (наработка между двумя последовательными операциями контроля) (п.5.1.4).

5.1.2 НР ОД по КБРТ устанавливается на основе вероятностного подхода $[N]_{НР_ВП}$ (п.5.3), за исключением случаев, описанных в пп.5.1.2.1 и 5.1.2.2

$$[N]_{НР_КБРТ} = [N]_{НР_ВП}.$$

5.1.2.1 Если в эксплуатации при проведении инспекции не предусмотрен (не возможен) НК каких-либо поверхностных зон ОД, то для таких зон НР определяется как минимальное значение НР, полученных на основе вероятностного и детерминированного подходов

$$[N]_{НР_КБРТ} = \min\{[N]_{И1_ДП}, [N]_{НР_ВП}\}.$$

5.1.2.2 Если наработка до первой инспекции, определенная по детерминированному подходу, больше или равна величине НР ОД, заданной в ТЗ на проектирование двигателя, определение НР на основе вероятностного подхода для данной ОД не обязательно,

$$[N]_{НР_КБРТ} = [N]_{И1_ДП}.$$

5.1.2.3 НР для ОД $[N]_{НР}$ в соответствии с НД определяется минимальным из значений, полученных на основе КБД и КБРТ

$$[N]_{НР} = \min\{[N]_{НР_КБД}, [N]_{НР_КБРТ}\}.$$

Примечания

- 1 Учитывая, что ограничения ресурсов ОД в эксплуатации устанавливаются и по КБД, и по КБРТ, алгоритмы выработки ресурсов должны отслеживать выработку ресурса с учетом МЦУ [3,4] и СРТУ [5].
- 2 Долговечность и НР для ОД на основе КБД $[N]_{НР_КБД}$ определяются на основании результатов эквивалентно-циклических испытаниях ОД или на основании расчетно-экспериментальных работ с использованием банка данных по конструкционной прочности материалов. Описание подходов и системы запасов для определения НР по КБД в данных методических рекомендациях не приводятся.

5.1.3 Нарботка ОД до первой инспекции определяется на основе детерминированного подхода (п.5.2) от дефектов (таблица 5.1.1), тип которых определяется в зависимости от технологии производства заготовки (п.5.1.3.1) и технологии изготовления ОД (п.5.1.3.2). Нарботка ОД до первой инспекции может быть скорректирована в меньшую сторону исходя из экономических соображений или для удовлетворения требований ТЗ на проектирование двигателя.

Таблица 5.1 – Виды дефектов, возможные на разных этапах жизненного цикла ОД

Этапы жизненного цикла ОД	Объект	Дефект	Причины возникновения дефектов в ОД	Примечание
Производство заготовки	Заготовки ОД из титановых сплавов, получаемые деформацией слитка	Посторонние включения, твердая α -фаза, неблагоприятная кристаллографическая текстура	Несовершенство или нарушение технологии получения заготовки ОД	Данные виды дефектов учитываются при определении наработки до первой инспекции и НР, а также периодичности инспекций ¹
	Заготовки ОД (не из титановых сплавов), получаемые деформацией слитка	Структурная и химическая неоднородность материала, посторонние включения		
	Заготовки ОД из гранулируемых никелевых сплавов	Дефекты, образованные попаданием органики, керамические и шлаковые включения, медьсодержащие включения, нерасплавление (неспекание) гранул		
	Заготовки ОД, полученные литьем, сваркой	Газовая пористость, химическая неоднородность, неметаллические включения и пр.		
Изготовление ОД	ОД, полученные любыми методами изготовления	Риски, забоины, прижоги и пр.	Несовершенство или нарушение технологии изготовления ОД	
Эксплуатация (в том числе ремонт) ОД	Любые ОД	Трещины МЦУ, риски, забоины, следы контактного взаимодействия, коррозия и пр.	Попадание посторонних предметов, влияние окружающей среды, взаимодействие элементов конструкции друг с другом, МЦУ. Несовершенство или нарушение технологии проведения ремонта	Данные виды дефектов учитываются при определении только периодичности инспекций

¹ Периодичность инспекций, в данном случае, определяется от дефектов производства заготовки и/или изготовления, если при ремонте двигателя производится дополнительная механическая обработка ОД по снятию материала с поверхностей ОД

Размеры дефектов, закладываемых в расчет наработки до первой инспекции, определяются на основе кривых вероятности распределения дефектов, получаемых Разработчиком совместно с поставщиком заготовок, изготовителем ОД и изделия на основе специальных расчетно-экспериментальных исследований. При выполнении расчетов должен использоваться максимальный размер дефекта.

5.1.3.1 Дефекты, связанные с получением заготовки ОД.

Дефекты в заготовках ОД, получаемых с использованием гранульной технологии изготовления:

- неметаллические включения (шлаки, керамика);
- трещины, вызванные нерасплавлением (неспеканием) гранул.

Примечание – Для сплавов на никелевой основе возможность появления в заготовках дефектов от попадания органики, медьсодержащих включений должна быть исключена технологически на этапе производства заготовки.

Дефекты в заготовках ОД, получаемых с использованием технологии деформации слитка:

- посторонние включения;
- включения типа «✓ – твердая фаза» для сплавов на титановой основе*.

Примечание – Возможность появления в заготовках из титановых сплавов дефектов типа «неблагоприятная кристаллографическая текстура» должна быть исключена технологически на этапе производства заготовки.

Дефекты в заготовках ОД, получаемых с использованием литья и сварки:

- газовая пористость;
- непровары;
- посторонние включения;
- термические трещины и т.д.

5.1.3.2 Дефекты, связанные с изготовлением ОД и сборкой изделия:

- риски от механической обработки;
- забоины;

*Определение долговечности ОД, изготовленных из титановых сплавов, в предположении наличия в них ✓ -твердой фазы, допускается проводить на основе вероятностного подхода. В этом случае величина наработки до первой инспекции и периодичности инспекций на основе детерминированного подхода от ✓ -твердой фазы не определяется.

– прижоги и т.д.

5.1.3.3 При наличии доказательств отсутствия при производстве заготовки или при изготовлении готовой ОД каких-либо типов дефектов, приведенных в пп.5.1.3.1 и 5.1.3.2, определение наработки до первой инспекции ОД от указанных типов дефектов не выполняется.

5.1.3.4 Допускается при расчете наработки до первой инспекции закладывать значение размера дефекта, выявляемого применяемыми методами НК с вероятностью обнаружения не ниже 90% и доверительной вероятностью по п.А.3.3 приложения А, в случае, если данное значение меньше величины дефекта, связанного с получением заготовки ОД или с изготовлением ОД и сборкой изделия. При этом оценка чувствительности применяемых методов НК должна быть проведена на конкретном виде дефекта.

5.1.4 Периодичность инспекций ОД определяется на основе детерминированного подхода (п.5.2) в предположении, что в процессе эксплуатации от дефектов, возникающих на этапе производства заготовки ОД, изготовления ОД, сборки изделия, могли развиваться трещины МЦУ, которые не были выявлены в процессе первой инспекции (таблица 5.1.1). Периодичность инспекции ОД может быть скорректирована в меньшую сторону исходя из экономических соображений или для удовлетворения требований ТЗ на проектирование двигателя.

Размеры трещин МЦУ, закладываемые в расчет периодичности инспекций, определяются на основе вероятностных кривых выявляемости дефектов, получаемых Разработчиком для методов и средств НК, применяемых на ремонтных предприятиях и организациях, проводящих инспекции (Приложение А). При этом в расчет закладывается значение размера дефекта, выявляемого применяемыми методами НК с вероятностью обнаружения не ниже 90% и доверительной вероятностью по п.А.3.3 приложения А.

5.1.5 Если при инспекции обнаружены трещины, то возможность дальнейшей эксплуатации такой ОД должна согласовываться с Уполномоченным органом.

5.2 Определение долговечности, НР, наработки до первой инспекции и периодичности инспекций ОД на основе детерминированного подхода

При выполнении расчетов СРТ на основе детерминированного подхода используются следующие допущения:

- при ограничении ресурса ОД по МЦУ не учитывается влияние вибрационного фона на СРТУ;
- инкубационный период развития трещины может учитываться при наличии статистически достоверных доказательств его определения (рисунок 5.2.1а);
- в запас не учитывается торможение развития трещины в элементарном цикле, максимальные напряжения в котором меньше максимальных напряжений, соответствующих предыдущему элементарному циклу нагружения;
- если в расчётах СРТУ значение размаха КИН находится левее устойчивого участка КД, построенного на основе экспериментальных данных, развитие трещины (в запас) определяется по аппроксимации левого устойчивого участка КД (рисунок 5.2.1б);
- если экспериментально доказано, что КД для материала ОД на устойчивом участке (приблизительно от 10^{-5} до 10^{-3} мм/цикл [6]) имеет «перелом» (рисунок 5.2.1б), в расчётах СРТУ могут использоваться КД с учётом «перелома».

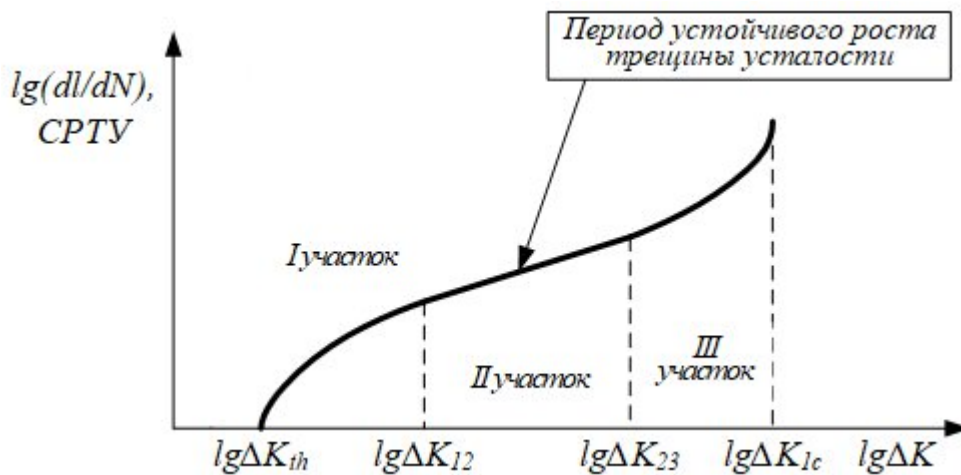


Рисунок 5.2.1а – КД развития трещины

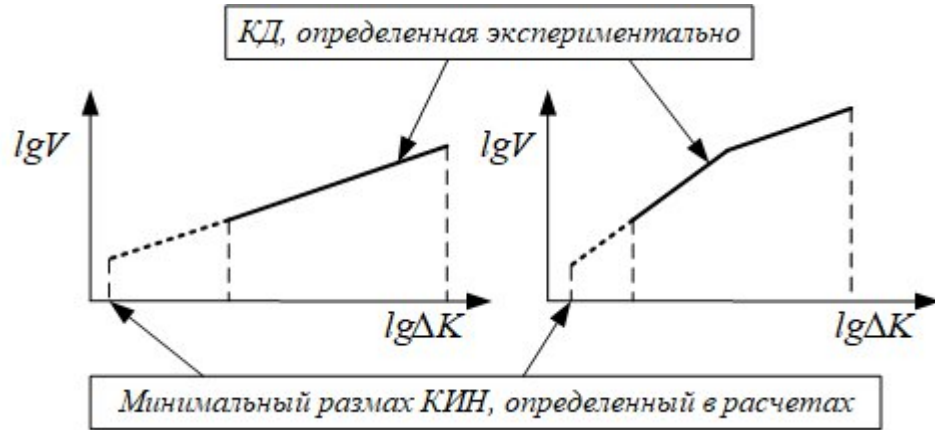


Рисунок 5.2.16 – Расчетная схема развития трещины

5.2.1 Для расчетов периода устойчивого роста трещины используются следующие данные:

- ОТПЦ (п.Б.2.3 приложения Б);
- НДС ОД на различных режимах с учетом особенностей эксплуатации ЛА (п.Б.4 приложения Б);
- расположение опасных зон в ОД (п. 5.2.2) с соответствующими размерами дефектов, не выявляемых с требуемой вероятностью применяемыми методами НК (п.А.4 приложения А);
- КД СРТУ в диапазоне скоростей, соответствующих устойчивому участку роста трещины (приблизительно от 10^{-5} до 10^{-3} мм/цикл) и, при необходимости, КД СРТ с учетом выдержки в цикле нагружения (п.5.2.3);
- кривые вероятности распределения дефектов в материале заготовки ОД (п.5.3.2).

5.2.2 Определение опасных зон ОД осуществляется на основе комплексного анализа (п.5.2.2.1), а также опыта эксплуатации двигателей (п.5.2.2.2).

5.2.2.1 Выбор опасных зон ОД основывается на комплексном анализе данных о:

- опасных (с точки зрения циклической долговечности) зонах ОД (п.Б.5 приложения Б);
- чувствительности применяемых методов НК (п.А.4 приложения А);
- критичности по последствиям для двигателя разрушения ОД по месту расположения дефекта (например, разрушение вала левее или правее упорного подшипника, возможности удержания лопатки при обрыве замкового выступа диска);
- возможности инспекции зон ОД в эксплуатации без разборки двигателя;
- наличии неконтролируемых зон ОД в процессе эксплуатации (п.5.1.2.1);

- дефектах, появление которых возможно в процессе сборки/разборки при выполнении ремонтных работ или инспекций;
- дефектах, появление которых возможно при попадании посторонних предметов в процессе эксплуатации ОД;
- распределении остаточных напряжений в ОД, возникающих на этапе изготовления ОД и при эксплуатации, их уровне и знаке.

