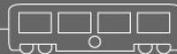


Практические методы и руководство по вычислению параметров трещиностойкости конструкций с применением систем MSC.Software

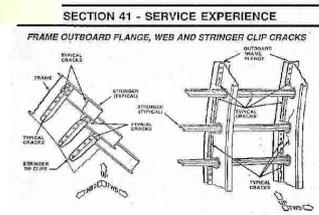
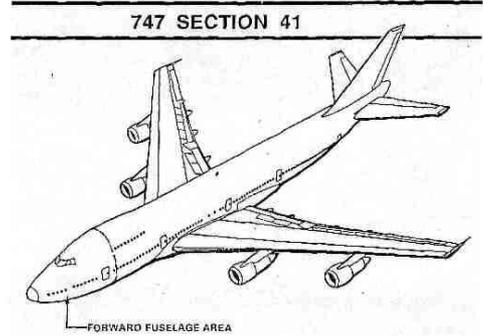
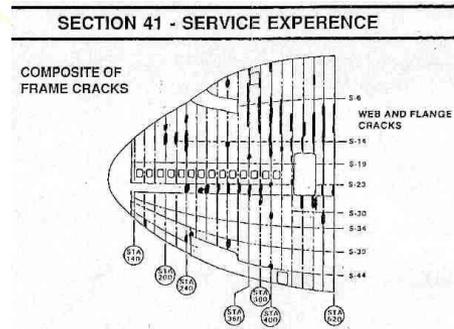
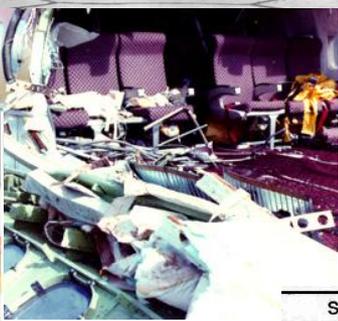
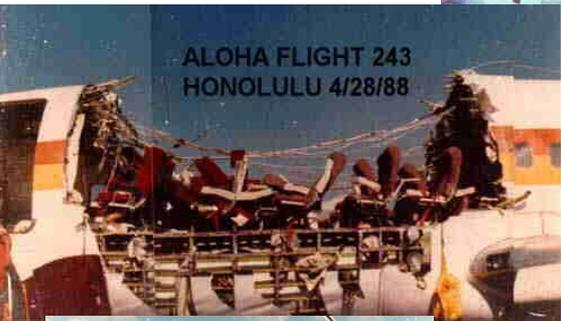
Внедрение прогрессивных методов ресурсного проектирования деталей авиационных ГТД с использованием продуктов MSC Часть 1

Слезкин Д.В., представительство MSC.Software в СНГ
IX Российская конференция пользователей систем MSC



УСТАЛОСТНЫЕ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ – АКТУАЛЬНАЯ ПРОБЛЕМА СОВРЕМЕННОСТИ

По официальным данным потери из-за разрушения различных конструкций в США составляют порядка 4% от ВВП!!!



