

# РАЗДЕЛ 19

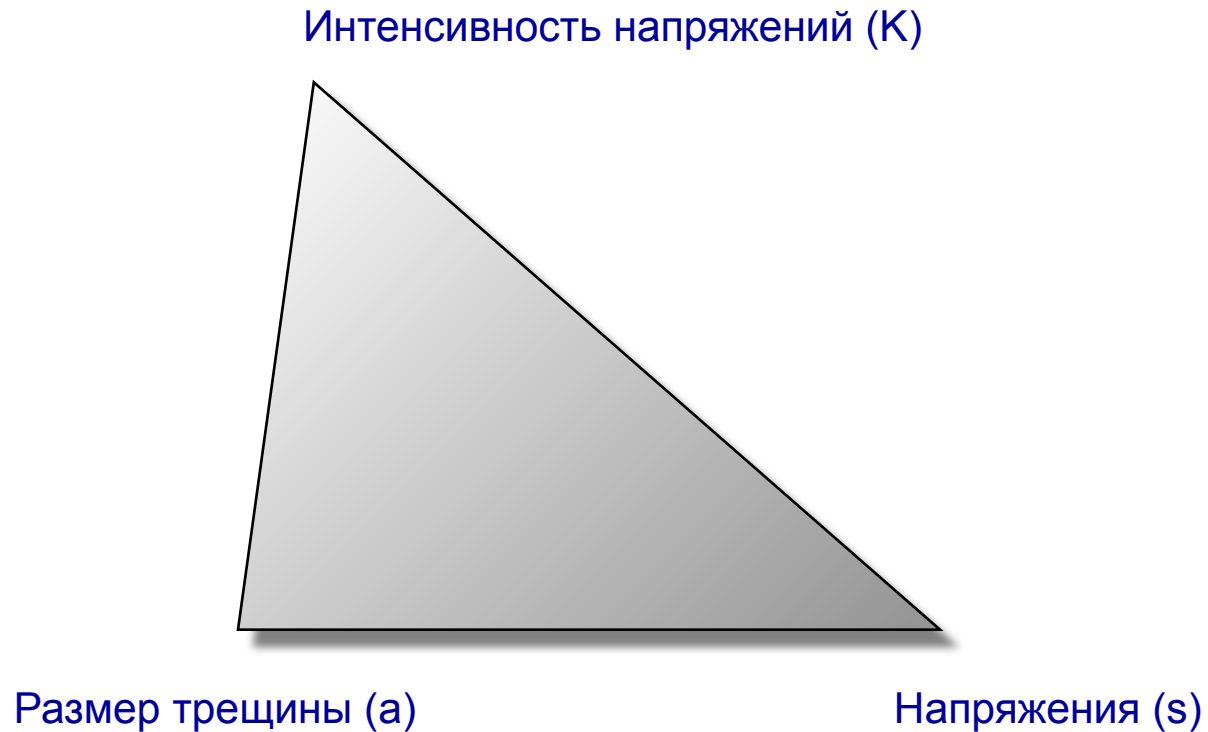
# РАСПРОСТРАНЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН



# РАСПРОСТРАНЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН (МЕТОДЫ ЛИНЕЙНО-УПРУГОЙ МЕХАНИКИ ТРЕЩИН)

- Какова долговечность после образования трещины?
- Как составить график ремонтно-восстановительных работ для конструкции с трещинами?
- Метод анализа роста трещин основан на принципах линейно-упругой механики разрушения (LEFM)
- Этот метод определяет зависимость КИН от размера трещины и долговечности
- Используется расчет цикл-за-циклом для определения долговечности
- Часто используется в аэрокосмической отрасли, автомобильной промышленности, при изготовлении газотурбинных установок и т.д.

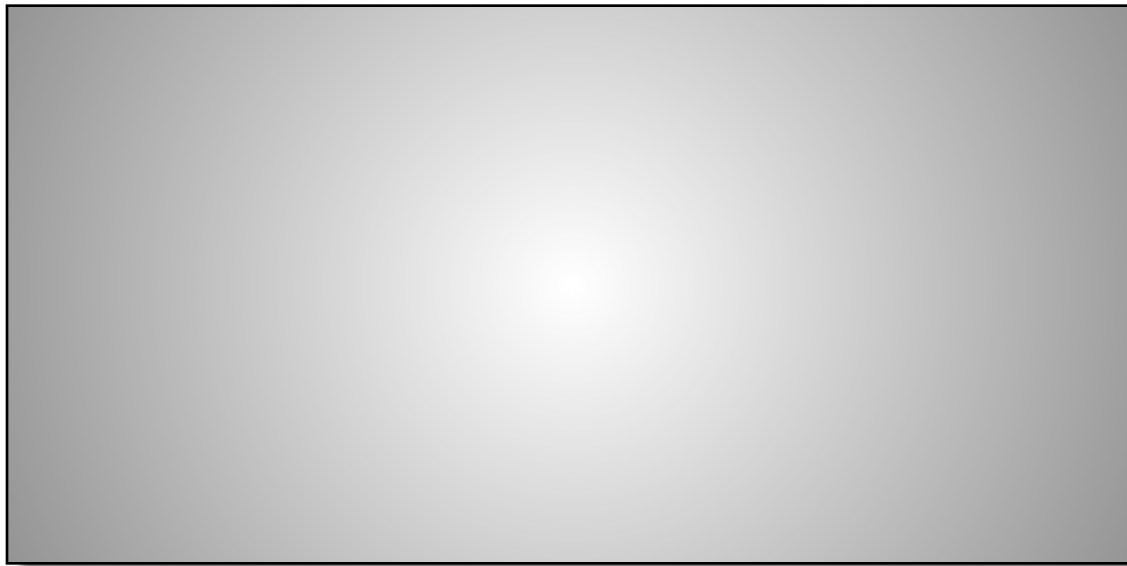
# ТРЕУГОЛЬНИК МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ



# ПРЯМОУГОЛЬНИК МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Конечный размер трещины ( $a_f$ )

Циклов до разрушения ( $N_f$ )

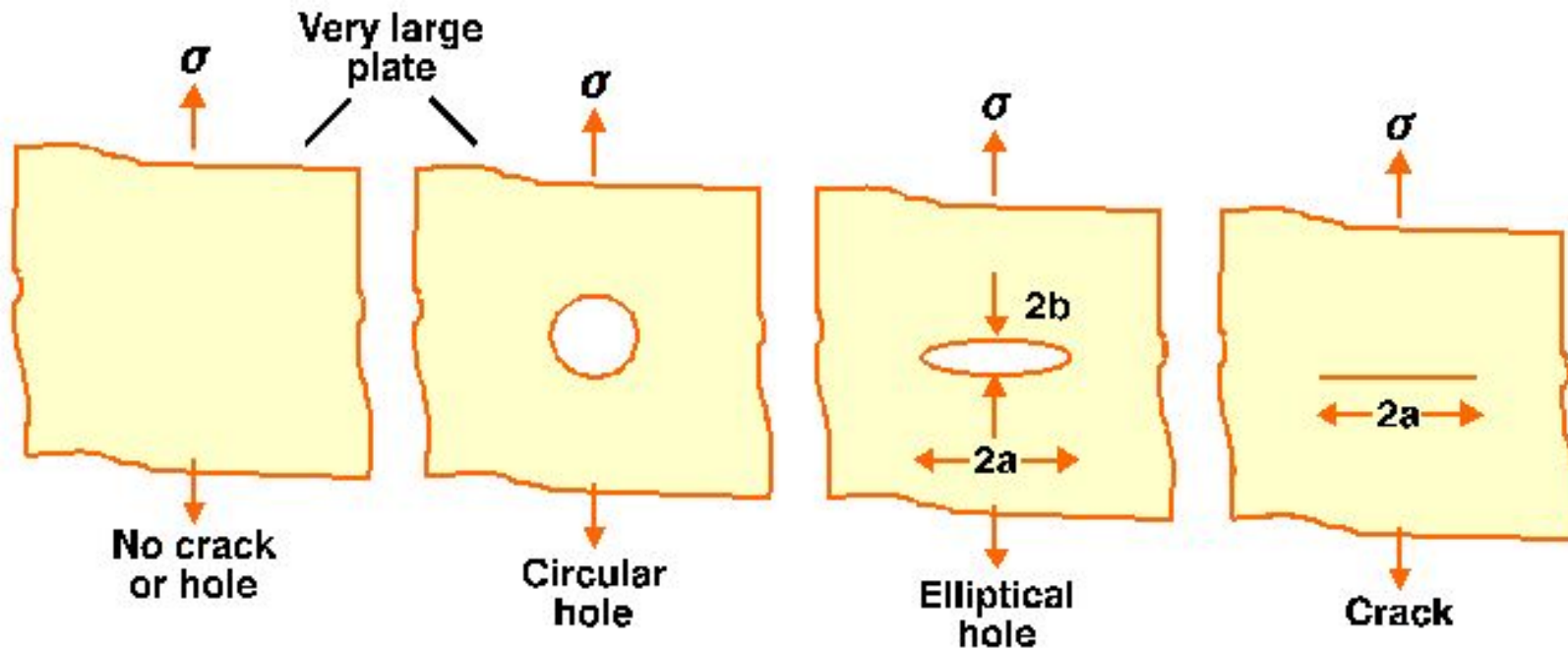


Начальный размер трещины ( $a_i$ )

Размах напряжений ( $\Delta S$ )

# КОЭФФИЦИЕНТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

Трещина – это концентратор напряжений и деформаций



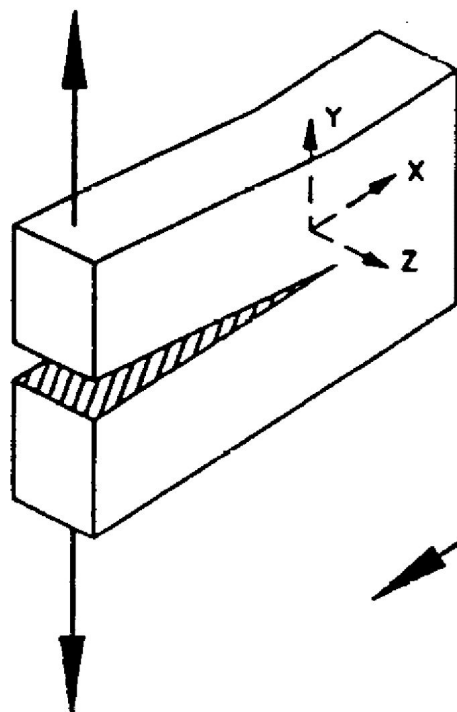
Концентрация упругих напряжений

$$\sigma_{\max} = K_t \sigma \longrightarrow K_t = 3$$

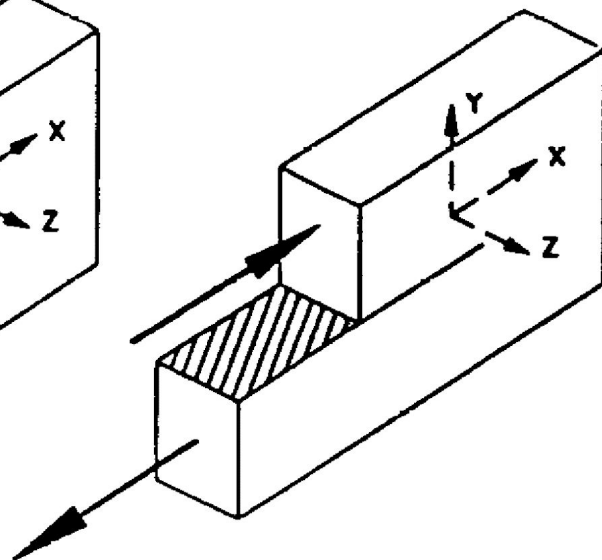
$$K_t = (1 + 2a/b)$$

$$b = 0 \longrightarrow K_t = \infty$$

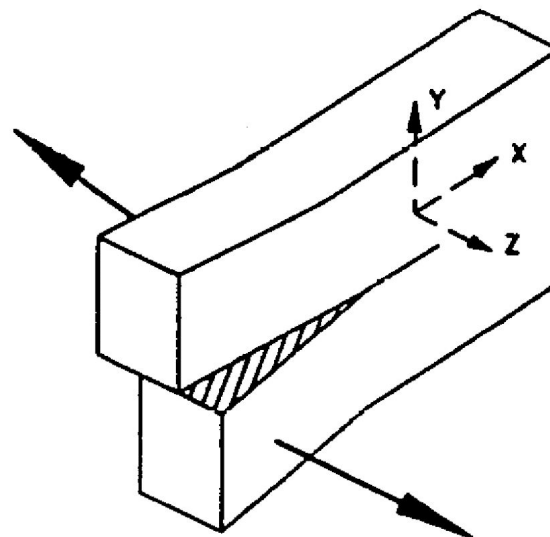
# ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРЕЩИН



Mode I



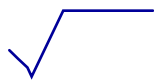
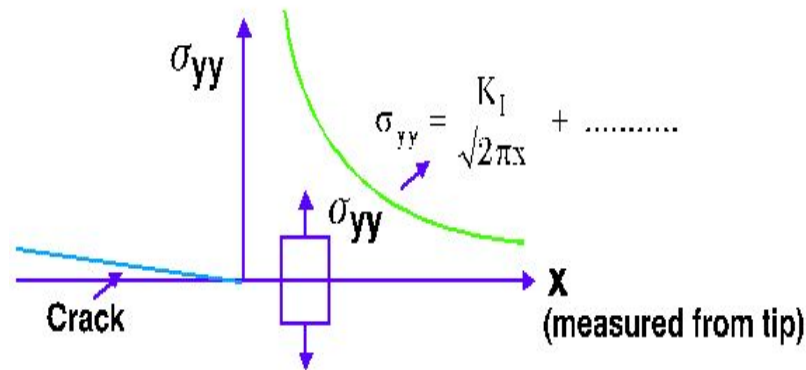
Mode II



Mode III

# МЕХАНИКА ТРЕЩИН

- Коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$



- Общий вид  $K$

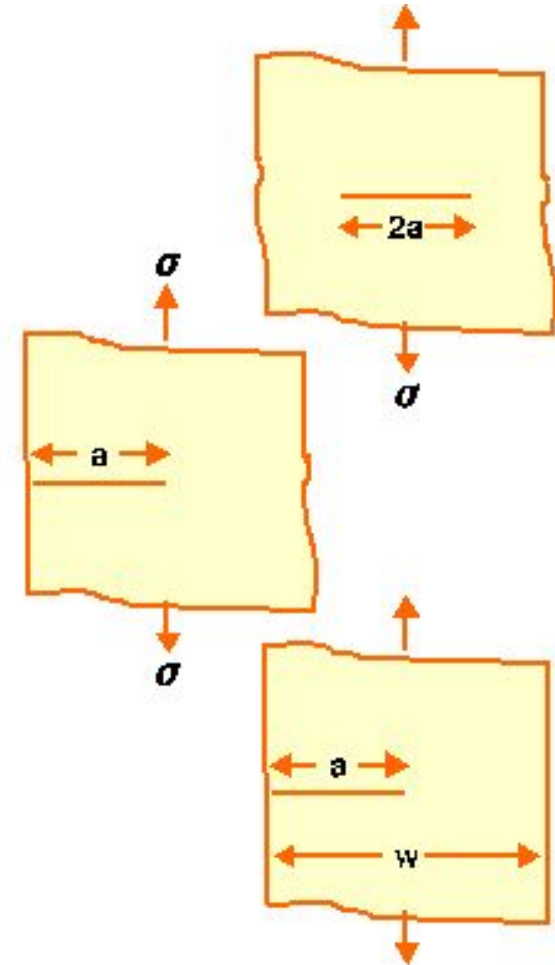
$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a}, \text{ где}$$

$Y = Y(a/w, B, \dots)$  – функция согласования



# ТИПИЧНЫЕ ФУНКЦИИ СОГЛАСОВАНИЯ

- Сквозная трещина в бесконечной пластине
  - $Y = 1$
- Краевая трещина в полубесконечной пластине
  - $Y = 1.12$
- Краевая трещина в пластине конечных размеров
  - $Y = 1.12 - 0.231(a/w) + 10.55(a/w)^2 - 21.72(a/w)^3 + 30.30(a/w)^4$

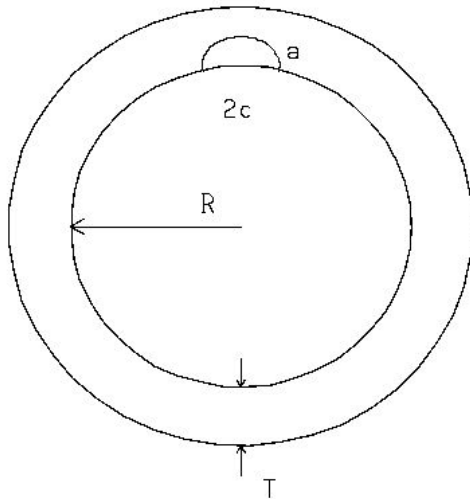


# ЛИНЕЙНО-УПРУГАЯ МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ

Fracture Mechanics K Solution Library

Specimen type : Internal surface crack under a hoop stress

Enter any changes (none) :