5.2.2.2 Кроме опасных зон, определенных на основе комплексного анализа (п.5.2.2.1), необходимо включить в перечень опасных зоны, в которых:

- ~ были выявлены повреждения при инспекциях аналогичных ОД;
- ~ наличие дефектов приводило к разрушению ОД в эксплуатации или при испытаниях.

5.2.2.3 По результатам определения опасных зон в ОД (п.п.5.2.2.1 и 5.2.2.2) необходимо представить схематичное расположение этих зон в ОД и указать плоскости распространения трещин, определяемые по п.5.2.4.3 (например, как на рисунке 5.2.2).

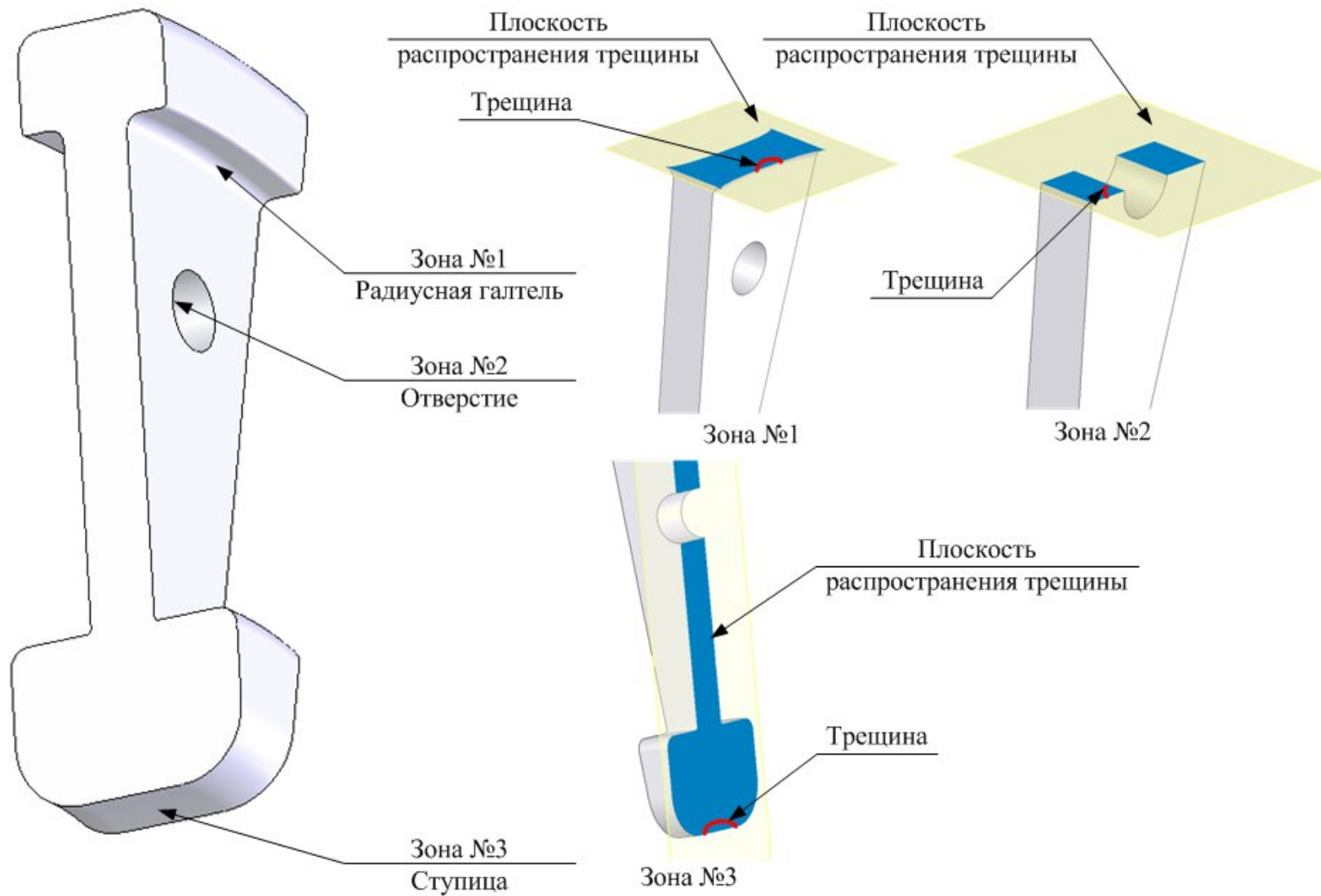


Рисунок 5.2.2 – Схематичное представление расположения опасных зон в ОД и плоскостей распространения трещин

5.2.3 Определение КД СРТУ и КД СРТ с учетом выдержки в цикле

КД СРТУ и КД СРТ с учетом выдержки в цикле могут быть получены на основе:

- испытаний образцов, вырезанных из заготовок или готовых ОД (п.п.5.2.3.1, 5.2.3.2) [7, 8, 9];
- реконструкции СРТУ на основе фрактографических исследований данной ОД [10,11, 12];
- реконструкции СРТУ при фрактографических исследованиях ОД, схожих с инспектируемой по свойствам материала, геометрии и условиям работы (по согласованию с УО).

5.2.3.1 Проведение циклических испытаний образцов, вырезанных из заготовок или готовых ОД, и обработка результатов испытаний

Испытания образцов на СРТУ, вырезанных из заготовок или готовых ОД, должны проводиться в соответствии с НД [7, 8, 9, 13]. Рекомендуется:

- при асимметрии цикла нагружения 0,1-0,2 проводить испытания на компактных образцах при внецентренном растяжении (рисунок 5.2.3);
- испытания проводить при постоянной амплитуде нагружения образцов;
- проводить испытания не менее 4-х образцов на каждую температуру.

Предварительную усталостную трещину следует наносить при МнЦУ. Допускается предварительную усталостную трещину выращивать при комнатной температуре.

При проведении измерений длины трещины в процессе испытаний на СРТУ необходимо придерживаться следующих требований:

- два любые значения прироста длины трещины на поверхности образца при заданном числе циклов нагружения не должны отличаться более, чем на 0,02W (рисунок 5.2.3);
- интервалы (в количестве циклов) между двумя последовательными измерениями длины трещины должны отличаться не более чем на 30% друг от друга.

После завершения испытаний необходим анализ изломов образцов с целью определения степени искривления фронта трещины. Критерии, по которым кривизна фронта трещины в образце является не допустимой, а также дополнительные параметры отбраковки результатов испытаний образцов приведены в [8].

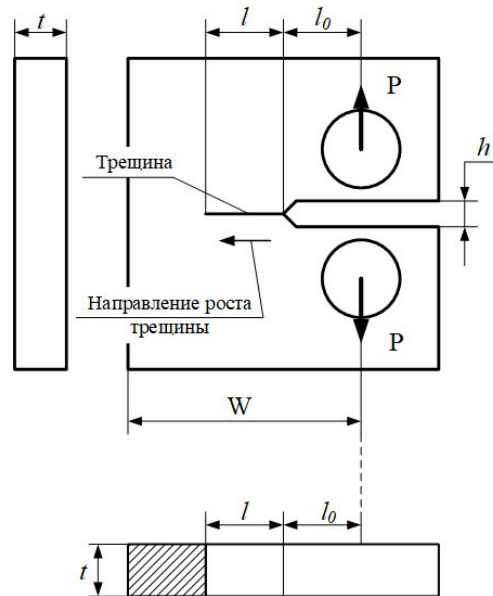


Рисунок 5.2.3 - Эскиз компактного образца на внецентренное растяжение

Ниже приведены некоторые требования и рекомендации по проведению испытаний образцов на СРТУ:

- амплитуда нагрузки при нанесении предварительной трещины не должна превышать амплитуду нагрузки при проведении испытаний на СРТУ;
- частота нагружения образца, при проведении испытаний на СРТУ, должна соответствовать частоте нагружения ОД в опасной зоне, если частота нагружения в опасной зоне ОД превышает 5 Гц [14]. В других случаях, частота нагружения образца определяется исходя из временных и экономических соображений;
- испытания образцов необходимо проводить в диапазоне рабочих температур, характерных для рассматриваемой опасной зоны ОД;
- для тонкостенных ОД (например, корпус камеры сгорания) толщина образцов должна выбираться в соответствии с толщиной элемента конструкции;
- результаты испытаний каждого образца должны содержать не менее 50 точек замера, принадлежащих участку КД, характеризующему период устойчивого роста трещины (рисунок 5.2.1а). Для обеспечения выполнения этого требования нагрузку и периодичность замеров длины трещины при испытаниях образцов следует подбирать экспериментально.

Обработку результатов испытаний образцов проводить по следующим рекомендациям:

- устойчивый участок КД развития трещины рекомендуется аппроксимировать уравнением Пэриса

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot \Delta K^m; \quad (5.2.1)$$

- для определения коэффициентов уравнения Пэриса (или параметров других уравнений аппроксимации) необходимо выделить экспериментальные данные зависимости длины трещины от количества циклов нагружения $l(N)$, принадлежащие устойчивому участку КД развития трещины. Границы устойчивого участка рекомендуется определять методом, изложенным в [15,16,17].

5.2.3.2 При нагружении ОД в эксплуатации с выдержкой в цикле необходимо проводить исследования влияния выдержки в цикле на СРТ при проведении испытаний образцов, вырезанных из заготовок или готовых ОД.

При экспериментальном подтверждении (в процессе испытаний с выдержкой в цикле) независимости процессов прироста длины трещины от циклического и статического нагружений (в данном материале ОД при данной температуре), допускается раздельное получение характеристик СРТ:

- dl/dN – при циклическом нагружении образца;
- dl/dt – при статическом нагружении образца.

Примечание – Программы испытаний образцов по п.5.2.3.2 и данные обработки результатов испытаний необходимо согласовывать с УО.

5.2.3.3 При определении долговечности по КБРТ необходимо пользоваться усредненными характеристикам СРТ для каждого уровня температур.

При определении средних значений коэффициентов уравнения Пэриса рекомендуется применять следующие методы, основанные на том, что случайные величины lgC и m , а также значения долговечности (количество циклов развития трещины в пределах устойчивого участка) подчиняются нормальному закону распределения:

- 1) *Метод определения значений коэффициентов уравнения Пэриса по усредненной зависимости «длина трещины - количество циклов нагружения»* [16,18]. Предложенный метод обработки результатов испытаний n образцов позволяет получить значения коэффициентов уравнения Пэриса C^* и m^* , дающие среднее значение долговечности N_{cp} из n значений долговечности образцов, взятых для проведения обработки и испытанных при одинаковой температуре, асимметрии и выдержке в цикле. Порядок определения значений коэффициентов уравнения Пэриса C^* и m^* следующий:

- для каждого из n испытанных образцов определяются длины трещин (l_{12i}, l_{23i}), соответствующие границам устойчивого участка и коэффициенты уравнения Пэриса (C_i и m_i), где $i=1,2,\dots,n$;
- для значений l_{12i} и l_{23i} каждого испытанного образца определяются соответствующие им значения ΔK_{12i} и ΔK_{23i} . Использование величин ΔK_i , а не l_i , при определении осредненных по результатам n испытаний коэффициентов уравнения Пэриса, продиктовано тем, что испытания образцов могут проводиться при разных значениях максимальной нагрузки;
- из массива данных ΔK_{12i} и ΔK_{23i} ($i=1,2,\dots,n$) определяются наибольшая величина нижней границы устойчивого участка КД

$$\Delta K_{12max} = \max_{i=1\dots n} (\Delta K_{12i})$$

и наименьшая величина верхней границы устойчивого участка КД

$$\Delta K_{23min} = \min_{i=1\dots n} (\Delta K_{23i}).$$

- с использованием формулы (5.2.1) и коэффициентов C_i и m_i строятся кривые развития трещины для i -го образца ($i=1,2,\dots,n$) в координатах «длина трещины - количество циклов нагружения» в пределах размаха КИН от ΔK_{12max} до ΔK_{23min}

$$N_i(L) = \int_{L(\Delta K_{12max})}^L \frac{dl}{C_i \cdot [\Delta K(l)]^{m_i}}$$

где $L(\Delta K_{12max}) \leq L \leq L(\Delta K_{23min})$; $\Delta K(l)$ - зависимость размаха КИН от длины трещины l , определенная для выбранной величины приведенной максимальной нагрузки P в цикле нагружения и коэффициента асимметрии нагружения. Если испытания n образцов были проведены при одинаковой амплитуде нагружения, то приведенная нагрузка P берется равной амплитуде нагружения при испытаниях. Если образцы испытаны при различных амплитудах нагружения, то в качестве приведенной принимается любая из них;

- строится зависимость длины трещины l от осредненного по m значениям $N_i(l)$ числа циклов нагружения N_{cp} с использованием формулы

$$N_{cp}(l) = \frac{\sum_{i=1}^n N_i(l)}{n};$$

- значения коэффициентов C^* и m^* определяются с использованием метода наименьших квадратов [15,16,17];

- полученные значения коэффициентов уравнения Пэриса C^* и m^* можно применять в интервале осредненных значений размахов КИН, определяемых по результатам испытаний n образцов по формулам

$$\Delta K_{12cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta K_{12i}}{n}; \Delta K_{23cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta K_{23i}}{n}.$$