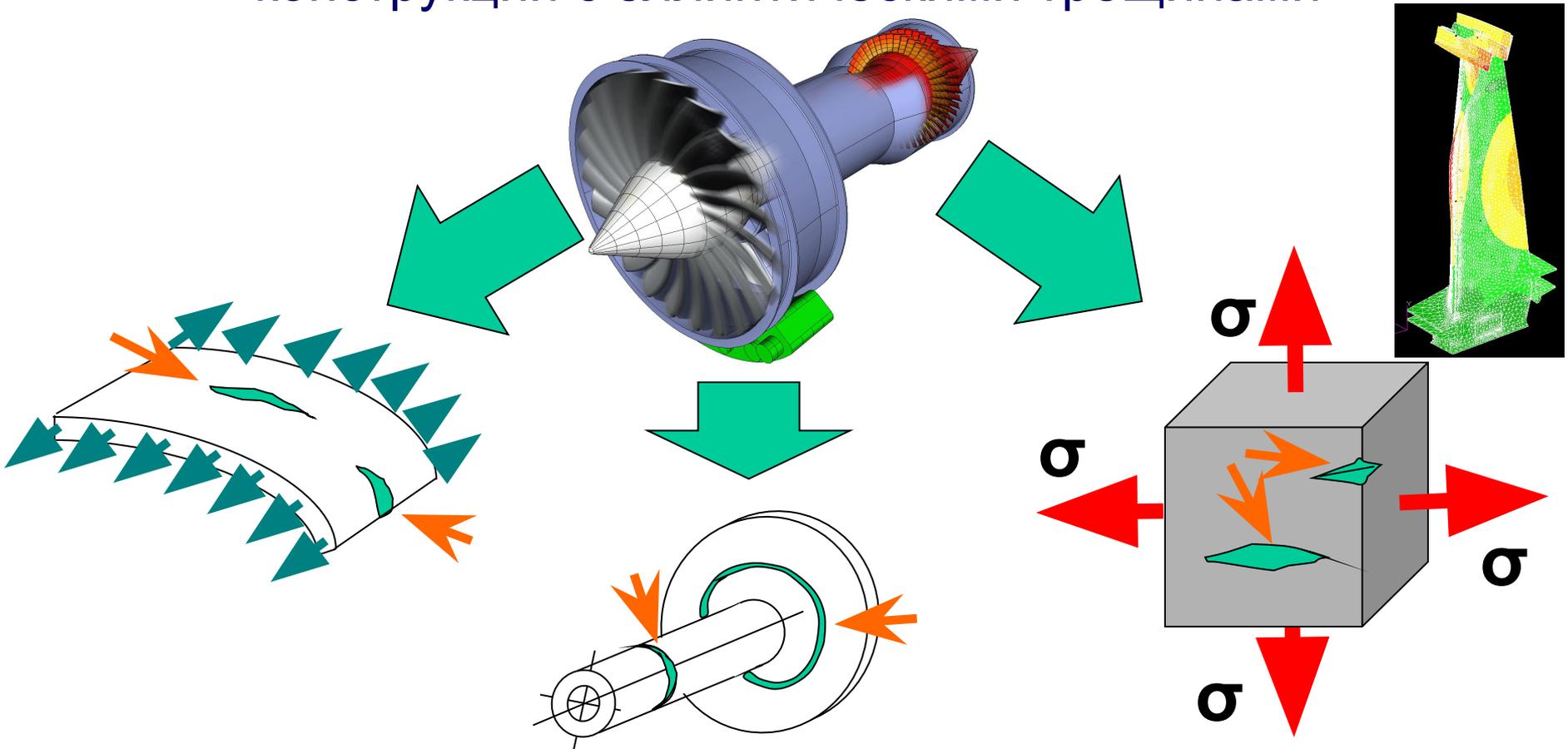
ТРЕБОВАНИЕ - РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ MSC

1. ЦИАМ им. П. И. Баранова разработаны новые нормы прочности, требующие проводить прочностные расчеты с учетом начальных дефектов в деталях авиационных ГТД
2. НТЦ им. Ляульки – необходимость при расчетах учитывать возможное наличие начальных дефектов элементов ГТД
3. Требуются ответы на следующие вопросы:
 - какие методы вычисления Коэффициентов Интенсивности Напряжений (КИН) использовать?
 - как вычислять параметры трещиностойкости с помощью программного обеспечения MSC.Software (пошаговая инструкция)?
 - какие требования к параметрам КЭ сетки?

Обязательное требование:

ТЕСТИРОВАНИЕ НА ЗАДАЧАХ, ИМЕЮЩИХ ИЗВЕСТНОЕ РЕШЕНИЕ

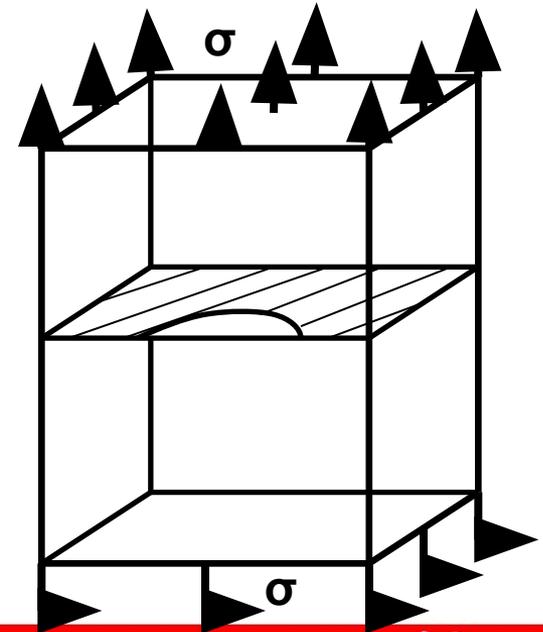
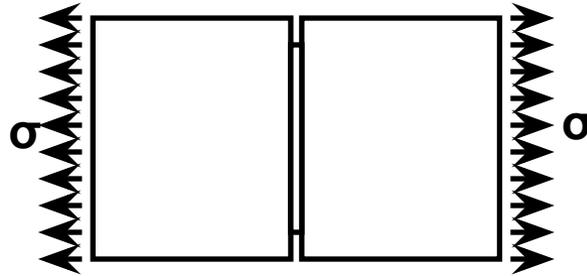
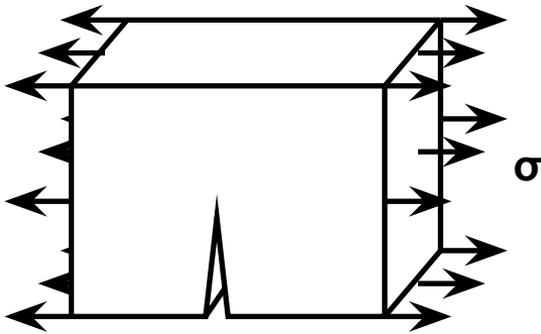
Задачи расчета элементов конструкции ГТД, содержащие начальные дефекты, можно условно привести к трем типам: расчет плоских элементов конструкции с трещинами, расчет осесимметричных элементов конструкции с трещинами, а также расчет сложных пространственных элементов конструкции с эллиптическими трещинами



ЭТАПЫ РЕШЕНИЯ

Тестирование решения задач по определению КИН 1 на трех типах моделей с трещинами

- **Пластина с трещиной.** Изучение методов вычисления Коэффициентов Интенсивности Напряжений (КИН) с помощью Nastran. Определение необходимого размера КЭ сетки в области вершины трещины на стандартном образце (пластина с краевой трещиной).
- **Осесимметричная задача.** Изучение разных методов для вычисления КИН с помощью Nastran, Marc
- **Трехмерная задача.** Создание подробной методики вычисления J-интеграла с помощью Patran/Marc для краевых и эллиптических трещин



СПОСОБЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ КИН

1. Специальные (сингулярные) конечные элементы - реализованы в Nastran, линейный расчет (расчеты велись для плоского образца с краевой трещиной)
2. Вычисление КИН 1 по стандартной справочной формуле 1 – использован соответствующий справочник [3], линейный расчет удаленного поля напряжений
3. Вычисление КИН 1 по формуле 2 - с учетом поправки на пластичность по Ирвину, линейный расчет (расчеты цилиндрического образца с круговой трещиной велись в осесимметричной постановке)
4. Вычисление КИН 1 по перемещениям раскрытия берегов трещины (формула 3) –линейный расчет (расчеты цилиндрического образца с круговой трещиной велись в осесимметричной постановке)
5. Вычисление КИН 1 по раскрытию вблизи вершины (формула 4) – нелинейно-упругий расчет (расчеты цилиндрического образца с круговой трещиной велись в осесимметричной постановке)
6. Вычисление КИН 1 с помощью J-интеграла – формула (5) (расчеты велись для объемного образца с эллиптической трещиной)

$$K_1 = Y * \sigma_{\infty} * \sqrt{\pi * c} \quad (1)$$

$$Y = \left(\frac{D}{d} + \frac{1}{2} + \frac{3d}{8D} - \frac{0.3}{D^2} + \frac{0.73d^3}{D^3} \right) * \frac{\sqrt{D}}{2}$$

$$K_1 = Y * \sigma_{\infty} * \sqrt{\pi * (c + r)} \quad (2)$$

$$K_I = \frac{G}{2 * (1 - \mu)} * \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} * u_y, (\phi = \pi) \quad (3)$$