Dimensions

Radius,  $R$  (mm) : 10

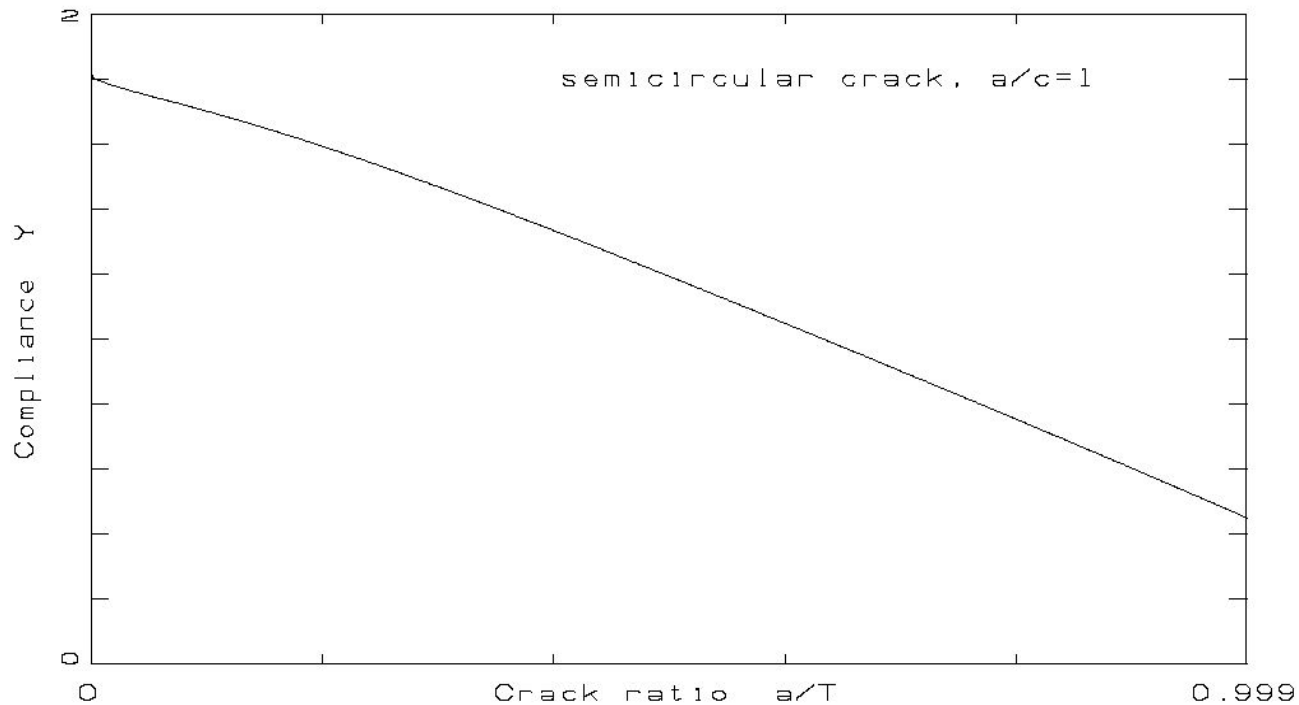
Thickness,  $T$  (mm) : 5

Aspect ratio,  $AC$  : 1

Par. angle,  $THETA$  : 90

# ЛИНЕЙНО-УПРУГАЯ МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ

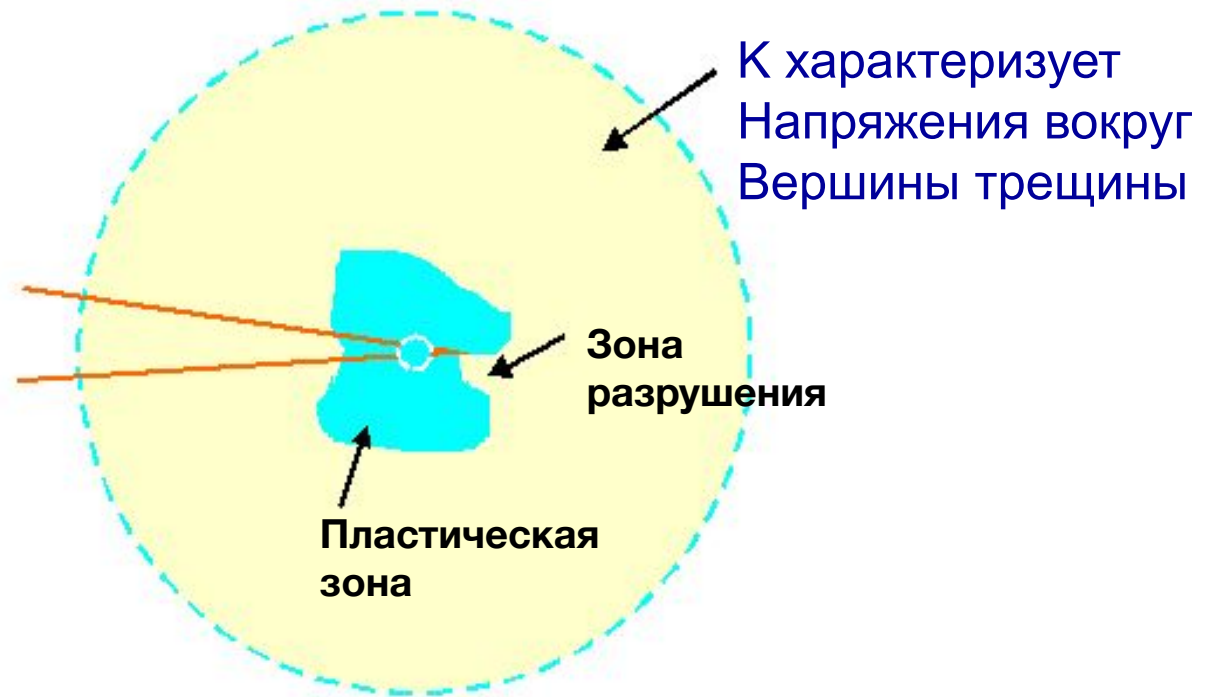
DISPLAY OF DTA.KSN



DTA

Y Function for an Internal Crack in a Tube

# К – КАК ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗРУШЕНИЯ



- В случае малой зоны пластичности  $K$  хорошо описывает напряженное состояние у вершины трещины
- Разрушение происходит при достижении  $K$  некоторого предельного значения  $K = K_{IC}$  (этот параметр характеризует вязкость разрушения материала)

# ДОПУЩЕНИЕ О МАЛОМАСШТАБНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

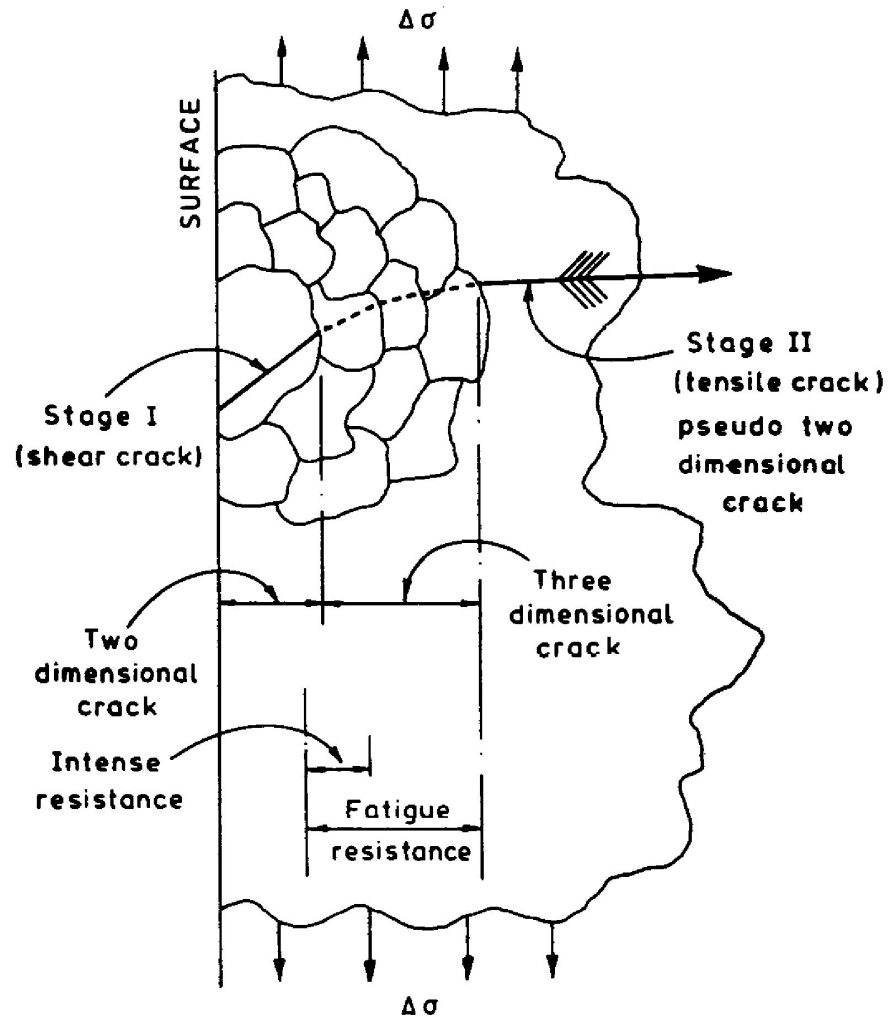
- Размер пластической зоны:

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K}{\sigma_y} \right)^2$$

- Для того, чтобы выводы линейно-упругой механики разрушения оставались справедливыми, размер пластической зоны должен быть достаточно малым по сравнению с длиной трещины и геометрическими размерами детали:

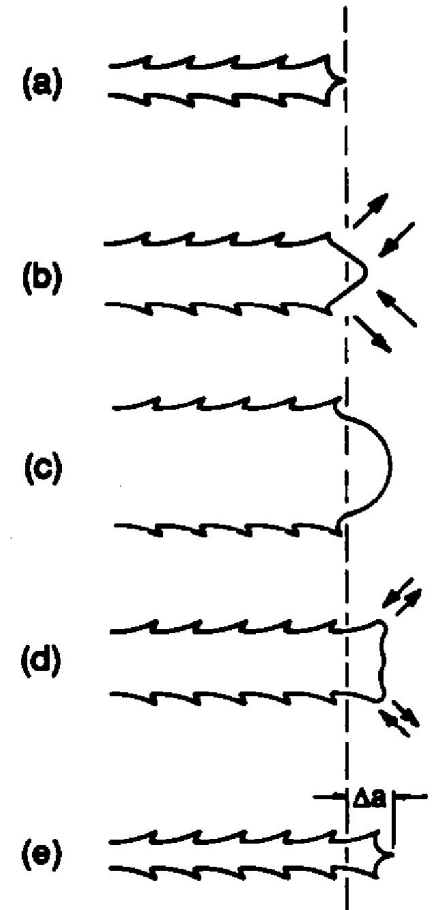
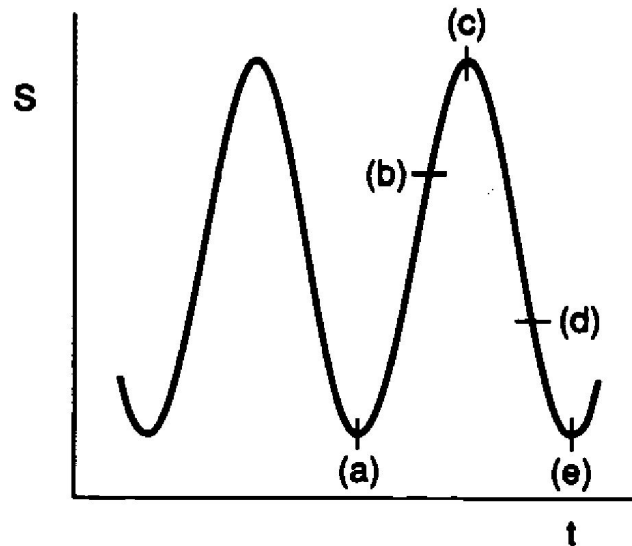
$$r_p \leq \frac{1}{25} (a, t, b, w, \dots)$$

# ЭТАПЫ РОСТА ТРЕЩИН

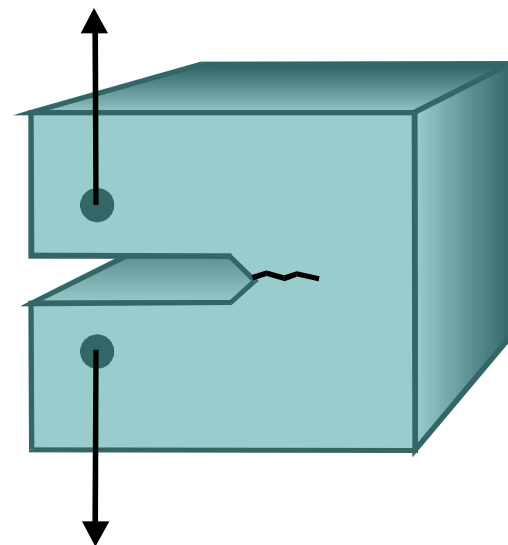
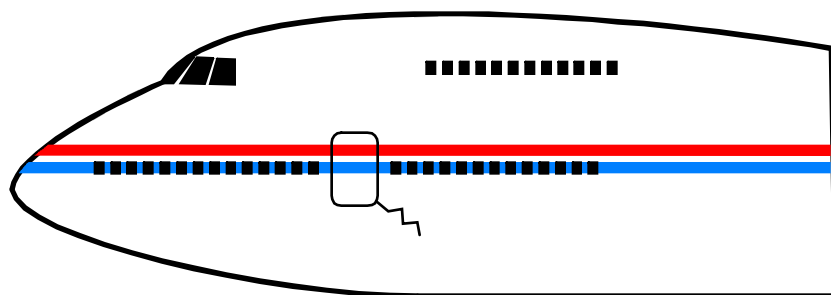