- 2) Метод определения средних значений коэффициентов уравнения Пэриса с использованием зависимости $\lg C$ от показателя степени m [14,19]. Порядок определения средних значений коэффициентов уравнения Пэриса следующий:

- среднее значение показателя степени m_{cp} определяется по формуле

$$m_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n},$$

где n - количество образцов, испытанных при данной температуре (рисунок 5.2.4);

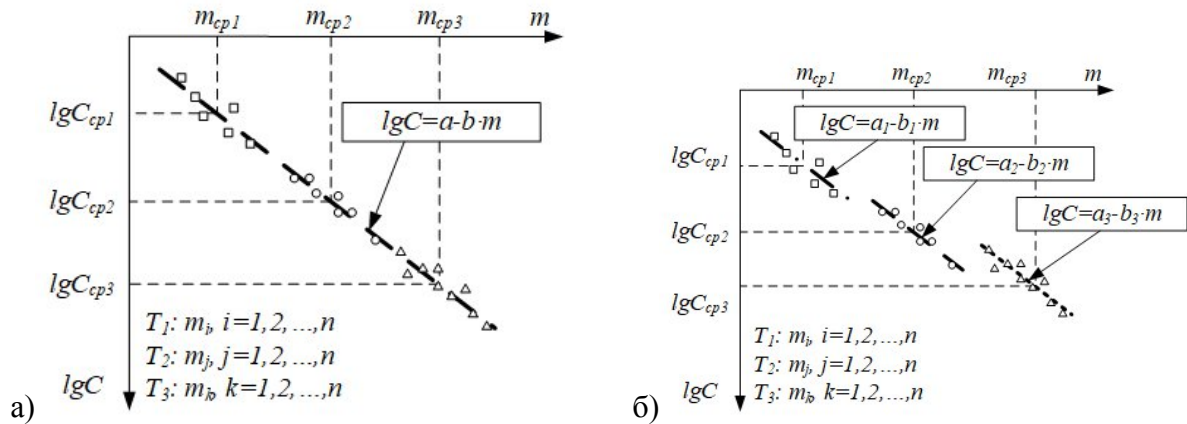


Рисунок 5.2.4 - Зависимости $\lg C$ от показателя степени m , инвариантная (а) и не инвариантные (б) температуре испытаний [14,19]

- среднее значение коэффициента C_{cp} определяется по формуле

$$C_{cp} = 10^{a-b \cdot m_{cp}},$$

где a и b - коэффициенты уравнения прямой (рисунок 5.2.4а) или прямых (рисунок 5.2.4б), аппроксимирующих экспериментальные данные $\lg C(m)$. При известных координатах фокусной точки для материала $V_{фm}$, $\Delta K_{фm}$ [14,19], коэффициенты a и b определяются следующим образом

$$a = \log(V_{фT}),$$

$$b = \log(\Delta K_{фT}).$$

Примечание – Коэффициенты a и b определяются на основе зависимости $\lg C(m)$, инвариантной к температуре (рисунок 5.2.4а), при удовлетворении условий: коэффициент корреляции линейной регрессии не менее 0,95; остатки линейной регрессии гомоскедастичны [20]. В противном случае коэффициенты a и b

определяются для каждой температуры отдельно (рисунок 5.2.4б).

- средние значения коэффициентов уравнения Пэриса C_{cp} и m_{cp} можно применять в интервале осредненных значений размахов КИН, определяемых по результатам испытаний n образцов по формулам

$$\Delta K_{12cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta K_{12i}}{n}; \Delta K_{23cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta K_{23i}}{n}.$$

5.2.3.4 Для расчета долговечности ОД с полуэллиптическими поверхностными, угловыми или внутренними трещинами, коэффициенты уравнения Пэриса C и m , полученные на стандартных компактных образцах (со сквозной трещиной), необходимо скорректировать для учета влияния формы трещины следующим образом [14,19]:

- показатель степени $m_{пэув}$ уравнения Пэриса для полуэллиптических поверхностных, угловых или внутренних трещин определяется по формуле

$$m_{пэув}(T) = m_{cp}(T)/k,$$

где $m_{cp}(T)$ - среднее значение показателя степени m , определенное по результатам испытаний стандартных компактных образцов по п.2.3.3, для температуры T ; k - коэффициент учитывающий влияние на СРТУ формы трещины;

- коэффициент $C_{пэув}$ уравнения Пэриса для полуэллиптических поверхностных, угловых или внутренних трещин определяется из следующего уравнения

$$\log(C_{пэув}) = \log(V_{фт}) - m_{пэув} \cdot \log(\Delta K_{фт}),$$

где $V_{фт}$, $\Delta K_{фт}$ - координаты фокусной точки на КД развития трещины.

Примечания

- 1 Для поверхностных полуэллиптических и угловых трещин в деталях (рисунок 5.2.7), изготовленных из сплавов на никелевой основе, коэффициент k равен 1,25; на титановой основе – k равен 1,00.
- 2 Для поверхностных полуэллиптических и угловых трещин в деталях (рисунок 5.2.7), изготовленных из сплавов не на никелевой или титановой основах, и внутренних трещин значение коэффициента k должно согласовываться с УО.
- 3 Для сквозных и кольцевых трещин (рисунок 5.2.7) коэффициент k принимается равным 1.

5.2.4 Определение зависимостей размахов КИН от характерного размера трещины в каждой опасной зоне ОД

5.2.4.1 В качестве характерного размера трещины принимается (рисунок 5.2.7):

- для поверхностных полуэллиптических трещин – полная длина трещины на поверхности ОД или расстояние от поверхности ОД до наиболее удаленной от нее точки фронта трещины (в зависимости от расположения точки с максимальными значениями КИН);
- для сквозных и кольцевых трещин - расстояние от поверхности ОД до наиболее удаленной точки фронта трещины;
- для угловых трещин - расстояние от угла, сформированного поверхностями ОД или их продолжениями, до фронта трещины (радиус);
- для внутренних трещин - одна из полуосей эллипса (в зависимости от расположения точки с максимальными значениями КИН).

5.2.4.2 Величина характерного размера начальной трещины определяется в зависимости от этапа жизненного цикла ОД:

- производство заготовки ОД – величина характерного размера начальной трещины определяется из анализа дефектности материала заготовки и задается при определении наработки до первой инспекции – п.5.1.3;
- изготовление ОД, сборка и ремонт – максимальный размер из обнаруженных в ОД двигателей-прототипов и ОД, сходных по технологии изготовления и задается при определении наработки до первой инспекции – п.5.1.3;
- эксплуатация (трещины МЦУ) – величина характерного размера начальной трещины определяется возможностями применяемых методов НК (приложение А) и задается при определении периодичности инспекций – п.5.1.4.

5.2.4.3 Требования к моделированию формы начальной трещины и ее начальному размеру l_0 для каждой опасной зоны ОД

Для определения КИН начальный дефект заменяется плоской трещиной. При выполнении расчетов плоскость расположения и распространения трещины должна ориентироваться нормально к направлению действия максимальных главных напряжений [21].

Форма начальной трещины и ее начальный размер задаются в зависимости от метода получения заготовки ОД, этапа эксплуатации ОД и экспериментальных данных по исследованию развития трещин в ОД при доводке и в эксплуатации двигателей-прототипов:

- 1) при определении наработки до первой инспекции:

- а) для заготовок ОД, изготовленных методами гранульной металлургии, методами литья и сварки, принимается, что материал ОД содержит дефекты, внутренние и поверхностные. Форма начальной трещины для:
- поверхностной трещины моделируется полукругом;
 - угловой трещины моделируется четвертью круга;
 - внутренней трещины моделируется окружностью.

Примечание – При наличии данных о развитии трещины в конструктивно-подобной рассматриваемой зоне ОД, выполненной из материала с той же основной и при использовании тех же методов изготовления, начальная форма трещины моделируется исходя из имеющегося опыта и соотношения размеров.

Величина характерного размера начальной трещины определяется на основе анализа дефектности материала;

- б) для заготовок ОД, изготовленных деформацией слитка (за исключением сплавов на титановой основе), принимается, что дефекты в материале ОД отсутствуют, и возможны только дефекты, связанные с изготовлением ОД и сборкой (прижоги, риски, забоины и т.д.). В качестве начальной трещины принимается сквозная или кольцевая трещина глубиной 50 мкм*. Внутренние трещины не рассматриваются;
- с) для заготовок ОД, изготовленных из сплавов на титановой основе, помимо дефектов, указанных в пункте б), должно учитываться возможное наличие « α -твердой фазы». Определение эксплуатационных ограничений ОД с учетом данного вида дефекта должно проводиться по детерминированному или по вероятностному подходу. Определение эксплуатационных ограничений с учетом наличия в ОД « α -твердой фазы» по вероятностному подходу изложено в п.5.3.

В случае применения детерминированного подхода для определения эксплуатационных ограничений при наличии в ОД « α -твердой фазы», величина характерного размера начальной трещины определяется на основе анализа данных о количестве и размерах включений « α -твердой фазы» в материале заготовки. Форма начальной трещины для:

- поверхностной трещины моделируется полукругом;
- угловой трещины моделируется четвертью круга;
- внутренней трещины моделируется окружностью.

* При наличии обоснования размеры трещины могут быть изменены. Величина глубины трещины 50 мкм задана по результатам анализа обнаруженных на поверхностях ОД после изготовления рисков и является консервативной оценкой.

Примечание – При наличии данных о развитии трещины в конструктивно-подобной рассматриваемой зоне ОД, выполненной из материала с той же основной и при использовании тех же методов изготовления, начальная форма трещины моделируется исходя из имеющегося опыта и соотношения размеров.

2) при определении периодичности инспекций (наработка между двумя последовательными операциями контроля) принимается, что в ОД от дефектов материала, механической обработки или сборки в процессе эксплуатации могли развиваться трещины МЦУ. Форма трещины моделируется для:

- поверхностной трещины полукругом;
- угловой трещины четвертью круга;
- внутренней трещины окружностью.

Примечание – При наличии данных о развитии трещины в конструктивно-подобной рассматриваемой зоне ОД, выполненной из материала с той же основной и при использовании тех же методов изготовления, начальная форма трещины моделируется исходя из имеющегося опыта и соотношения размеров.

Величина характерного размера начальной трещины определяется из анализа методов НК (приложение А).

5.2.4.4 Требования к моделированию фронта трещины в процессе ее развития:

- соотношение длин полуосей поверхностных полуэллиптических, угловых и внутренних трещин, развивающихся в однородном поле напряжений, должно оставаться неизменным по мере роста трещины;
- соотношение длин полуосей поверхностных полуэллиптических, угловых и внутренних трещин, развивающихся в неоднородном поле напряжений должно изменяться по мере роста трещины. Рекомендации по определению изменения соотношения длин полуосей приведены в приложении В;
- изменение формы кольцевых трещин при моделировании их развития не допускается.

5.2.4.5 Критический размер трещины $l_{кр}$ для каждой опасной зоны ОД определяется как минимальное из двух значений, при которых:

- значение размаха КИН в любой из точек на фронте трещины достигает значения ΔK_{23} (рисунок 5.2.1а) в элементарном цикле нагружения 0-МАХ-0 [22];

- наступает потеря функциональной способности ОД (появление недопустимого дисбаланса, недопустимое снижение несущей способности или другие опасные последствия).

Приближенную оценку величины критического размера трещины для данной опасной зоны ОД, при котором размах КИН достигает значения ΔK_{23} , можно выполнить, используя зависимость

$$l_{кр} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\Delta K_{23}}{F \cdot \Delta \sigma} \right]^2,$$

где $\Delta \sigma$ - размах напряжений в районе трещины; F – поправочный коэффициент, зависящий от формы ОД, характера нагружения и вида трещины, определяемый по справочным данным [23].

5.2.4.6 По результатам расчета теплового состояния и НДС ОД за ОТПЦ (приложение Б) строятся зависимости первых главных напряжений σ_1 и температуры T от времени τ в каждой опасной зоне ОД (5.2.1). Из зависимостей $\sigma_1(\tau)$ (рисунок 5.2.5) для каждой опасной зоны ОД выделяются элементарные циклы нагружения и соответствующие им режимы: МАХ, Мг, КР и т.п.

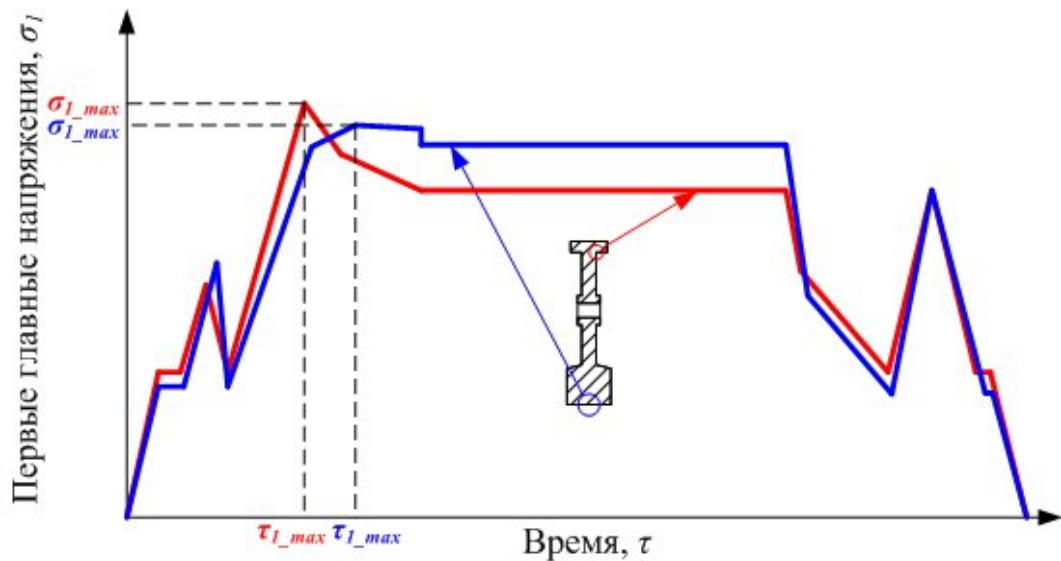


Рисунок 5.2.5 – Схематичное представление изменения первых главных напряжений от времени

Для выделенных режимов определяются зависимости КИН (рисунок 5.2.6) от минимального характерного размера трещины l_{min} до максимального l_{max} [24]. Диапазон изменения характерного размера трещины $[l_{min} l_{max}]$, в котором определяются значения КИН, должен быть заведомо шире диапазона $[l_0 l_{кр}]$.