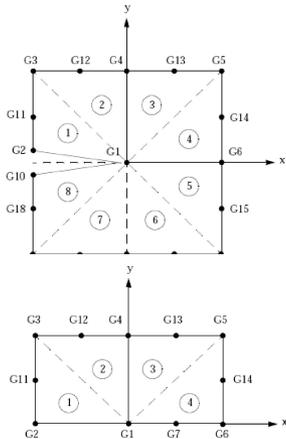
$$K_1 = 1.29 * \sqrt{E * \sigma_y * \delta} \quad (4),$$

$$K_1 = \frac{\sqrt{J * E}}{\sqrt{1 - \mu^2}} \quad (5)$$

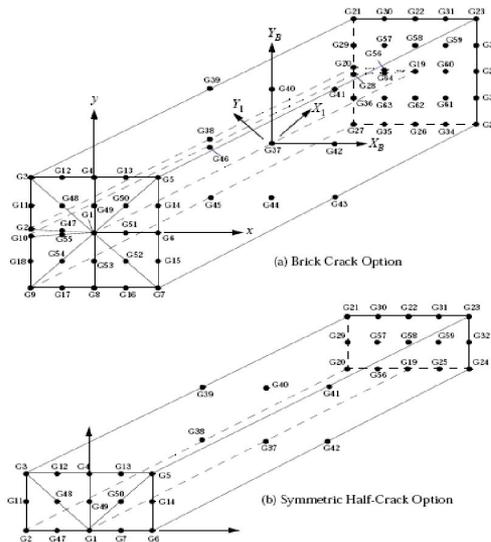
ВЫЧИСЛЕНИЕ КИН С ПОМОЩЬЮ NASTRAN

- **Nastran:** разработаны специальные сингулярные элементы для вычисления сингулярных полей напряжений/деформаций (CRAC2D/CRAC3D) и вычисления Коэффициентов Интенсивности Напряжений (КИН) для произвольной геометрии (и нагружения) тела с трещиной;