# МЕХАНИЗМ УСТАЛОСТНОГО РОСТА ТРЕЩИНЫ

- Циклические пластические деформации
- Коррозия



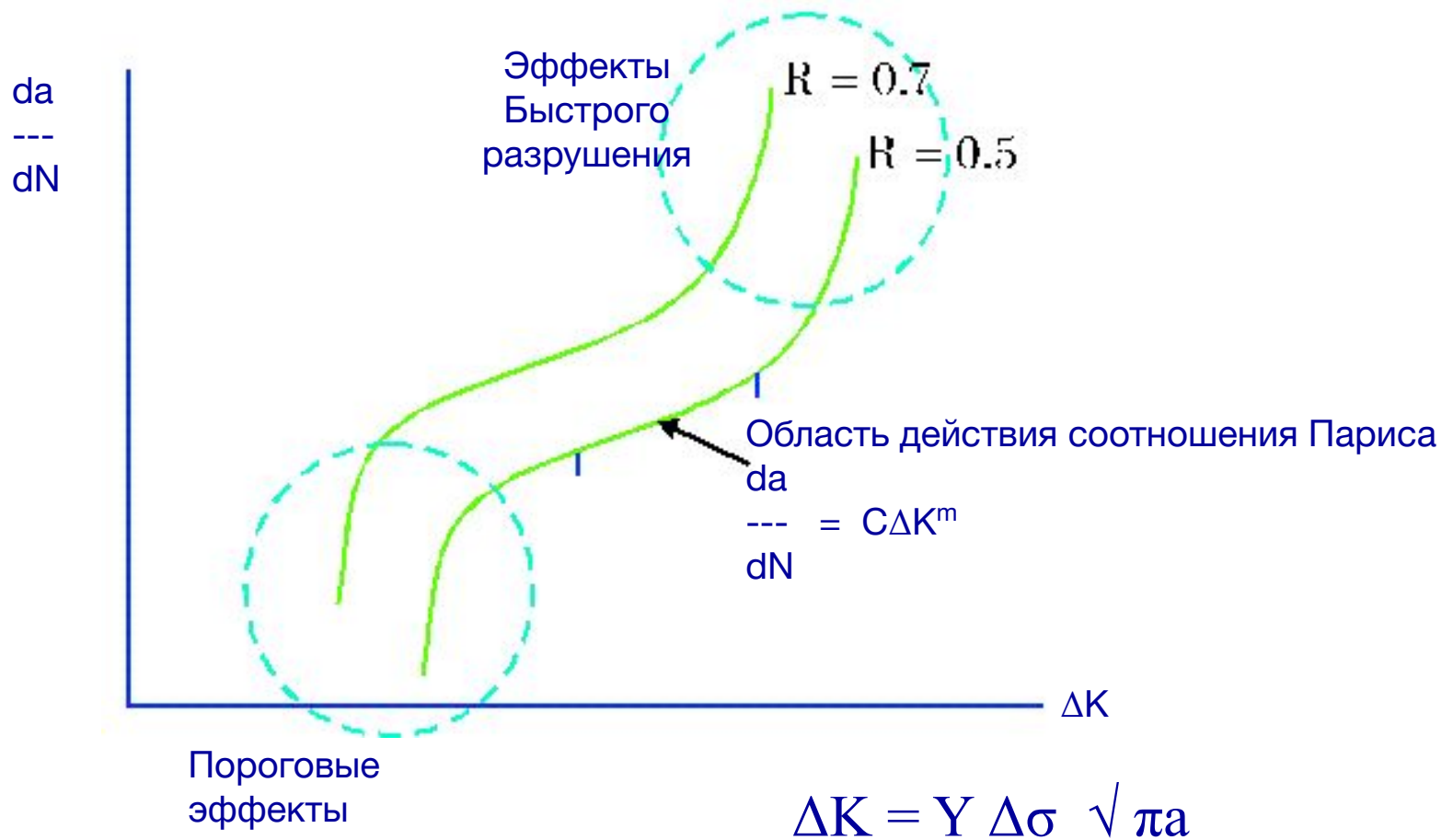
# АНАЛИЗ СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИНЫ - ПОДОБИЕ



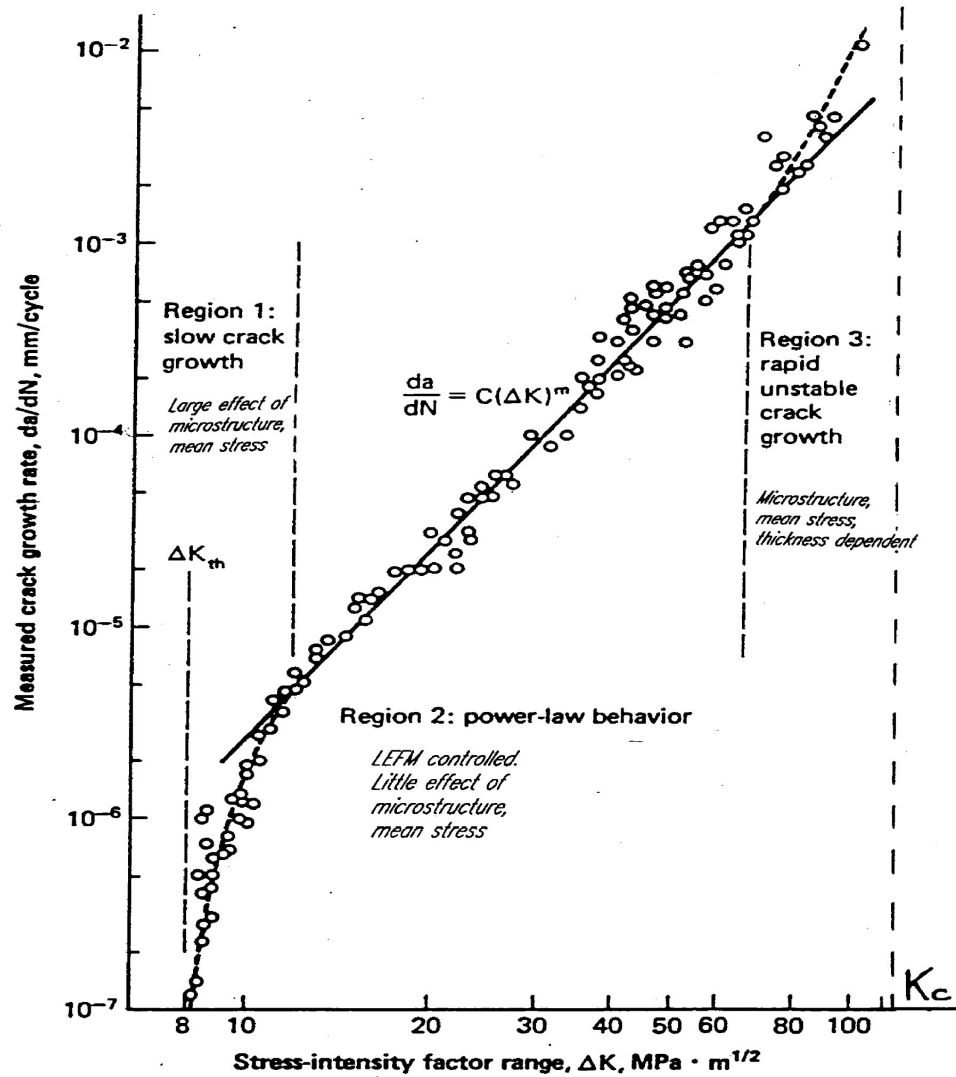
*Эта трещина . . . . . растет также быстро, как и эта  
В обоих случаях реализуются одинаковые коэффициенты  
интенсивности напряжений*



# ЭТАПЫ РОСТА ТРЕЩИН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ $\Delta K$



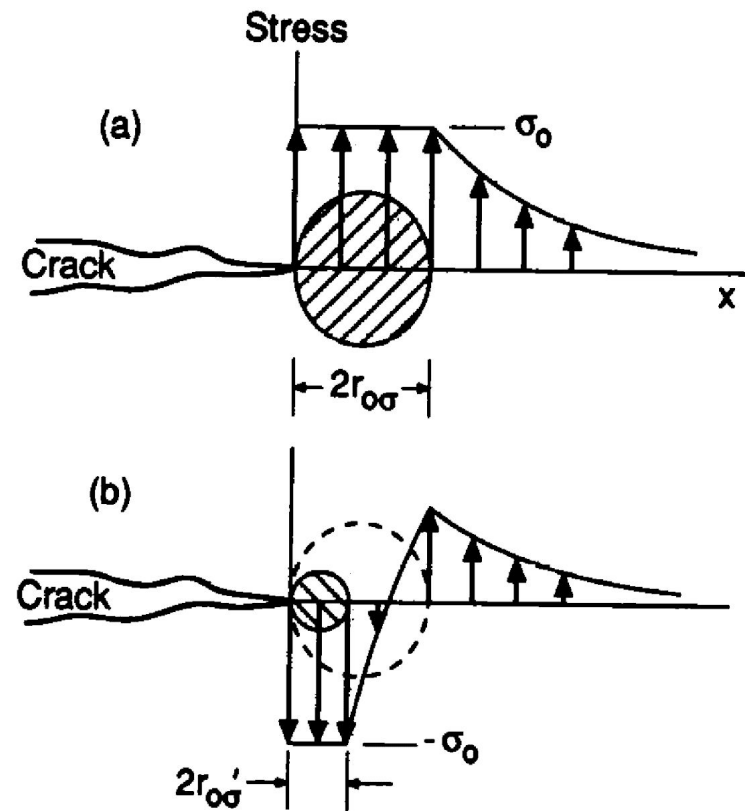
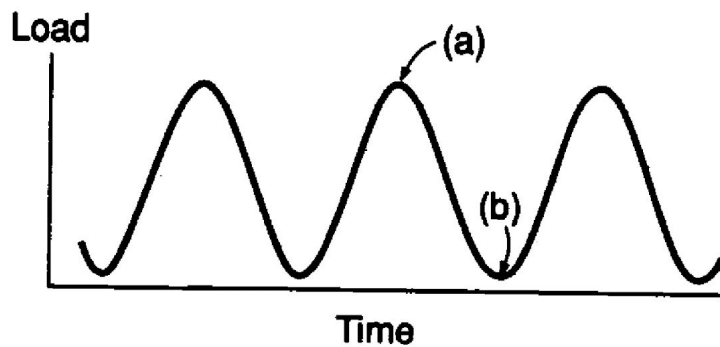
# ЭТАПЫ РОСТА



# ФАКТОРЫ, ВЛЯЮЩИЕ НА РОСТ ТРЕЩИН

- Пластичность в вершине трещины (эффект залечивания)
- Средние напряжения цикла
- Пороговая область (для низкого уровня нагружения и коротких трещин)
- Нагружение переменной амплитуды
- Окружающая среда