Должны быть определены зависимости КИН от характерного размера трещины для

максимального режима (МАХ) и прочих режимов (Мг, КР и т.п.).

Примечание – В случае, если в элементарном цикле нагружения момент времени с максимальными напряжениями в зоне трещины не совпадает с моментом времени с максимальной температурой в зоне трещины, то зависимости КИН от характерного размера трещины, необходимо определять для условий, при которых величина долговечности по детерминированному подходу консервативна.

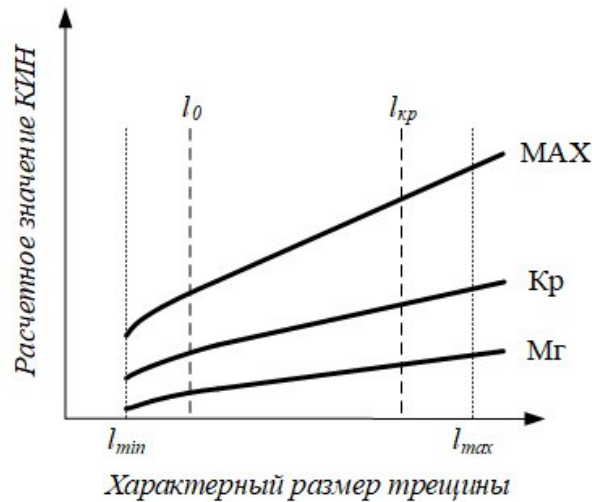


Рисунок 5.2.6 – Зависимость КИН от характерного размера трещины

5.2.4.7 Расчёты НДС для определения КИН должны выполняться в упругой постановке. Вычисление КИН должно проводиться для всех точек каждого фронта трещины. Необходимо моделировать не менее 5 фронтов развития трещины (количество указано с учетом фронтов, соответствующих минимальному и максимальному характерным размерам трещины) с применением регулярных сеток, имеющих соотношение длин сторон в конечных элементах, близкое к единице. Для вычисления СРТ необходимо использовать максимальные расчетные значения КИН из всех, полученных по фронту трещины. За характерный размер из указанных в п.5.2.4.1 для поверхностных и внутренних трещин выбирается тот, при котором значения КИН в точках фронта трещины больше (рисунок 5.2.7).

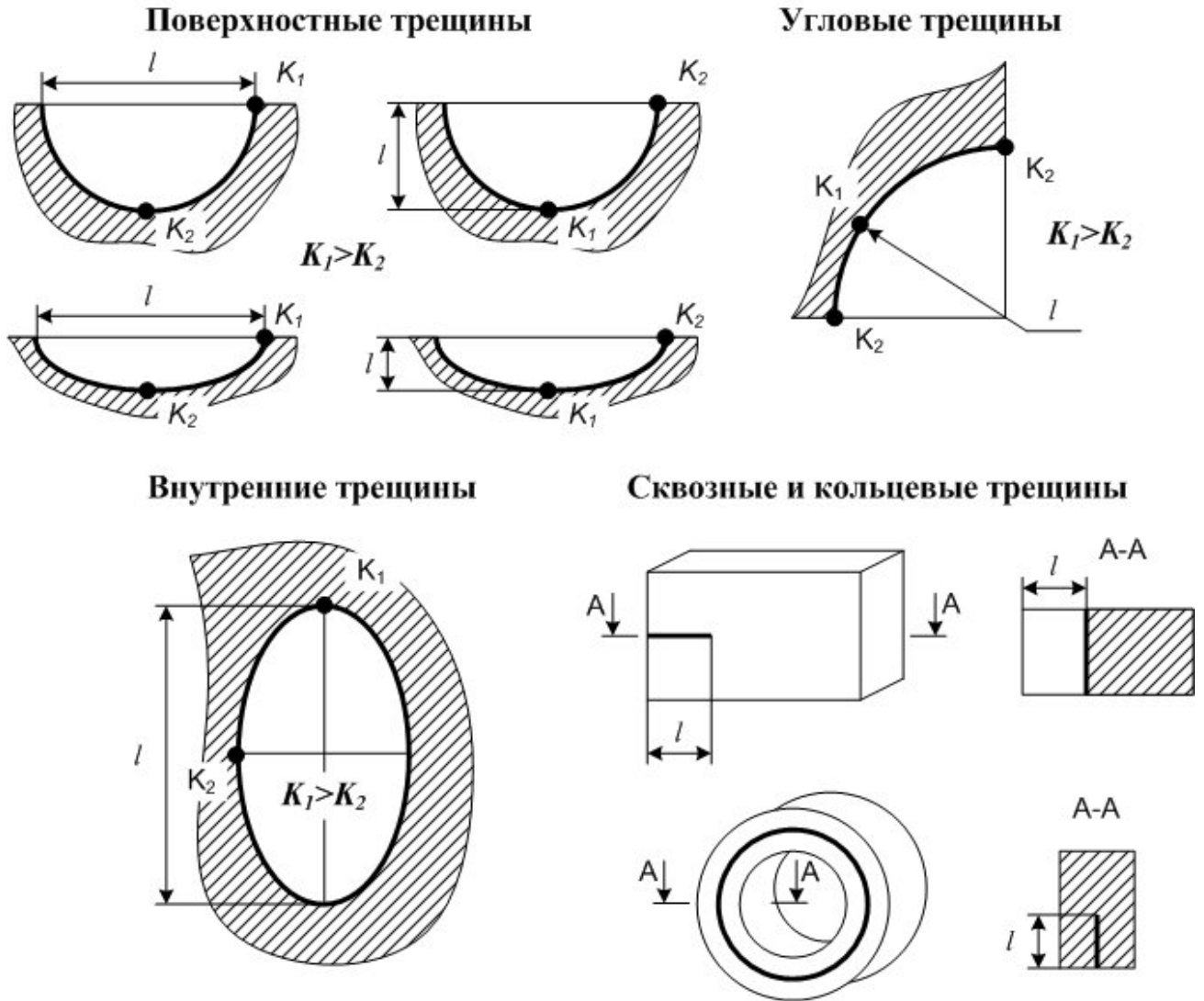


Рисунок 5.2.7 – Определение характерного размера l трещины

При определении КИН в каждой точке фронта рекомендуется применять следующие методы [25] (методы применимы только при определении КИН трещин отрыва и только с использованием расчетов, выполненных в упругой постановке):

- 1) *Метод линейного интегрирования.* Метод основан на определении значения контурного интеграла (J-интеграла) в выбранной точке фронта трещины

$$J = \oint_{\Gamma} \left(W_0 dy - T_0 \frac{\partial u}{\partial x} ds \right),$$

где Γ - произвольный контур, окружающий вершину трещины, W_0 - плотность энергии деформации, T_0, u - векторы нагрузки и перемещения соответственно.

Величина КИН через J-интеграл определяется по формулам:

- для плоского напряженного состояния

$$K = \sqrt{J \cdot E};$$

- для плоского деформированного состояния

$$K = \sqrt{\frac{J \cdot E}{1 - \nu^2}}$$

2) *Прямой метод.* Данный метод основывается на том, что

- раскрытие трещины (по направлению $0Y$, рисунок 5.2.8а) подчиняется закону

$$u|_{r \rightarrow 0} = \frac{K}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}}$$

- напряжения вблизи трещины (по направлению $0X$, рисунок 5.2.8б) распределяются по закону

$$\sigma_y|_{r \rightarrow 0} = \frac{K}{\sqrt{2\pi \cdot r}},$$

где r - расстояние до вершины трещины, σ_y - компонента напряжений по направлению $0Y$, u - перемещение трещины в направлении $0Y$, G - модуль сдвига.

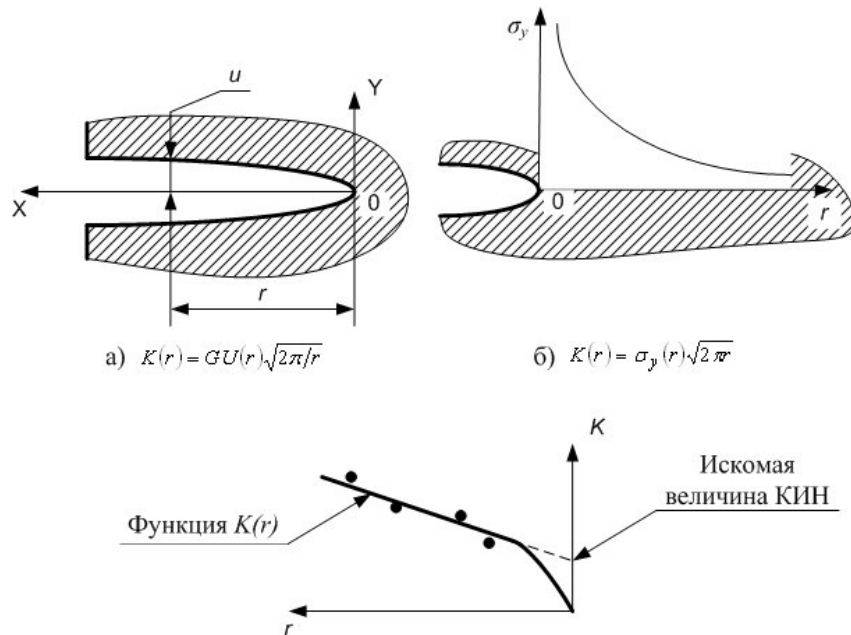


Рисунок 5.2.8 – Прямой метод определения КИН

Примечания

- 1 Применение других методов определения КИН должно быть согласовано с УО.
- 2 Расчетное определение значений КИН на основе перечисленных выше методов реализовано в программных комплексах ANSYS и MSC.Marc [26,27]. Порядок и примеры определения значений КИН с помощью ANSYS и MSC.Marc должны быть приведены в материалах, предоставляемых в УО Разработчиком. Возможность использования других программных продуктов для определения КИН должна быть

доказана на основе сопоставления результатов расчетов с известными аналитическими решениями [23].

5.2.4.8 Для учета влияния на СРТУ остаточных сжимающих напряжений, возникающих в зонах концентрации напряжений в результате упрочнения материала при его упругопластическом деформировании (с учетом ограничения, изложенного во введении), можно корректировать зависимости КИН K от характерного размера трещины с учетом величины остаточных сжимающих напряжений с использованием подхода [28], когда величины K (рисунок 5.2.6) заменяются на $K_{эфф}$, определяемые по формуле:

$$K_{эфф} = K \cdot [1 - \sigma_{ост}/\sigma_e],$$

где $K_{эфф}$ - эффективное значение КИН в точке фронта трещины, полученное с учетом влияния остаточных напряжений; K - значение КИН в точке фронта трещины, определенное в п.5.2.4.7; $\sigma_{ост}$ - модуль величины остаточных сжимающих напряжений в месте расположения трещины в полувелике разгрузки; σ_e - величина расчетных квазиупругих напряжений в месте расположения трещины в полувелике нагружения. Значения σ_e определяется на основе конечно-элементного моделирования упругого напряженно-деформированного состояния ОД. Значения $\sigma_{ост}$ должно определяться на основе конечно-элементного упруго-пластического моделирования НДС ОД и корректироваться с учетом экспериментального определения $\sigma_{ост}$ на статистически значимом количестве однотипных концентраторов с учетом возможности их ($\sigma_{ост}$) изменения по мере наработки.

Примечания

- 1 Корректировка значений КИН для учета остаточных сжимающих напряжений является не обязательной, т.к. использование нескорректированных значений КИН дает консервативное значение долговечности;
- 2 Постановку и результаты расчетно-экспериментальных исследований по учету остаточных сжимающих напряжений при прогнозировании развития трещины в опасной зоне ОД необходимо согласовывать с УО.

5.2.4.9 Определение зависимости размахов КИН от минимального характерного размера трещины до максимального

Величины размахов КИН или размахов эффективных КИН (для случая, указанного в п.5.2.4.8) от характерного размера трещины (рисунок 5.2.9) определяются для каждого элементарного цикла нагружения как разность между КИН (эффективными КИН) для максимального и прочих режимов.