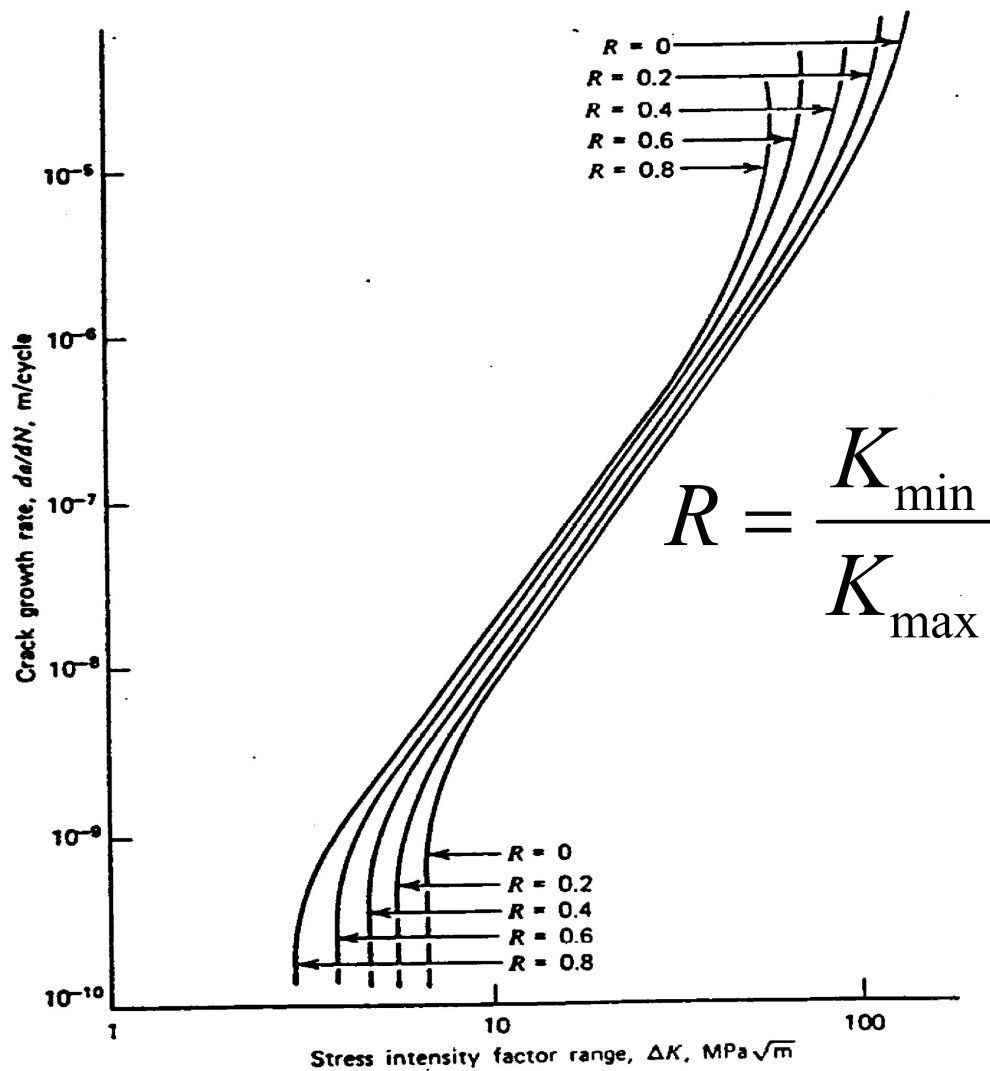
# ЗОНЫ ПЛАСТИЧНОСТИ В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ



# ПЛАСТИЧЕСКАЯ ЗОНА И ЭФФЕКТ ЗАЛЕЧИВАНИЯ

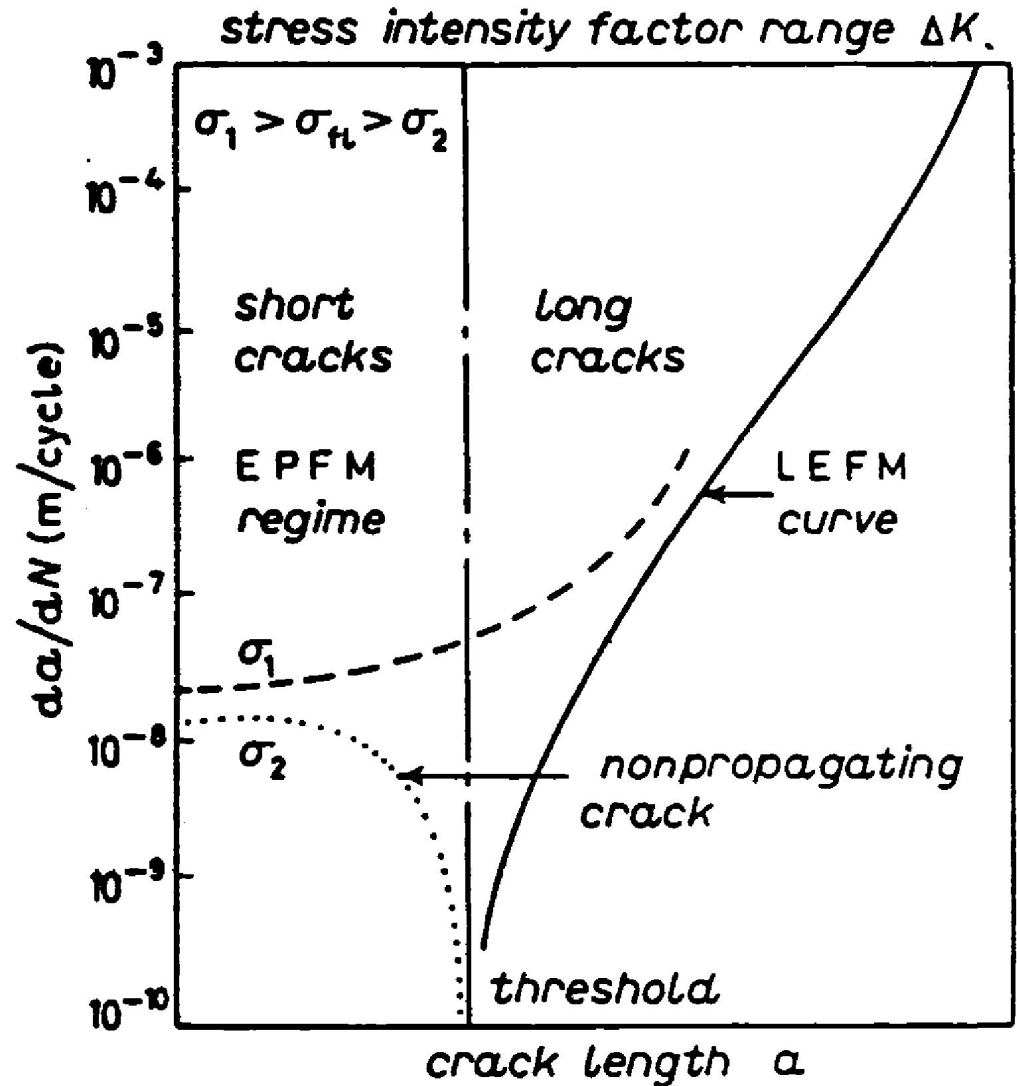
- В процессе роста трещины вокруг ее вершины развивается область пластических деформаций
- Пластически деформированные участки окружены остальным материалом, который находится в состоянии упругой деформации
- В процессе разгрузки наличие пластических зон приводит к тому, что берега трещины сходятся; в этом случае говорят, что наблюдается эффект залечивания
- Эффект залечивания может быть вызван:
  - Большими перегрузками
  - Коррозионными эффектами
  - Неровностями поверхности

# ЭФФЕКТ ПЕРЕМЕННОГО СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ЦИКЛА



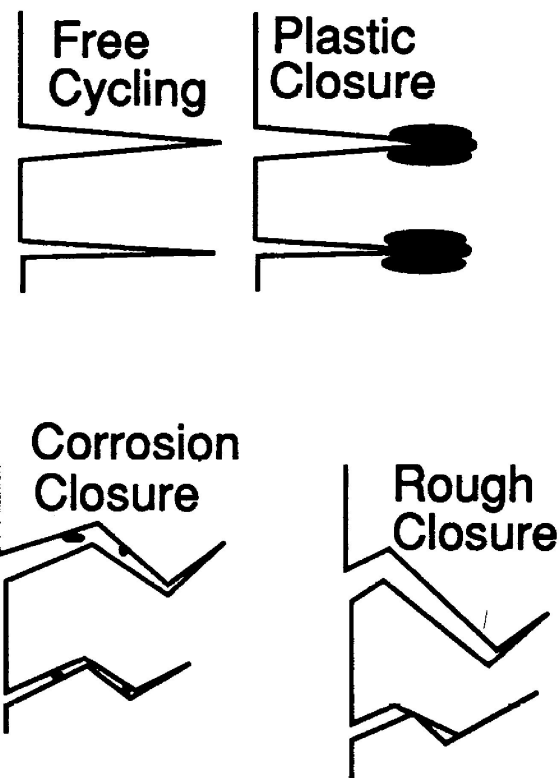
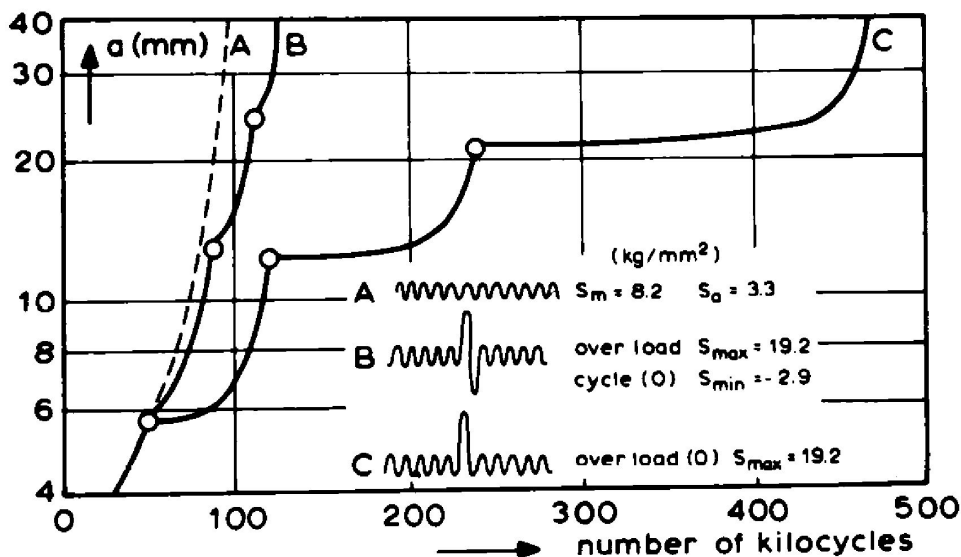
# КОРОТКИЕ ТРЕЩИНЫ

- Короткие трещины:
  - Не подвержены залечиванию.
  - В общем случае не подчиняются законам линейной механики разрушения.
  - Обычно имеют завышенную оценку параметров роста трещины по сравнению с длинными трещинами.
- Замечание:  
длинные трещины НЕ РАСТУТ, если  $\Delta K$  меньше некоторого порогового значения  $\Delta K_{th}$ .



# НАГРУЗКИ С ПЕРЕМЕННОЙ АМПЛИТУДОЙ

Напряжение переменной амплитуды  
влияет на рост трещин



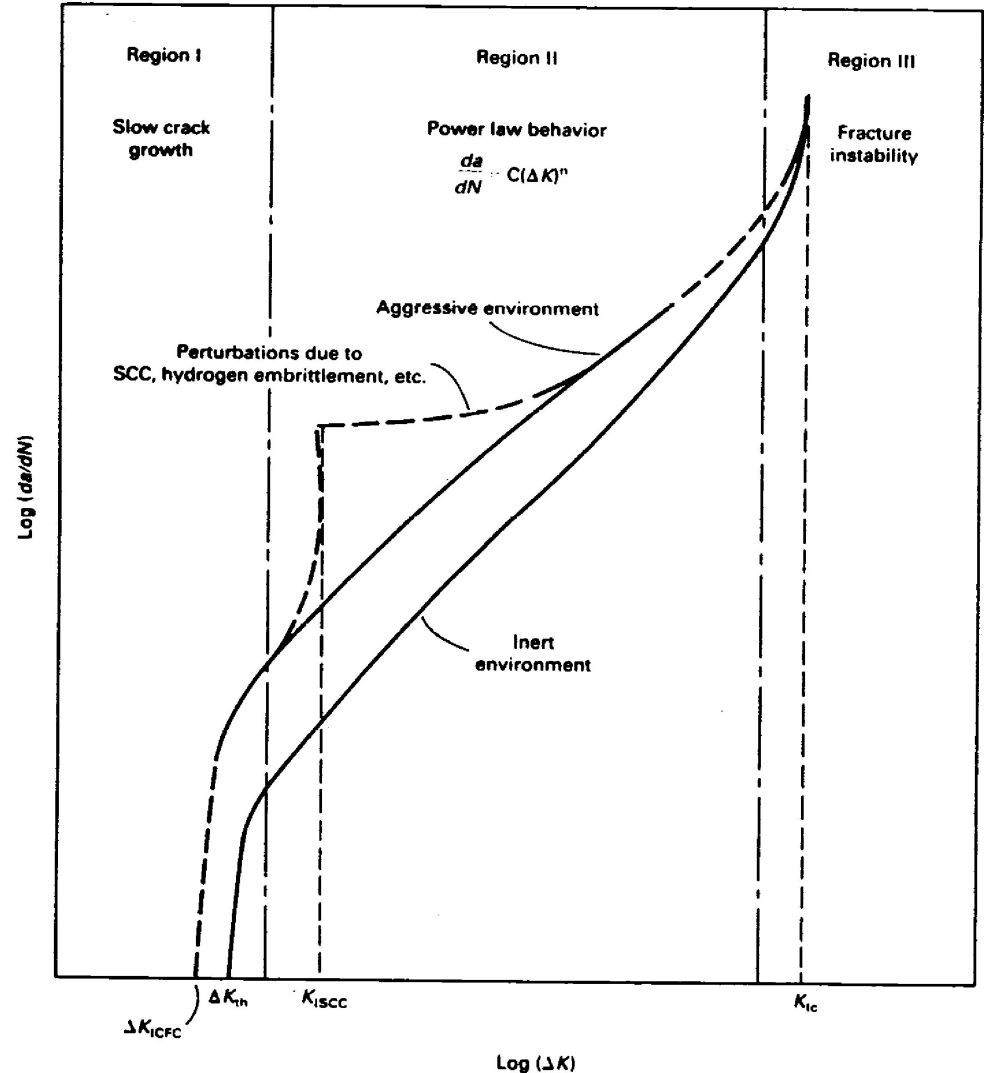
Эффекты залечивания независимо от механизма реализации  
приводят к уменьшению размахов интенсивности напряжений



# ПАРАМЕТРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Учет влияния процесса корродирования приводит к уменьшению долговечности (например в соленой воде трещины разрушаются быстрее, чем в воздухе).

Наиболее благоприятным в смысле влияния окружающей среды является вакуум.



# ВЫЧИСЛЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

- Необходимо:
  - начальный размер трещины
  - конечный размер трещины
  - размах напряжений
  - уточнить K
  - кривая роста трещины для материала

Integrating the Paris equation

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m = C(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m$$

If Y is not a function of a

$$\int_0^{N_f} dN = \frac{1}{CY^m \Delta\sigma^m \pi^{m/2}} \int_{a_0}^{a_f} a^{-m/2} da$$

For  $m \neq 2$

$$N_f = \frac{1}{CY^m \Delta\sigma^m \pi^{m/2} \left(\frac{m}{2} - 1\right)} \left[ \frac{1}{a_0^{(m/2-1)}} - \frac{1}{a_f^{(m/2-1)}} \right]$$

If  $m = 2$

$$N_f = \frac{1}{CY^m \Delta\sigma^m \pi^{m/2}} \ln\left(\frac{a_f}{a_0}\right)$$

# ЗАКОНЫ, ОПИСЫВАЮЩИЕ РОСТ ТРЕЩИНЫ

- Зависимостей для определения скорости роста трещины в литературе встречается много:
  - Париса (наиболее известный метод)
  - Формана
  - Лукаса-Клеснила
  - Элбера
  - Уолкера
  - Вилера
  - Вилленборга (MSC.Fatigue использует усовершенствованную версию этой модели)

# ПОДХОД С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭФФЕКТИВНОГО $\Delta K$

- Ключевым моментом в анализе роста трещины MSC.Fatigue является замена истинного  $\Delta K$  (расчитанного для приложенной нагрузки) на эффективный  $\Delta K$  (то есть движущая сила рассматривается непосредственно на фронте трещины)

- Обычный метод

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R, \Delta K_{TH}, K_{IC}, history, environment)$$

- Метод, реализованный в MSC.Fatigue

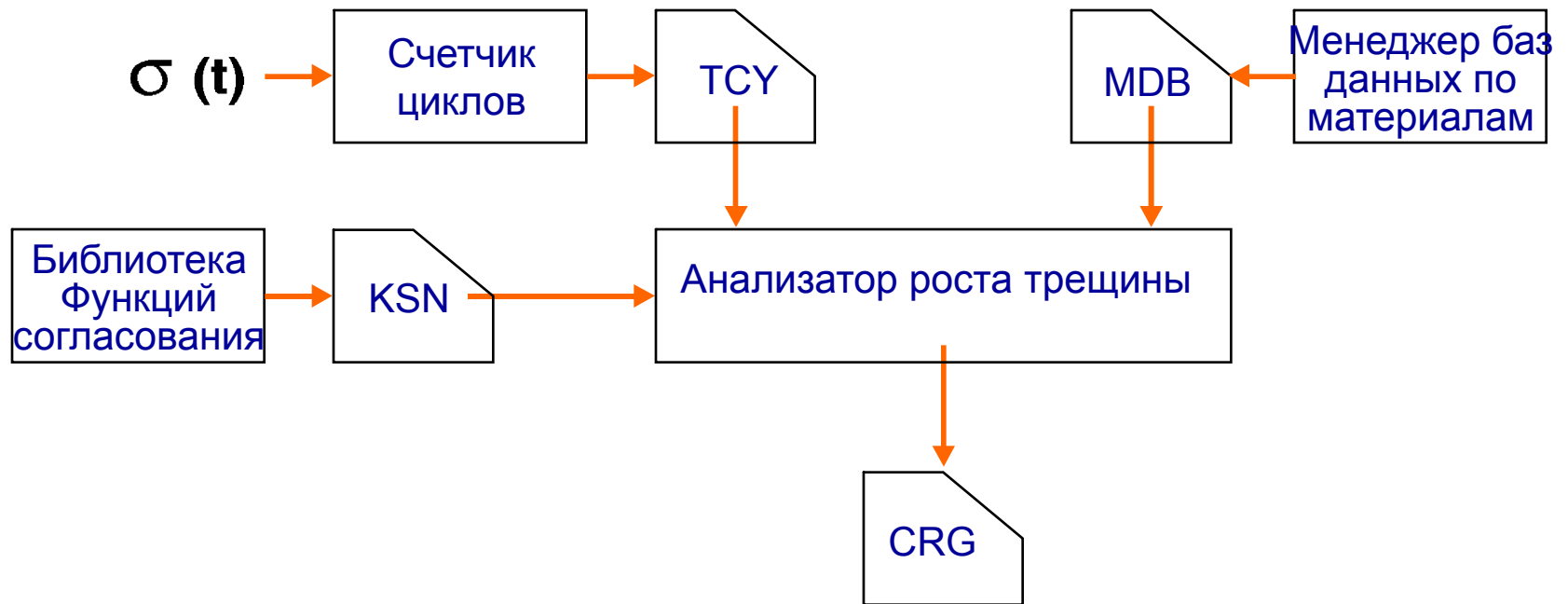
$$\Delta K_{eff} = f(\Delta K, R, \Delta K_{TH}, K_{IC}, history, environment)$$

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{eff}^m$$

# АЛГОРИТМ АНАЛИЗА РОСТА ТРЕЩИН В MSC.FATIGUE

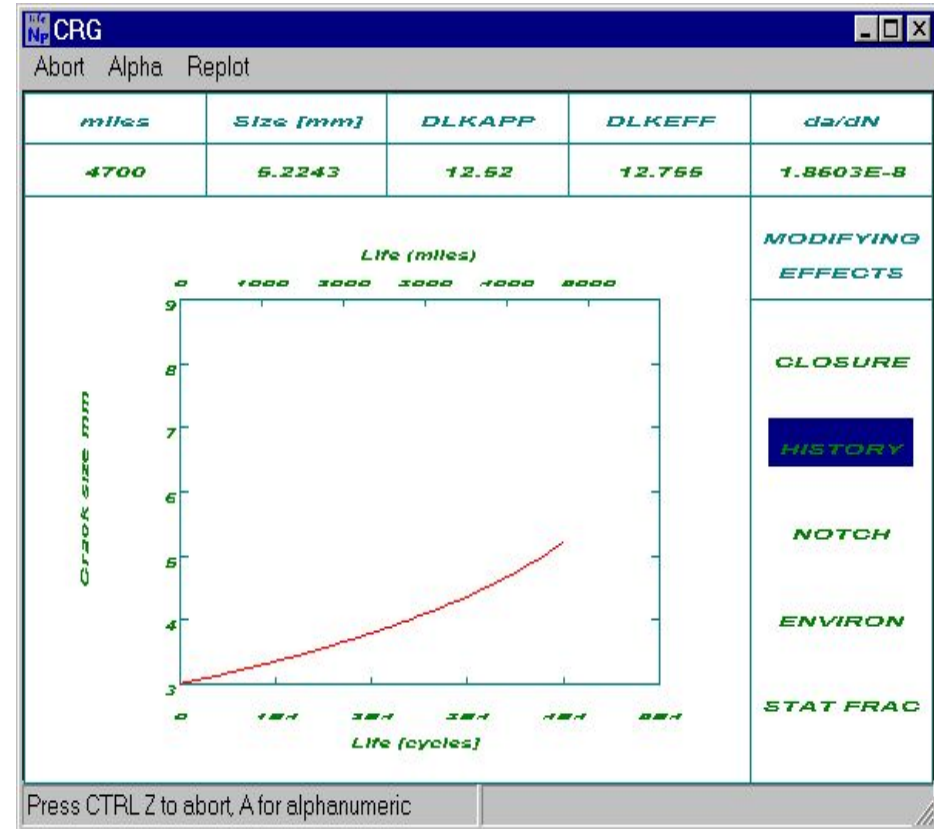
- Ввод следующего цикла
- Расчет истинного  $\Delta K$  по справочным таблицам
- Преобразование к эффективному  $\Delta K$  для
  - Залечивания/коротких трещин
  - Влияния концентраторов
  - Наличия зон статического разрушения
  - Эффектов истории нагружения
  - Эффектов окружающей среды
- $da = C \Delta K_{\text{eff}}^m$
- $a = a + da$  (если нет быстрого разрушения, то переходим к следующему циклу)