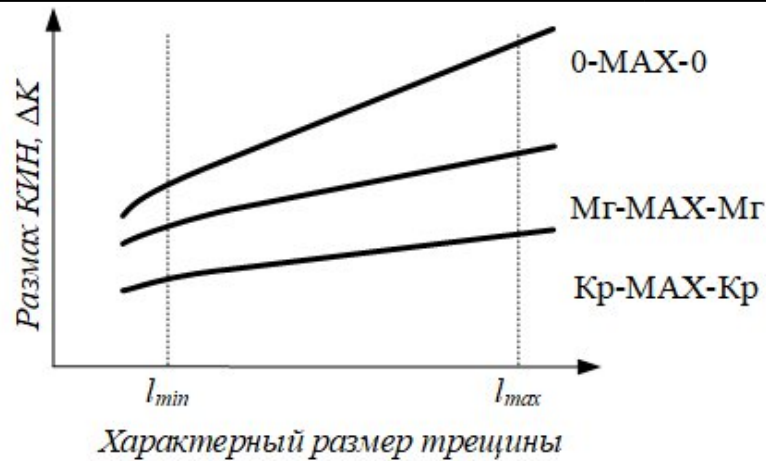


Рисунок 5.2.9 – Размахи КИН от характерного размера трещины

5.2.5 Определение величины характерного размера трещины от количества полетных циклов при выбранном ОТПЦ

5.2.5.1 Определение величины характерного размера трещины за один ОТПЦ при сложном цикле нагружения производится путем суммирования приращений характерных размеров трещины от начального значения характерного размера в каждом элементарном цикле нагружения [29,30,31]. Виды элементарных циклов нагружения и их последовательность определяются по результатам анализа зависимости первых главных напряжений от времени за ОТПЦ для каждой опасной зоны ОД (п.5.2.4.6).

Характерный размер трещины $l_{\Sigma k}$ за k -ый ОТПЦ вычисляется по формуле

$$l_{\Sigma k} = l_{\Sigma k-1} + \sum_{j=1}^g \Delta l_j, \quad (5.2.2)$$

где $l_{\Sigma k-1}$ - характерный размер трещины после выполнения $(k-1)$ -го ОТПЦ; j - порядковый номер элементарного цикла нагружения в ОТПЦ (рисунок Б.1 приложения Б); g - общее количество всех элементарных циклов нагружения в одном ОТПЦ (рисунок Б.1 приложения Б).

Примечание – Значение характерного размера трещины $l_{\Sigma k-1}$ при первой итерации ($k=1$) необходимо принимать равным величине начального размера трещины l_0 , определенной в соответствии с п.5.2.4.3.

Вычисление приращения характерного размера трещины в каждом элементарном цикле нагружения ОТПЦ определяется по формуле [5]

$$\Delta l_j = C_j \cdot [\Delta K_j(l_{j-1})]^{m_j},$$

где l_{j-1} - характерный размер трещины к моменту выполнения j -го элементарного цикла нагружения; C_j и m_j - параметры уравнения при максимальной температуре из режимов j -го

элементарного цикла нагружения; $\Delta K_j(l_{j-1})$ - размах КИН для j -го элементарного цикла нагружения в ОТПЦ от характерного размера трещины l_{j-1} .

Примечания

- 1 Значение характерного размера трещины l_{j-1} при первой итерации $j=1$ в k -ом ОТПЦ необходимо принимать равным величине характерного размера трещины $l_{\Sigma k-1}$, определенной после выполнения $(k-1)$ -ого ОТПЦ.
- 2 В формуле вычисления приращения характерного размера трещины в каждом элементарном цикле нагружения Δl_j не учитывается влияние асимметрии цикла нагружения [31].
- 3 Если размах КИН меньше величины порога страгивания трещины $\Delta K_j(l_{j-1}) \leq \Delta K_{th}$ при температуре и коэффициенте асимметрии нагружения j -го элементарного цикла (кроме цикла 0-МАХ-0), прирост характерного размера трещины Δl_j принимается равным 0. При отсутствии данных о пороге страгивания трещины в запас считается, что рост трещины происходит при любом размахе КИН больше нуля.

За каждый следующий ОТПЦ порядок следования элементарных циклов повторяется до тех пор, пока размер трещины не достигнет критического $l_{кр}$.

По результатам расчетов строится график зависимости характерного размера трещины от числа ОТПЦ $l_{\Sigma}(N_{nu})$ для каждой опасной зоны.

Возможно использование другой методики определения $l_{\Sigma}(N_{nu})$, если будет доказана достоверность получаемых результатов.

5.2.5.2 В случае, если в ОТПЦ авиационного ГТД входят несколько максимальных режимов работы двигателя (например, $MAX_1 > MAX_2 > MAX_3 > \dots$), определение характерного размера трещины от количества полетных циклов для принятого ОТПЦ производится исходя из предположения, что за характерный промежуток времени эксплуатации (рекомендуемая величина - 100 часов) вначале реализуются все полеты на самом нагруженном режиме (например, MAX_1), затем полеты в менее нагруженных режимах (например, MAX_2 , MAX_3). За каждый следующий характерный промежуток времени эксплуатации порядок следования режимов повторяется.

5.2.5.3 Влияние на СРТ выдержки в цикле нагружения

При наличии в цикле нагружения ОД выдержки при максимальной нагрузке, необходимо учитывать не только циклический прирост трещины за элементарный цикл нагружения, но и прирост характерного размера трещины под действием статических нагрузок на площадках τ_i (например, τ_1 , τ_2 , τ_3 на рисунке Б.1 приложения Б). Приращение

характерного размера трещины на каждой площадке вычисляется от характерного размера трещины, определенного в предыдущем элементарном цикле нагружения. При этом в уравнении (5.2.2) j становится порядковым номером элементарного цикла и площадки в ОТПЦ, g - общее количество элементарных циклов и площадок. Приращение характерного размера трещины на каждой площадке определяется с использованием КД, полученной с учетом требований п.5.2.3.2.

5.2.5.4 Для каждой i -ой опасной зоны ОД определяется период роста трещины $N_{отпц_i}$ (расчетное количество ОТПЦ развития трещины) от размера, определенного в соответствии с пп.5.1.3, 5.1.4, 5.2.4.3, до критического (рисунок 5.2.10).

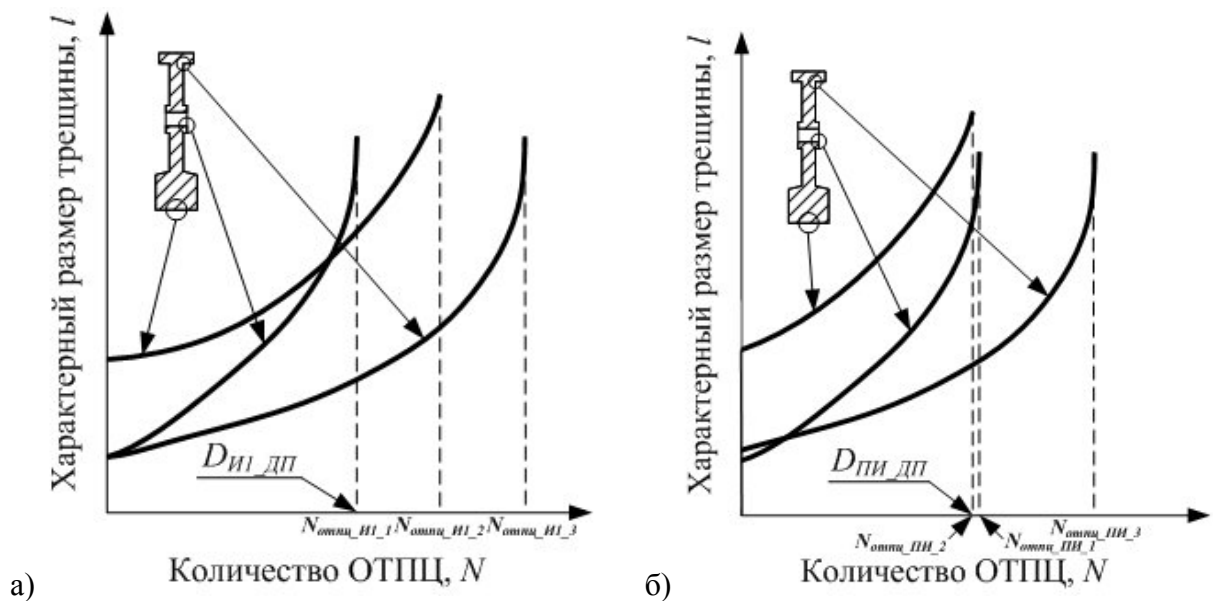


Рисунок 5.2.10 – Период роста трещины для каждой опасной зоны и долговечность ОД по детерминированному подходу при определении наработки до первой инспекции (а) и периодичности инспекций (б)

5.2.6 Долговечности ОД $D_{и1_дп}$ и $D_{пи_дп}$, полученные с использованием детерминированного подхода (рисунок 5.2.10), определяются по формуле

$$D_{и1_дп} = \min(N_{отпц_и1_i}),$$

$$D_{пи_дп} = \min(N_{отпц_пи_i}).$$

Примечание – Долговечность $D_{и1_дп}$, на основе которой будет определена наработка до первой инспекции, может отличаться от долговечности $D_{пи_дп}$, на основе которой будет определена периодичность инспекции.

5.2.7 Нарботка до первой инспекции $[N]_{и1_дп}$ и периодичность последующих

инспекций ОД $[N]_{\text{ПИ_ДП}}$ (рисунок 5.2.11), определяются по формулам

$$[N]_{\text{И1_ДП}} = 1/2 \cdot D_{\text{Д_И1_ДП}},$$

$$[N]_{\text{ПИ_ДП}} = 1/2 \cdot D_{\text{Д_ПИ_ДП}}.$$

Примечание – В некоторых случаях (пп.5.1.2.1 и 5.1.2.2) НР ОД может быть ограничен наработкой до первой инспекции.

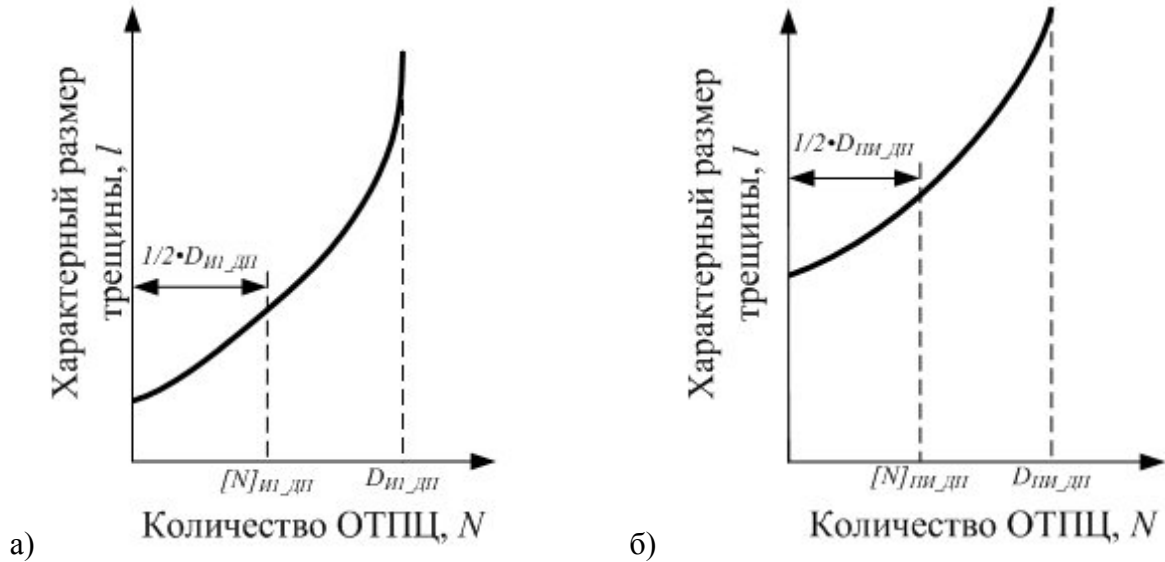


Рисунок 5.2.11 – Нарботка до первой инспекции (а) и периодичность инспекций (б) по детерминированному подходу

5.3 Определение долговечности, корректировка периодичности инспекций и НР ОД на основе вероятностного подхода

Долговечностью ОД на основе вероятностного подхода является количество ОТПЦ, при котором будет достигнута допустимая вероятность разрушения ОД [32].

5.3.1 Для расчетов вероятности разрушения ОД за ресурс, при определенной периодичности инспекций ОД, используются данные о:

- вероятностных кривых распределения дефектов в материале заготовки ОД (п.5.3.2);
- вероятностных кривых распределения дефектов, возникающих при механической обработке (п.5.3.3);
- КД СРТУ и, при необходимости, КД СРТ с выдержкой в цикле нагружения (п.5.2.3);
- исследовании НДС ОД (приложение Б);
- ОТПЦ (приложение Б);
- вероятностных кривых выявляемости дефектов для методов НК, применяемых при инспекциях на данном предприятии (п.А.3 приложения А);

- периодичность инспекций, определенная на основе детерминированного подхода (п.5.2.7).

Расчеты на основе вероятностного подхода должны проводиться для:

- дефектов в материале ОД, расположенных внутри и на поверхностях ОД;
- дефектов, возникающих при механической обработке, расположенных на поверхностях ОД.

Определение долговечности ОД с учетом:

- инкубационного периода допустимо при наличии статистически достоверных данных его (инкубационного периода) определения;
- величины размаха КИН ΔK_{th} , соответствующей порогу страгивания развития трещины как от циклических (рисунок 5.2.1a), так и от статических нагрузок, допустимо при наличии экспериментальных данных о величине ΔK_{th} , определенной при соответствующей температуре;
- эффекта влияния температуры на причину зарождения трещин в гранулируемых никелевых сплавах (от постороннего включения или поверхностной фасетки, границы зерна и т.д.) допустимо при наличии статистически достоверных данных, подтверждающих проявление указанного эффекта.