# РЕАЛИЗАЦИЯ В MSC.FATIGUE



# РОСТ ТРЕЩИНЫ ЦИКЛ-ЗА-ЦИКЛОМ

- Основные функции:
  - Поцикловый алгоритм
  - Последовательный по времени подсчет циклов методом дождя
  - Влияние окружающей среды на свойства материалов
  - Размер минимальных трещин по Китагава
  - Моделирование в пороговой области
  - Эффекты залечивания и замедления роста трещин
  - Определяемая пользователем долговечность
  - Критерий разрушения – вязкость разрушения материала
  - Поверхностные или объемные трещины
  - Модифицированное уравнение Париса (модифицированная модель Вилленборга)



# КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДА

- Идентификация критических зон и выбор режима узел/элемент для номинальных напряжений
- Определение геометрических параметров трещины и выбор функции согласования из библиотеки
- Задание начального размера трещины
- MSC.Fatigue рассчитывает изменение размера трещины цикл за циклом до момента, когда происходит быстрое разрушение
- При правильном определении всех параметров рассчитанная долговечность должна отличаться от практически наблюдаемой не более чем в два раза

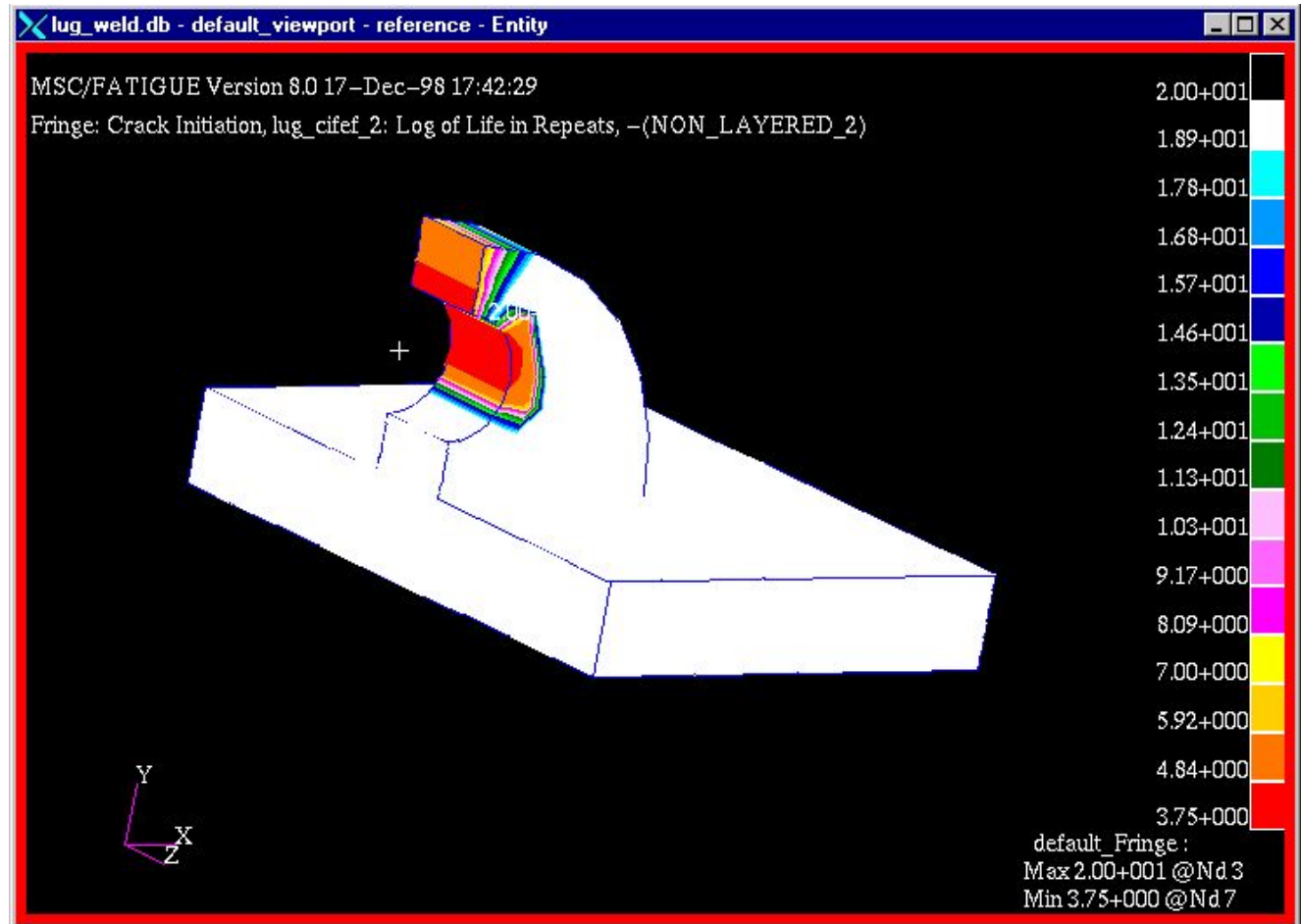


# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИН MSC.FATIGUE

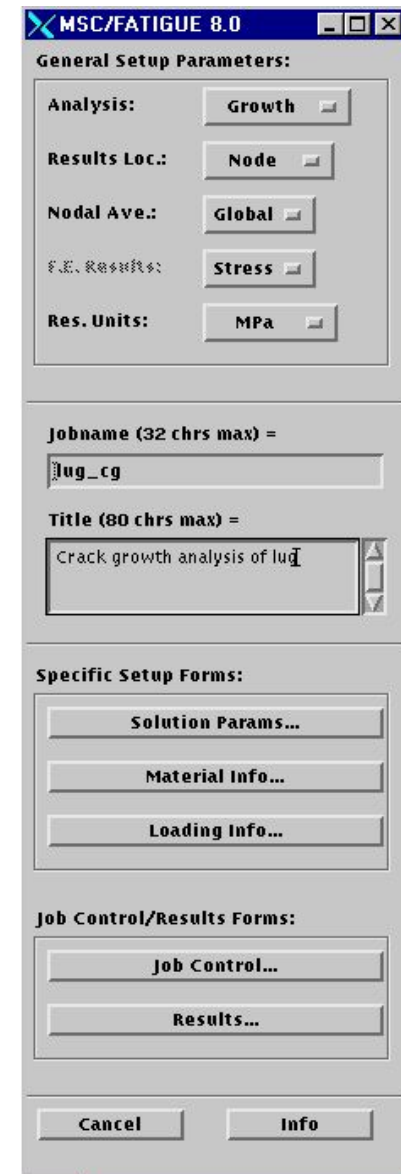
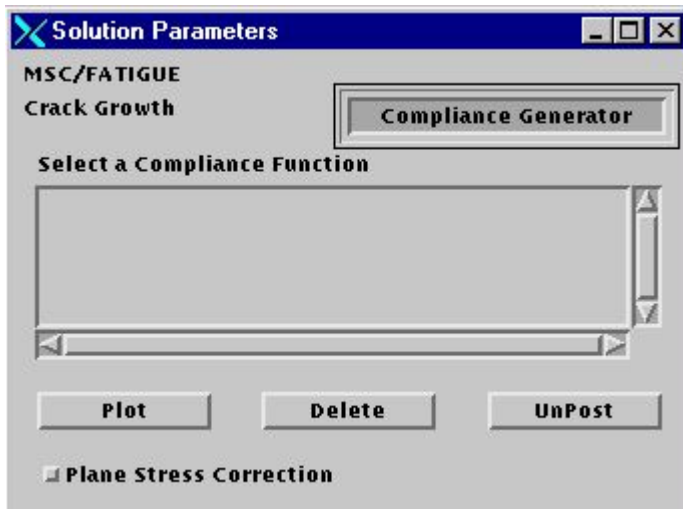
- Проектировочный расчет
- Планирование испытаний
- Составление регламента ремонтно-восстановительных работ
- Исследование разрушения
- Дополнительная информация при принятии решений

# ПРИМЕР: АНАЛИЗ РОСТА ТРЕЩИНЫ

- Проушина
- Одна нагрузка



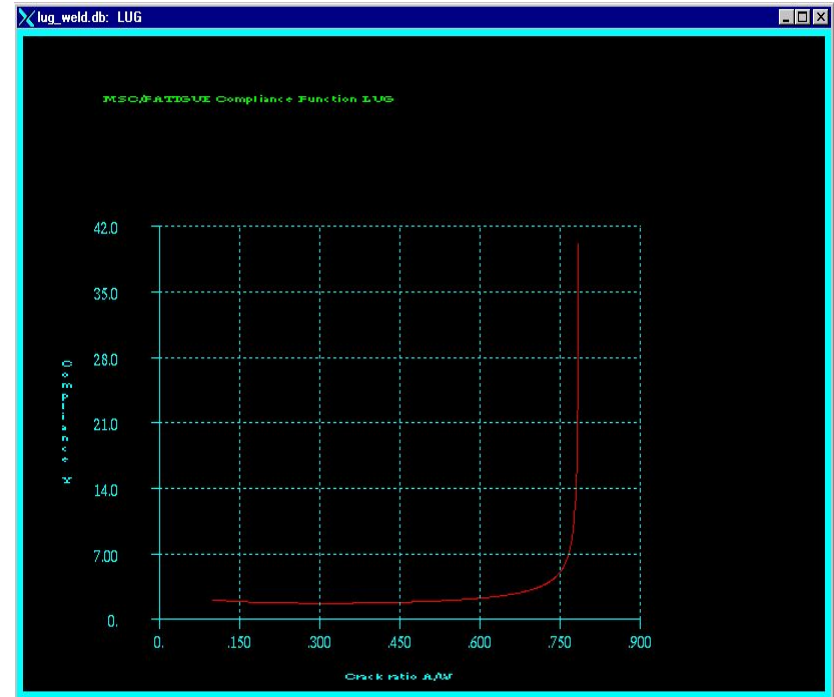
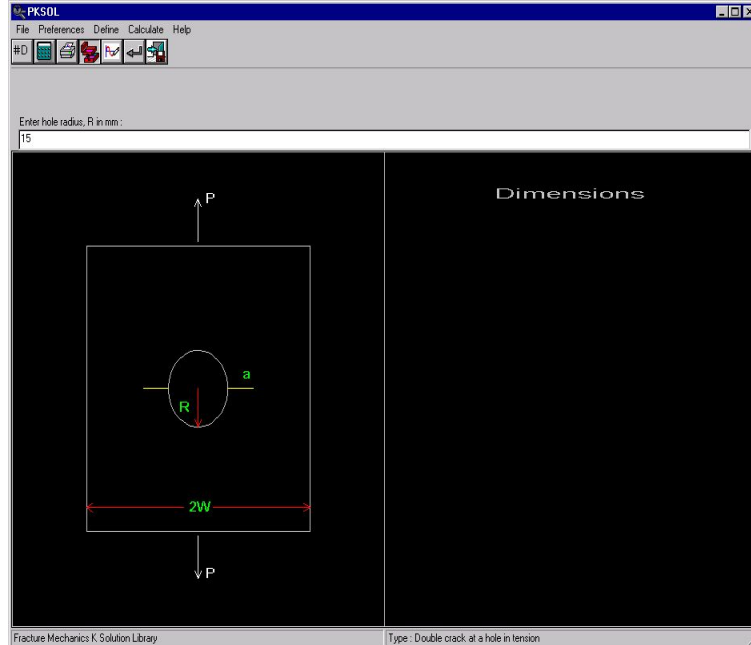
# АНАЛИЗ МЕТОДАМИ ЛИНЕЙНО-УПРУГОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ



# ОПРЕДЕЛИТЕ ТИП ТРЕЩИНЫ И ОТОБРАЗИТЕ ФУНКЦИЮ СОГЛАСОВАВАНИЯ

**Crack Parameters:**

Crack Length Units:	Millimeters
Initial Crack Length:	3
Final Crack Length:	55
Notch Depth:	0.0
Notch Radius:	0.0
Sharp Crack Radius:	0.0



# ЭТАП ОПИСАНИЯ НАГРУЖЕНИЯ

**PTIME - Load X-Y Data**

Source Filename:

Filename:


Description 1:

Description 2:

Load type:

Units:

Number of fatigue equivalent units:

 Help

**Time History Manager**    **Select Standard Directory**    **Select User Directory**

Current Time Directory:

Number of Static Load Cases:

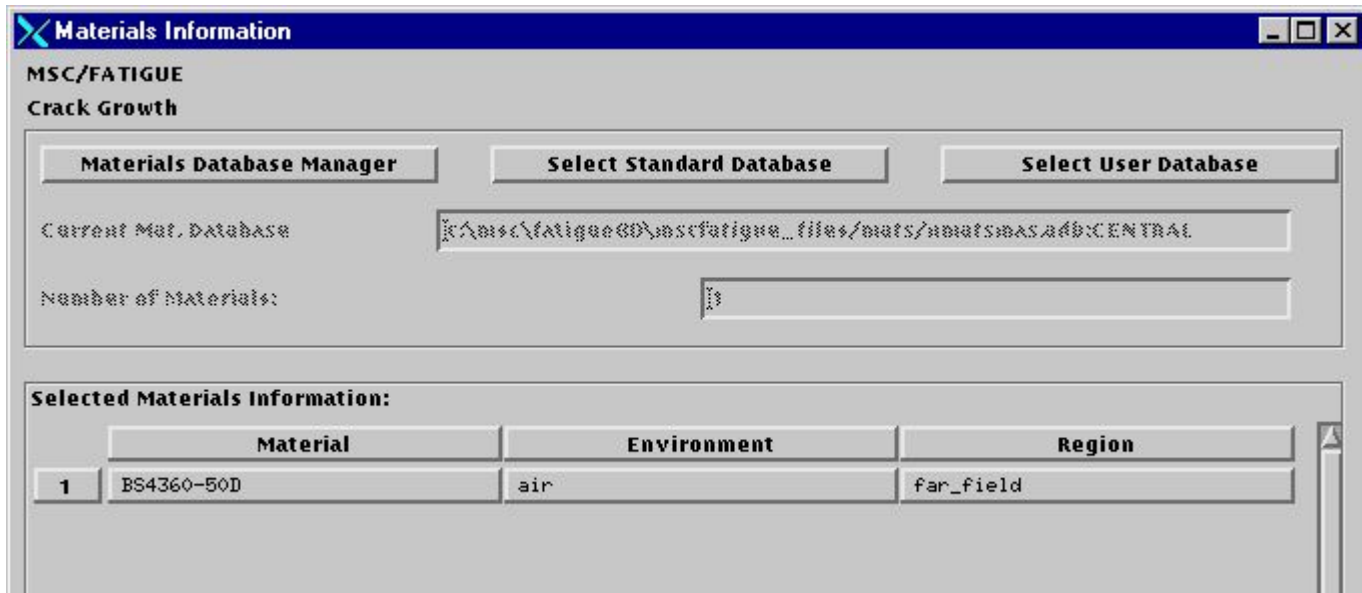
Fill Down OFF

**Selected Static Load Cases:**

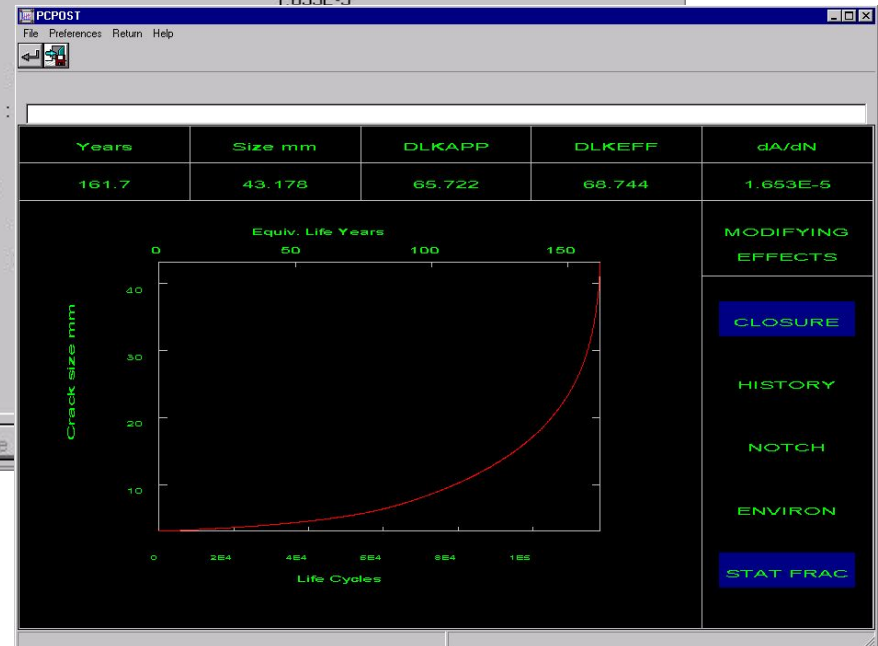
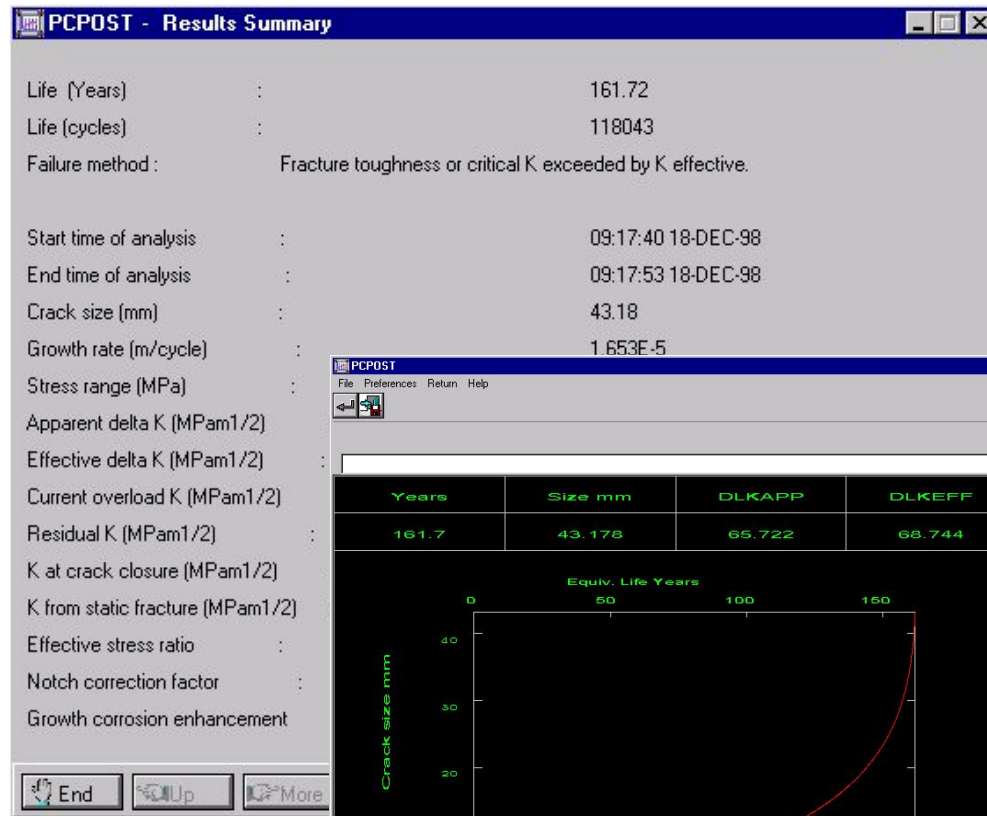
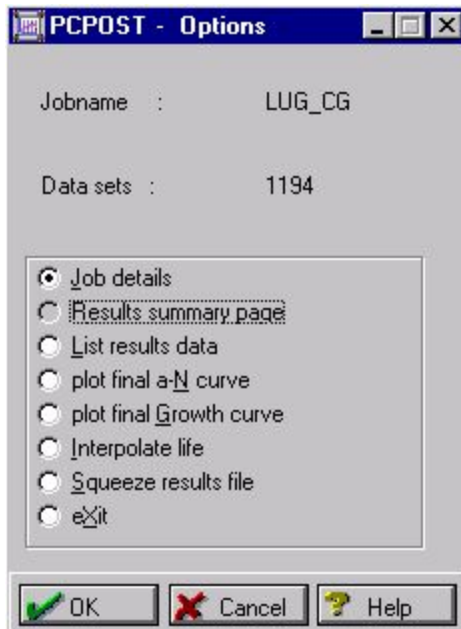
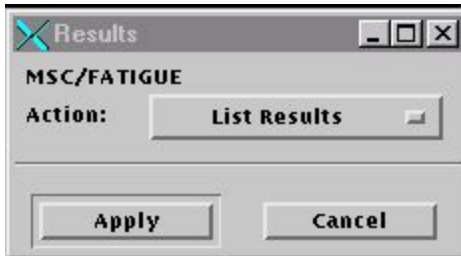
	Load Case ID	Time History	Load Magnitude
1	1,1-3,1-1-	LUGLOAD	1.

# ЭТАП ЗАДАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

- создайте группу “far\_field” и поместите в нее только узел № 223



# ПРОВЕДЕНИЕ АНАЛИЗА



# УПРАЖНЕНИЕ

- Выполните упражнение из главы 8 книги Quick Start Guide -“Introduction to Crack Growth”
- Выполните упражнение из главы 10 книги Quick Start Guide -“Multiple Loads”
- Если что-либо не понятно – не стесняйтесь спрашивать.