–

Примечание – Эффект влияния температуры заключается в том, что зарождение трещин от посторонних включений при снижении температуры перестает превалировать над другими причинами их зарождения (рисунок 5.3.1). При этом ниже определенной температуры разрушение материала от посторонних включений может не происходить.

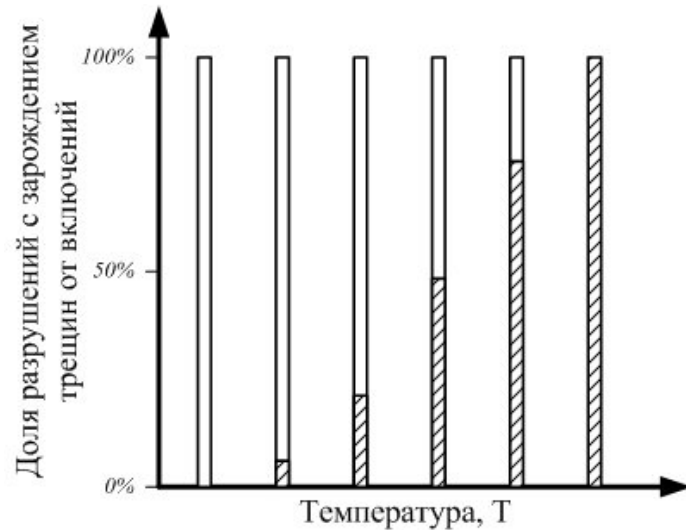


Рисунок 5.3.1 - Схематичное представление зависимости от температуры числа разрушений, причиной которых являются посторонние включения в материале (заштрихованная зона)

5.3.2 Определение вероятностных кривых распределения дефектов в материале ОД.

Вероятностные кривые распределения дефектов в материале могут быть получены при помощи специальных исследований, проводимых на данном предприятии-поставщике (п.5.3.2.1). При отсутствии данных о вероятности распределения дефектов в материале, полученных при специальных исследованиях для данного предприятия-поставщика, следует пользоваться рекомендациями п.5.3.2.2. Вероятностная кривая дефектности материала должна быть кумулятивной (т.е. содержать данные о количестве дефектов всех размеров, расположенных справа от выбранного на рисунке 5.3.2 характерного размера дефекта).

5.3.2.1 Для получения вероятностных характеристик дефектности материалов ОД (рисунок 5.3.2) можно использовать результаты томографии образцов или других методов исследований образцов, вырезанных из заготовок или готовых ОД.

На основе статистической обработки результатов исследований получают вероятностные кривые распределения дефектов (зависимость количества дефектов z в контрольном объеме материала V_M от характерного размера дефекта l). При статистической обработке необходимо получить плотность распределения характерного размера дефекта, например, с помощью непараметрического подхода «ядерной оценки плотности» [33], с использованием которой определяется вероятностная кривая распределения дефекта.

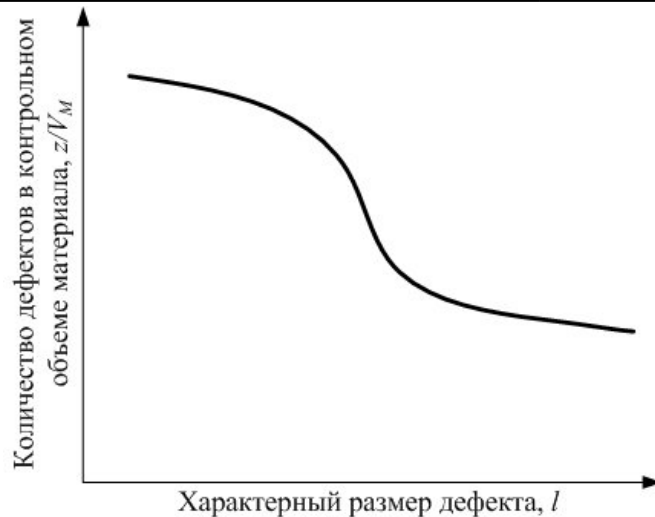


Рисунок 5.3.2 - Общий вид кривой вероятности распределения дефекта

5.3.2.2 В случае отсутствия данных о вероятности распределения дефектов для данного предприятия-поставщика, определение кривых вероятности распределения дефектов возможно (по согласованию с УО) на основе анализа данных от других предприятий-поставщиков. По согласованию с УО для дисков из титановых сплавов, полученных с применением тройного переплава или плавки с холодным подом, могут быть использованы кривые распределения дефектов, приведенные в [34].

Примечание – Предпочтительным является использованием вероятностных кривых, полученных на основе исследований, выполненных на данном предприятии-поставщике.

5.3.3 Определение вероятностных кривых распределения дефектов, возникающих при механической обработке ОД

Вероятностные кривые распределения дефектов, возникающих при механической обработке, могут быть получены при помощи специальных исследований, проводимых на данном предприятии-изготовителе ОД или на ремонтном предприятии. При отсутствии данных о вероятности распределения дефектов от механической обработки, полученных при специальных исследованиях для данного предприятия-изготовителя ОД, по согласованию с УО для поверхностей эксцентрично расположенных отверстий могут быть использованы кривые распределения дефектов, приведенные в [35].

Для разных зон одной ОД кривые вероятности распределения дефектов, возникающих при механической обработке, могут быть различными в зависимости от вида режущего инструмента, режимов резанья и т.д.

5.3.4 Определение долговечности ОД $D_{ВП}$ на основе вероятностного подхода

5.3.4.1 Перед выполнением расчетов геометрическую модель ОД разделяют на области (зоны), размеры которых определяются по следующим параметрам:

- одинаковая периодичность инспекций и кривые вероятности выявляемости дефектов средствами НК;
- близкие КД СРТУ;
- близкие напряжения и температуры.

Соблюдение указанных условий обеспечивает одинаковое время развития трещины при любом её расположении в пределах данной зоны (с учетом требований по ориентированию дефекта в ОД, п.5.2.4.3). В приповерхностных зонах ОД начальный дефект необходимо располагать на поверхности.

5.3.4.1.1 Для внутренних трещин рекомендуется использовать КД СРТУ, определенные в вакууме, так как, в соответствии с исследованиями [36-38,43,44], СРТУ в вакууме может быть существенно ниже, чем СРТУ на воздухе, что позволяет увеличить долговечность ОД $D_{ВП}$ на основе вероятностного подхода.

В случае, если внутренняя трещина в ходе своего роста становится поверхностной, то после этого перехода развитие трещины необходимо определять с использованием КД СРТУ, определенных на воздухе.

Примечание – При отсутствии данных о КД СРТУ, полученных в вакууме, развитие внутренних трещин, можно определять с использованием КД СРТУ, полученных на воздухе.

5.3.4.2 Для каждой i -ой зоны определяется зависимость вероятности разрушения P_i от количества ОТПЦ N

$$P_i(N) = f(P_{п_i}, P_{в_i}, N),$$

где $P_{п_i}$ – вероятность появления (попадания) дефекта в i -ой зоне (п.5.3.4.2.1); $P_{в_i}$ – вероятность обнаружения дефекта при ремонте или инспекции ОД в i -ой зоне (п.5.3.4.2.2).

Примечание – Определяющим фактором, влияющим на вероятность разрушения зоны, является вероятность появления (попадания) дефекта в зону. Наличие кривых вероятности распределения дефектов в материале заготовки и(или) вероятностных кривых распределения дефектов, возникающих при механической обработке, является обязательным условием определения долговечности и НР по данным методическим рекомендациям.

5.3.4.2.1 Определение вероятности разрушения зоны от вероятности появления (попадания) дефекта в данной зоне, при отсутствии других факторов, т.е.

$$P_i(N) = f(P_{n_i}, N).$$

Для каждой i -ой зоны определяется зависимость $l_{H_i}(N)$, где N - число ОТПЦ, за которое дефект размером $l_{H1_i}, l_{H2_i}, \dots, l_{Hn_i}$ ($l_{H1_i} < l_{H2_i} < \dots < l_{Hn_i}$) развивается до критического размера $l_{кр_i}$ (рисунок 5.3.3). Величина l_{H_i} для каждой i -ой зоны принимается в пределах $l_{min_i} < l_{H_i} < l_{кр_i}$, где величина l_{min_i} для каждой i -ой зоны определяется по кривой вероятности распределения дефектов в материале (рисунок 5.3.4).

Вероятность появления (попадания) дефекта в зоне $P_{n_i}(l)$ зависит от характерного размера дефекта l и объема зоны $V_{з_i}$ и определяется с использованием кривой вероятности распределения дефектов в материале ОД (п.5.3.2) по формуле

$$P_{n_i}(l) = z(l) \cdot \frac{V_{з_i}}{V_M},$$

где $z(l) \cdot [1/V_M]$ определяется по графику (рисунок 5.3.4) в зависимости от характерного размера дефекта l .

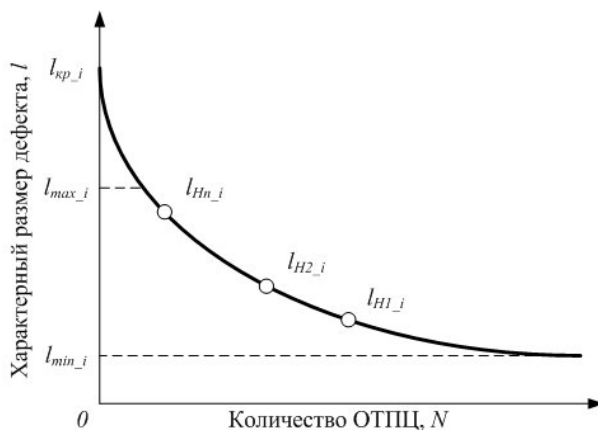


Рисунок 5.3.3 - Зависимость $l_{H_i}(N)$ для каждой i -ой зоны

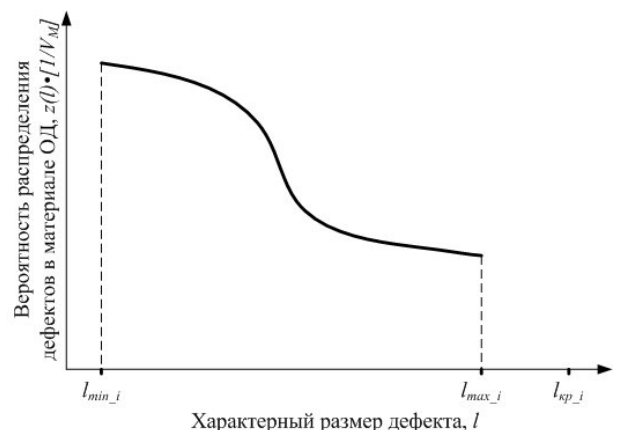


Рисунок 5.3.4 - Кривая вероятности распределения дефектов в материале ОД (зоне ОД)

Зависимость вероятности разрушения i -ой зоны от количества ОТПЦ $P_i(N)$ при влиянии только вероятности появления дефекта в зоне P_{n_i} определяется [39] по формуле

$$P_i(N) = 1 - \exp(-P_{n_i} [l_{H_i}(N)]), \text{ при } l_{кр_i} < l_{H_i}(N) < l_{min_i}, \quad (5.3.1)$$

где $l_{H_i}(N)$ зависимость, представленная на рисунке 5.3.3.

Примечания

- 1 Если критический размер трещины $l_{кр_i}$ больше максимального размера дефекта l_{max_i} в заданной для данной зоны кривой вероятности распределения дефектов (рисунок 5.3.4), то уравнение (5.3.1) будет иметь следующий вид

$$P_i(N) = 1 - \exp(-P_{п_i}[l_{Н_i}(N)]), \text{ при } l_{max_i} < l_{Н_i}(N) < l_{min_i}.$$

- 2 Вероятность разрушения зоны от вероятности появления (попадания) дефекта в данной зоне при использовании кривой вероятности распределения дефектов, возникающих при механической обработке, определяется по такому же алгоритму за исключением того, что расчет проводится не для объема зоны, а для площади зоны, выходящей на поверхность ОД.

5.3.4.2.2 Определение влияния на вероятность разрушения зоны вероятности обнаружения дефекта при ремонте или инспекции ОД, т.е.

$$P_i(N) = f(P_{п_i}, P_{в_i}, N).$$

Вероятность обнаружения дефекта при ремонте или инспекции ОД $P_{в_i}$ зависит от характерного размера дефекта и применяемого метода НК при ремонте или инспекции и задается в виде кривой вероятности выявляемости дефектов (п.А.3 приложения А) для применяемого метода НК.

Зависимость вероятности разрушения i -ой зоны от количества ОТПЦ $P_i(N)$ определяется по формуле

$$P_i(N) = \begin{cases} 1 - \exp(-P_{п_i}[l_{Н_i}(N)]), & \text{при } l_{кр_i} < l_{Н_i}(N) < l([N]_{ПИ_ВП}), \\ \{1 - \exp(-P_{п_i}[l_{Н_i}(N)])\} \cdot \{(1 - P_{в_i}[l_{Н_i}(N)])\}, & \text{при } l([N]_{ПИ_ВП}) \leq l_{Н_i}(N) < l_{min_i}' \end{cases}$$

где $[N]_{ПИ_ВП}$ - периодичность инспекций, скорректированная с использованием вероятностного подхода (п.5.3.6).

5.3.4.3 Определение вероятности разрушения ОД и соответствующее данной вероятности количество ОТПЦ

Вероятность разрушения ОД определяется как вероятность объединения событий, заключенных в разрушении из-за дефекта в любой из зон ОД, т.е.

$$P_{ОД}(N) = \bigcup P_i(N). \quad (5.3.2)$$

Так как вероятности попадания дефектов в зоны не зависимы, вероятность разрушения ОД определяется [39] как

$$P_{ОД}(N) \cong 1 - \prod (1 - P_i(N)).$$

При отсутствии учета влияния инспекций вероятность разрушения ОД определяется

по формуле

$$P_{\text{ОД}}(N) = 1 - \prod \exp(-P_{n_i}(N)).$$

По результатам расчета строится график зависимости вероятности разрушения от количества ОТПЦ (рисунок 5.3.5).

Примечание – При определении вероятности разрушения ОД от нескольких типов дефектов (дефекты материала, дефекты изготовления и т.д.) вычисляются зависимости вероятности разрушения ОД от количества ОТПЦ для каждого типа дефекта согласно (5.3.2) и п.п.5.3.4.1-5.3.4.3. Общая вероятность разрушения ОД от всех типов дефектов определяется

$$P_{\text{ОД}}(N) = 1 - \prod \exp(-P_{j\text{-ый тип дефекта}}(N)),$$

где $P_{j\text{-ый тип дефекта}}(N)$ – зависимость вероятности разрушения ОД от количества ОТПЦ для j -го типа дефекта.

5.3.4.4 Долговечностью $D_{\text{ВП}}$ (рисунок 5.3.5) является количество ОТПЦ, соответствующее допустимой вероятности разрушения $[P] \leq 10^{-4}$ за НР [32].

Примечание – Величина долговечности, определенная на основе вероятностного подхода, может быть изменена (скорректирована) за счет изменения периодичности инспекций ОД.

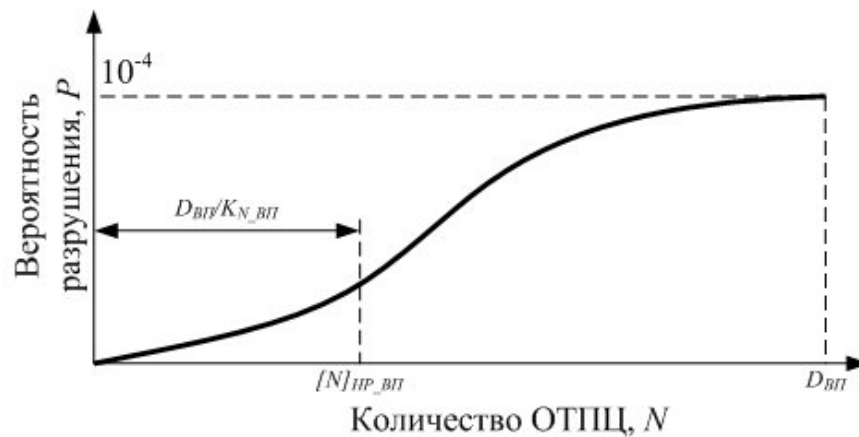


Рисунок 5.3.5 - Зависимость вероятности разрушения ОД от количества ОТПЦ

5.3.5 НР $[N]_{\text{НР_ВП}}$ для ОД (рисунок 5.3.5), полученный на основе вероятностного подхода, определяется как

$$[N]_{\text{НР_ВП}} = \frac{D_{\text{ВП}}}{K_{N_ВП}}.$$

Величина запаса $K_{N_ВП}=1\dots3$, зависит от полноты и достоверности учета факторов, влияющих на долговечность (например, рассеяния свойств СРТУ и др.). При отсутствии

анализа и доказательств полноты и достоверности учета факторов, влияющих на долговечность, величина запаса $K_{N_ВП} = 3$.

Примечание – Величина НР, определенная на основе вероятностного подхода, может быть скорректирована за счет изменения периодичности инспекций ОД.

5.3.6 Корректировка периодичности инспекций ОД $[N]_{ПИ_ДП}$ на основе вероятностного подхода

Наличие инспекций ОД в эксплуатации позволяет снизить величину вероятности разрушения (рисунок 5.3.6) и, как следствие, увеличить долговечность и НР ОД. Периодичность инспекций ОД $[N]_{ПИ_ДП}$, определенная по детерминированному подходу, может быть скорректирована в меньшую сторону исходя из экономических соображений или с целью увеличения долговечности, определяемой по вероятностному подходу:

$$[N]_{ПИ_ВП} \leq [N]_{ПИ_ДП}$$

Примечание - Так же может быть скорректирована наработка до первой инспекции.

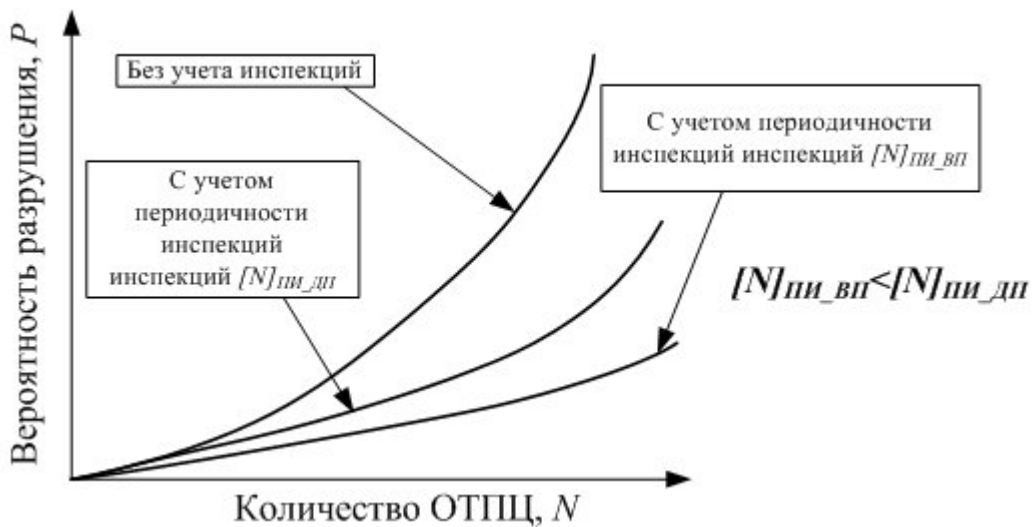


Рисунок 5.3.6 - Влияние периодичности инспекций на зависимость вероятности разрушения ОД от количества ОТПЦ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Назначение размеров дефектов для ОД на основе анализа применяемых методов НК и требования к кривым вероятности выявления дефектов

Методы НК применяются для обнаружения, классификации и измерения размеров дефектов, возникающих в ОД на этапах получения заготовки ОД, изготовления ОД, сборки изделия и эксплуатации (в том числе ремонте). В силу ограниченной чувствительности методов НК выявляемость того или иного размера дефекта носит вероятностный характер. Для определения эффективности применяемых методов НК проводятся работы по построению вероятностных кривых выявления дефектов. Полученные вероятностные кривые применяются при определении долговечности ОД по:

- детерминированному подходу для задания начальных размеров дефектов (или трещин), не выявляемых с заданной вероятностью каждым применяемым методом НК;
- вероятностному подходу для задания характеристик выявления дефектов каждым применяемым методом НК в процессе инспекций и ремонтов.

А.1 Анализ документов, регламентирующих НК ОД и ее заготовки. Работа выполняется на основе документов, содержащих данные о:

- применяемых методах НК (рентгеновский, вихретоковый, капиллярный, ультразвуковой, визуально-оптический и т.д.);
- технических характеристик используемых средств (контрольно-измерительное оборудование, материалы и т.д.);
- порядке проведения контроля и контролируемых зонах в ОД (информация, содержащаяся в технологической карте).

Документы, содержащие необходимые исходные данные, должны составляться с учетом требований [40].

А.1.1 Выбор тех или иных методов НК должен зависеть не только от геометрии контролируемой зоны ОД, но и от уровня и знака остаточных напряжений, полученных в процессе изготовления и эксплуатации ОД. Требования к выбору методов НК и методик контроля приведены в [40].

А.1.2 Заготовка ОД должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить НК всего объема материала заготовки внутри контура готовой ОД [40].

А.2 Построение обобщающей диаграммы НК

По результатам анализа возможностей используемых средств, методов НК и технологии проведения контроля строится обобщающая диаграмма НК (рисунок А.1), на которой для заготовки ОД и готовой ОД (для разных этапов жизненного цикла) показываются контролируемые зоны ОД, с указанием используемых для них методов НК. Метод построения обобщающей диаграммы НК для дисков приведен в [29]. Для других ОД метод построения обобщающей диаграммы НК должен быть согласован с УО.



Рисунок А.1 – Пример обобщающей диаграммы НК диска с зонами контроля

А.3 Определение вероятностных кривых выявляемости дефектов для контролируемых зон ОД при использовании различных методов НК

Вероятностные кривые выявляемости дефектов могут быть получены при помощи специальных испытаний, проводимых на данном предприятии (п.А.3.1). При отсутствии возможности проведения специальных испытаний по построению кривых вероятности выявляемости дефектов (например, для этапа проектирования) следует пользоваться рекомендациями п.А.3.2.

А.3.1 Кривые вероятности выявляемости дефектов (рисунок А.2) для различных зон ОД и методов НК строятся по результатам специальных исследований (испытаний) [40], которые проводятся с использованием достаточного для получения статистических оценок количества образцов, моделей, натуральных деталей с дефектами или трещинами в диапазоне от заведомо не выявляемых до выявляемых всегда. Специальные испытания проводятся на оборудовании предприятия специалистами этого предприятия, осуществляющих контроль заготовки и готовой ОД при изготовлении, инспекциях и ремонтах. По результатам этих исследований получают вероятностные кривые выявляемости дефектов с определенной

величиной доверительной вероятности [41,42] для:

- каждого метода НК;
- каждого этапа жизненного цикла ОД;
- каждой контролируемой зоны и поверхности ОД.

Примечание – При построении вероятностных кривых выявляемости дефектов необходимо учитывать влияние остаточных сжимающих напряжений в зонах ОД.

А.3.2 В случае отсутствия кривых вероятности выявляемости дефектов, например, на этапе проектирования ОД могут быть использованы кривые, полученные для изделий-прототипов. При внесении существенных конструктивных изменений в ОД, применении другого материала (выполненного на той же основе и по той же технологии), модернизации средств и методов НК для оценки ресурсов по КБРТ разрабатываемой ОД необходимо провести корректировку указанных вероятностных кривых выявляемости дефектов и согласовывать полученные кривые с УО.

Примечание – При установлении ресурсов ОД работы по КБРТ должны быть выполнены с использованием кривых, определенных по п.А.3.1.

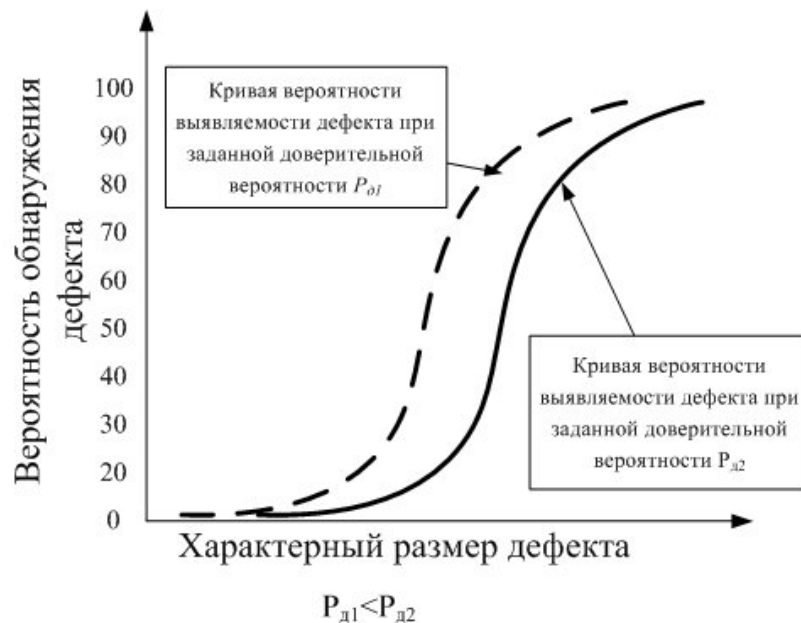


Рисунок А.2 – Общий вид кривой вероятности выявляемости дефектов

А.3.3 Кривые вероятности выявляемости дефектов для ручных и полуавтоматизированных методов НК строятся с доверительной вероятностью 95%, для автоматизированных методов НК - с доверительной вероятностью 50%. Применение кривых для ручных и полуавтоматизированных методов НК, построенных с уровнем

доверительной вероятности 50%, возможно после предоставления обоснования.

А.4 Назначение для каждой зоны (поверхности) ОД размеров начальных дефектов, не выявляемых с заданной вероятностью применяемыми методами НК

Для каждой зоны (поверхности) обобщающей диаграммы НК ОД (рисунок А.1), определяются размеры дефектов в соответствии с п.п.А.4.1 и А.4.2.

А.4.1 На каждом этапе жизненного цикла ОД для контролируемых методами НК зон размер дефекта принимается на основе вероятностных кривых выявляемости дефектов (п.А.3). Размер дефекта назначается с вероятностью обнаружения не ниже 90% [40].

А.4.2 Для неконтролируемых в эксплуатации зон ОД размер дефекта принимается на основе данных НК заготовки ОД (п.А.1.2). НР ОД определяется в соответствии п.А.1.2.1 данных методических рекомендаций.

Примечание – Наличие зон ОД, не контролируемых на всех этапах жизненного цикла ОД, должно быть отмечено на обобщающей диаграмме НК и в таблице А.1.

А.4.3 На основе работ, проведенных в данном приложении, заполняется таблица А.1, содержащая данные об используемых методах НК, применяемых при контроле конкретной ОД.

Таблица А.1 -Данные о начальных дефектах в ОД, не выявляемых с заданной вероятностью методами НК

Наименование ОД (номер чертежа)							
№ зоны контроля	Линейные размеры дефектов		Метод НК	Вероятность обнаружения/ Доверительная вероятность, %/%	Этап жизненного цикла ОД	Тип обнаруживаемого дефекта	Примечание
	Длина, мм	Глубина, мм					

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Определение параметров НДС и циклической повреждаемости в наиболее нагруженных зонах ОД

Б.1 Для расчетов НДС ОД используются данные о:

- механических свойствах материала ОД (п.Б.2);
- геометрии ОД;
- тепловом состоянии ОД (стационарном и нестационарном);
- статических и динамических нагрузках;
- ОТПЦ (п.Б.3);
- граничных условиях (учет взаимодействия с соседними деталями);
- особенностях технологии изготовления и сборки ОД.

Б.2 Основные требования к материалам, из которых могут изготавливаться ОД, даны в НД. Для проведения расчетов на прочность должны быть определены следующие физико-механические характеристики материала ОД:

- плотность ρ ;
- коэффициент Пуассона ν ;
- коэффициент теплового расширения $\alpha(T)$;
- модуль упругости $E(T)$;
- предел текучести $\sigma_{0,2}(T)$;
- предел прочности $\sigma_B(T)$;
- относительное сужение $\psi(T)$;
- кривые длительной прочности $\sigma_{dl}=f(\tau, T)$;
- предел выносливости при МнЦУ;
- зависимости МЦУ $N=f(\epsilon, T)$ при жестком цикле нагружения и т.д.

Используемые для оценки НДС данные по физико-механическим свойствам должны быть получены на основе исследований образцов, вырезанных из заготовок ОД, и статистической обработки результатов испытаний в соответствии с требованиями НД.

Б.3 ОТПЦ (рисунок Б.1) формируется в соответствии с требованиями НД (на основе полетных циклов, содержащихся в ТЗ на двигатель или по результатам уточнения полетных циклов в процессе эксплуатации) и должен содержать данные о:

- продолжительности ОТПЦ;
- видах и количестве за один ОТПЦ элементарных циклов нагружения (N_1, N_2, N_3, \dots);

- возможной продолжительности переходных процессов и выдержки в каждом элементарном цикле ($\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$).

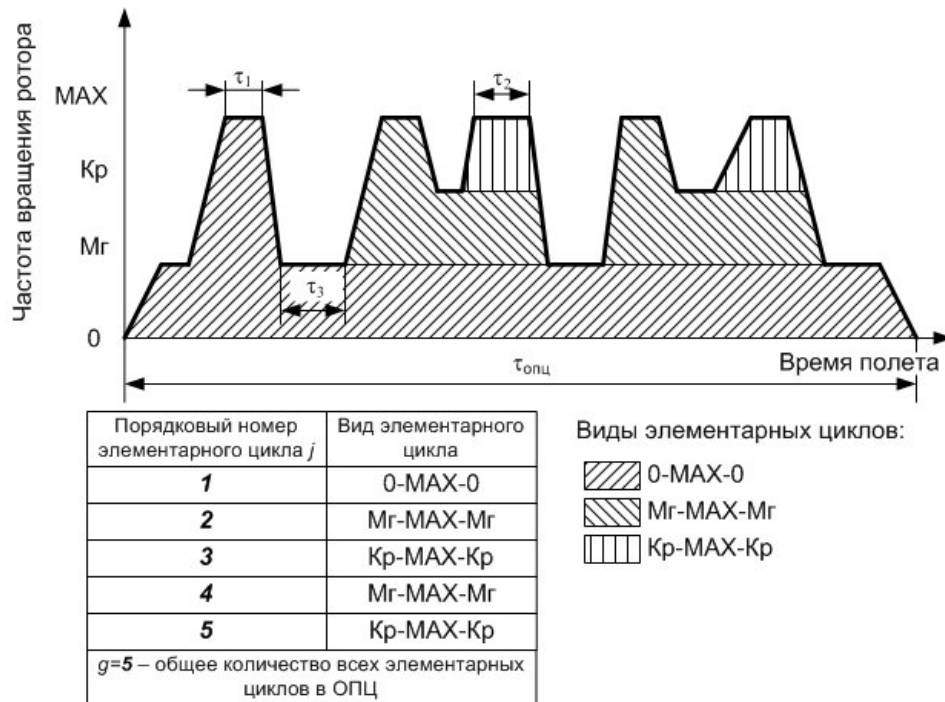


Рисунок Б.1 - Схематичный вид ОТПЦ

Б.4 Объем расчетно-экспериментальных исследований НДС ОД, необходимых для определения наиболее нагруженных зон ОД.

Для определения наиболее нагруженных зон ОД необходимо выполнение следующих видов расчетно-экспериментальных работ:

- определение статического НДС ОД на всех стационарных (установившихся по тепловому состоянию) режимах работы;
- определение статического НДС ОД на нестационарных (неустановившихся по тепловому состоянию) режимах работы и с учетом зависимости теплового состояния от продолжительности переходных процессов и выдержки в каждом элементарном цикле (п.Б.3).

Б.5 Определение наиболее опасных (с точки зрения циклической долговечности) зон ОД.

Наиболее опасные с точки зрения циклической долговечности зоны ОД определяются по минимальным значениям запасов прочности, рассчитанным на основе данных по свойствам материала ОД (п.Б.2) и данных по НДС ОД (п.Б.4). В данном случае целью определения запасов является не нормирование прочности ОД, а получение

сравнительных показателей циклической нагруженности зон ОД.

Б.5.1 Для ОД, циклическая долговечность которых определяется МЦУ, запасы прочности каждой зоны ОД рассчитываются по формуле:

$$K_N = \frac{1}{\Pi_\Sigma},$$

где Π_Σ - суммарная повреждаемость зоны ОД, определенная за ресурс

$$\Pi_\Sigma = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (r_j \cdot \Pi_j),$$

где n - количество ОТПЦ, реализуемых за ресурс; r_j - количество j -го вида элементарных циклов нагружения в одном ОТПЦ; m - количество видов элементарных циклов, в одном ОТПЦ (N_1, N_2, N_3, \dots).

Величина единичной повреждаемости Π_{ij} для j -го вида элементарного цикла нагружения определяется по формуле

$$\Pi_j = \frac{1}{N_j},$$

где N_j - число элементарных циклов j -го вида до разрушения ОД по данной зоне, определенное для размаха деформаций в данном виде элементарного цикла по экспериментальным данным вида $N=f(\varepsilon, T)$ или по модифицированному уравнению Мэнсона [1]

$$\Delta\varepsilon = \left[\ln \frac{1}{1 - \psi(\tau, T)} \right]^{0.6} N^{-0.6} + \frac{3.5 \cdot [\sigma_{дл}(\tau, T) - \sigma_m]}{E(T)} N^{-0.12},$$

$\Delta\varepsilon$ - интенсивность размахов деформаций в рассчитываемой зоне ОД; σ_m - среднее напряжение цикла; $E(T)$ - модуль упругости при максимальной температуре цикла в рассчитываемой зоне ОД; $\sigma_{дл}(\tau, T)$ - предел длительной прочности, соответствующий максимальной температуре и времени действия расчетного режима; $\psi(\tau, T)$ - коэффициент поперечного сужения материала, соответствующий максимальной температуре и зависящий от длительности нагружения t и максимальной температуре цикла T .

Б.5.2 На основе работ, проведенных в п.Б.5, определяются зоны ОД с наименьшими запасами по циклической долговечности при МЦУ.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Расчетное определение изменения формы фронта трещины, развивающейся в неоднородном поле напряжений

Для учёта изменения формы фронта трещины, развивающейся в неоднородном поле напряжений, при конечно-элементном моделировании может быть использована следующая последовательность действий:

- 1) Из множества точек (узловых точек КЭМ), расположенных на i -ом фронте трещины (рисунок В.1) выбираются точки (точки A_i, B_i, C_i, \dots на рисунке В.1) с минимальными и максимальными значениями размаха КИН для элементарного цикла нагружения, дающего самую высокую СРТУ, например, для элементарного цикла 0-МАХ-0 ($K_{0-МАХ-0 A}, K_{0-МАХ-0 B}, K_{0-МАХ-0 C}$).

Примечание – Геометрия начальной формы фронта трещины ($i = 1$) принимается на основе п.5.2.4.3 методических рекомендаций.

- 2) Из точек A_i, B_i, C_i, \dots расположенных на i -ом фронте трещины, выбирается точка с максимальным размахом КИН, а, следовательно, максимальной СРТУ. Для примера примем, что это точка B_i , СРТУ в которой обозначим $V_{0-МАХ-0 B_i}$.

Примечания

- 1 Скорости $V_{0-МАХ-0 A_i}, V_{0-МАХ-0 B_i}, V_{0-МАХ-0 C_i}$ определяются по формуле (5.2.1) методических рекомендаций за элементарный цикл 0-МАХ-0.
- 2 В качестве СРТУ в точке можно определить прирост трещины за ОТПЦ на основе п.5.2.5 методических рекомендаций.
- 3) Для выбранной точки (в примере на рисунке В.1 - точка В) из соображений удобства конечно-элементного моделирования выбирается прирост трещины J_{B_i} для формирования положения следующего фронта трещины ($i+1$).

Примечания

- 1 Величина прироста трещины должна выбираться, в том числе, с учётом рекомендаций п.5.2.4.5 и п.5.2.4.7 методических рекомендаций.
- 2 Величина прироста трещины в ходе итерационной процедуры может иметь постоянное значение или варьироваться, например, для уточнения мест перегиба зависимости размаха КИН от характерного размера трещины.
- 4) Для выбранной точки B_i определяется число циклов $N_{0-МАХ-0 B_i}$, необходимое для

роста трещины на величину Δl_{B_i} (условно принимая прирост размера трещины в каждом цикле нагружения постоянным) и достижения положения фронта $(i+1)$ в выбранной точке

$$N_{0-MAX-0 B_i} = \frac{\Delta l_{B_i}}{V_{0-MAX-0 B_i}}$$

- 5) Используя количество циклов $N_{0-MAX-0 B_i}$, прогнозируется прирост трещины и положение точек A_{i+1} и C_{i+1} фронта $(i+1)$

$$\Delta l_{A_i} = N_{0-MAX-0 B_i} \cdot V_{0-MAX-0 A_i}$$

$$\Delta l_{C_i} = N_{0-MAX-0 C_i} \cdot V_{0-MAX-0 C_i}$$

- 6) Пункты 2-6 повторяются для фронта $(i+1)$ пока не будет достигнут критический характерный размер трещины.

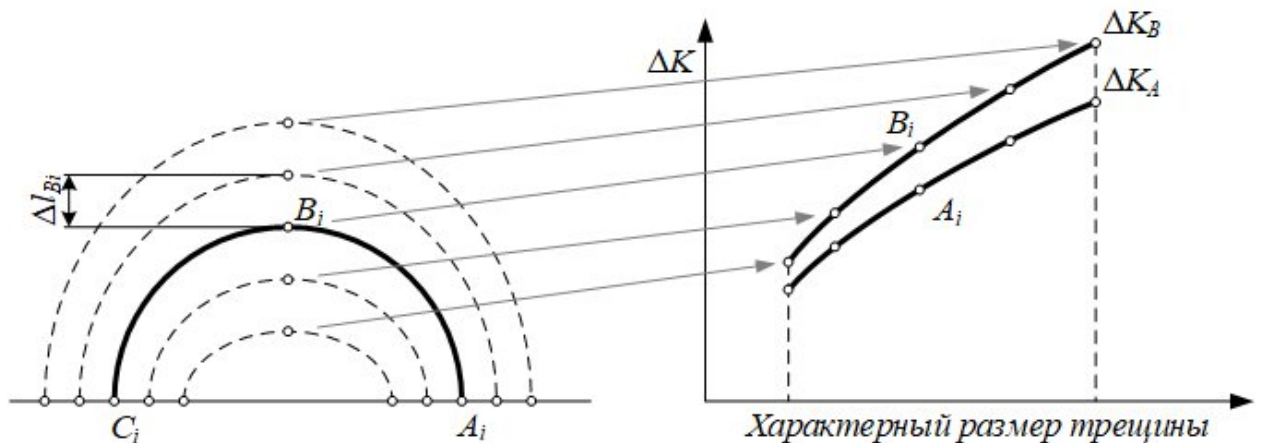


Рисунок В.1 – Пример расчетного определения изменения формы фронта трещины, развивающейся в неоднородном поле напряжений

В результате расчетного прогнозирования изменения формы фронта трещины определяются зависимости размаха КИН от характерного размера трещины (п.5.2.4.9 методических рекомендаций). На основе полученной зависимости определяется количество циклов развития трещины.

Применение других методов расчетного определения изменения формы фронта трещины необходимо согласовывать с Уполномоченным органом.