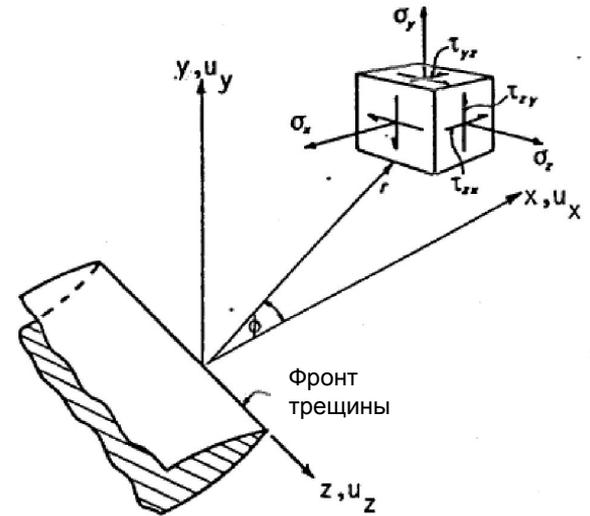
CRAC2D



CRAC3D



CRAC3D элемент со всеми узлами

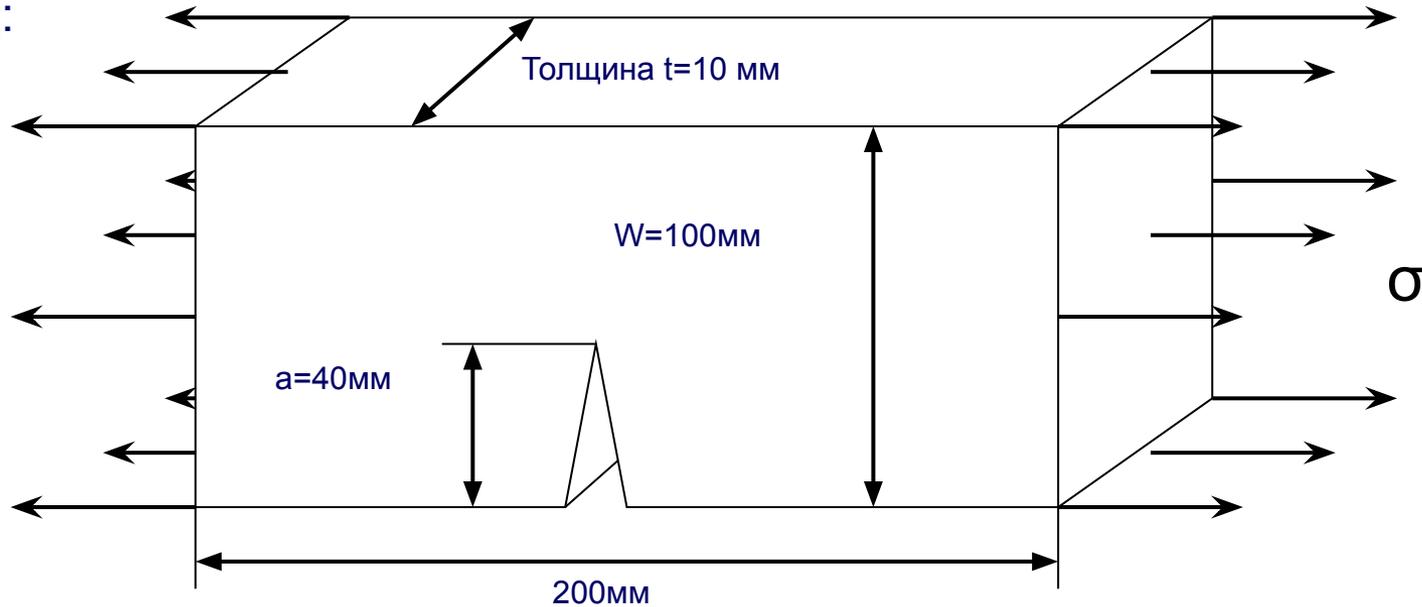


Геометрия вершины трещины и обозначения

ВЫЧИСЛЕНИЕ КИН С ПОМОЩЬЮ NASTRAN

Тестирование CRAC3D элементов

Образец:



Размеры и схема нагружения образца

$$\sigma = 100/1000 = 0.1 \text{ кгс/мм}^2$$

При заданных параметрах справочное значение

$$KI = \underline{2.35 \text{ кгс/мм}^{3/2}} \text{ [3]}$$

Более подробно – см. [7],

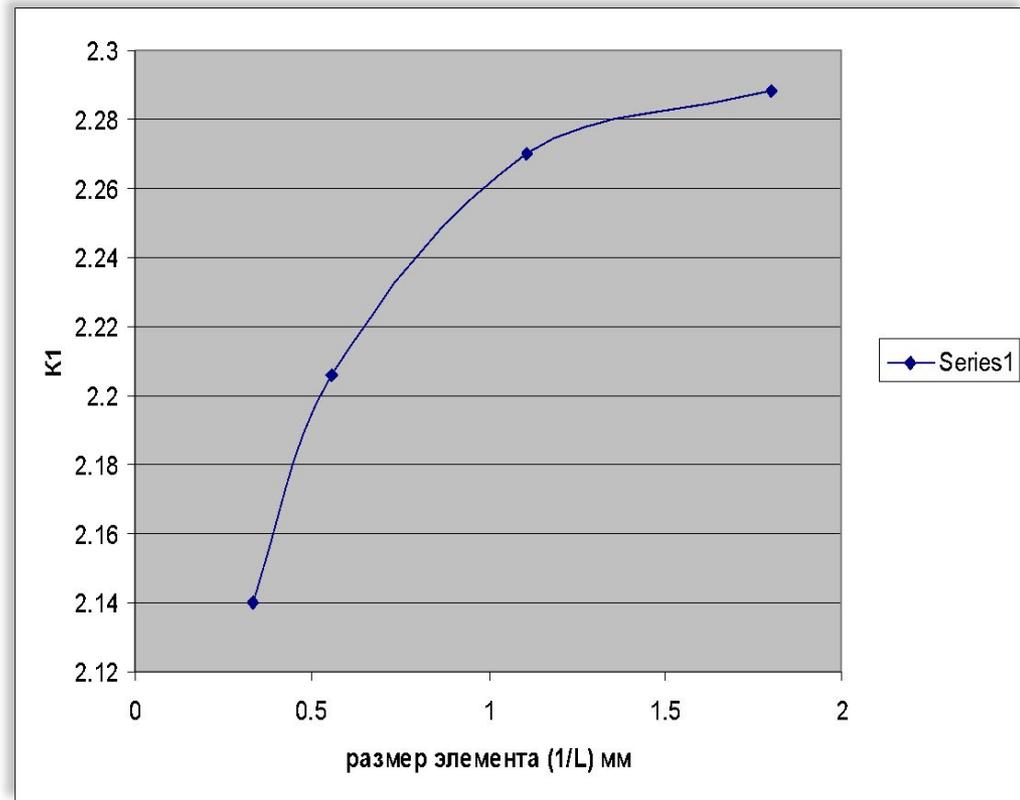
ВЫЧИСЛЕНИЕ КИН С ПОМОЩЬЮ NASTRAN

Оценка влияния размера КЭ сетки на конечный результат

Справочное значение $KI = \underline{2.35 \text{ кгс/мм}^{3/2}}$ [3]

Более подробно – см. [7]

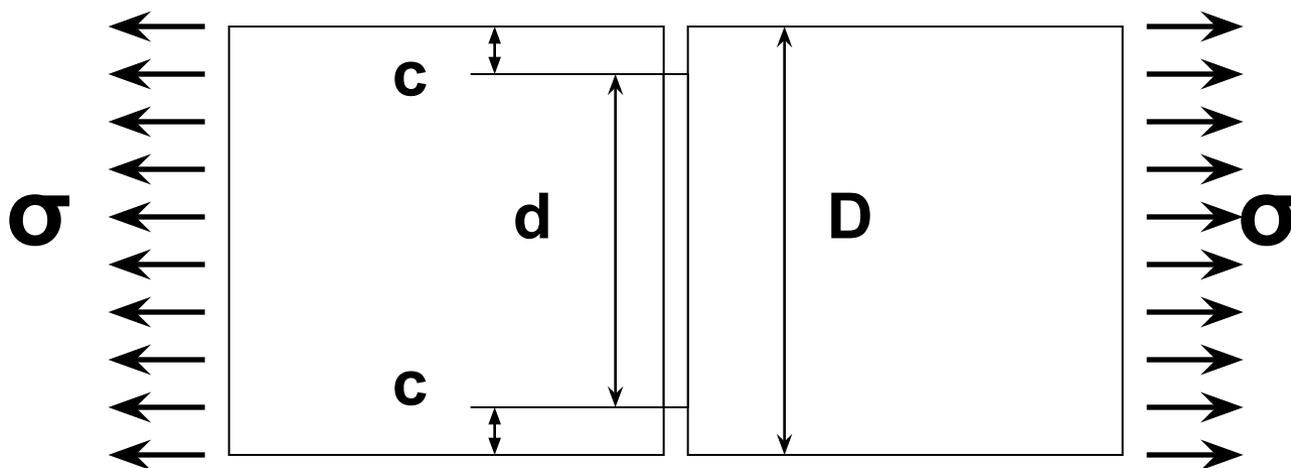
Важно: применение CRAC элементов ограничено наличием малых зон пластики, при развитых пластических зонах следует применять другие подходы



Изменение K1 в зависимости от размера элемента

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ

Решение тестовой задачи вычисления K_1 с помощью разных методов для цилиндрического образца

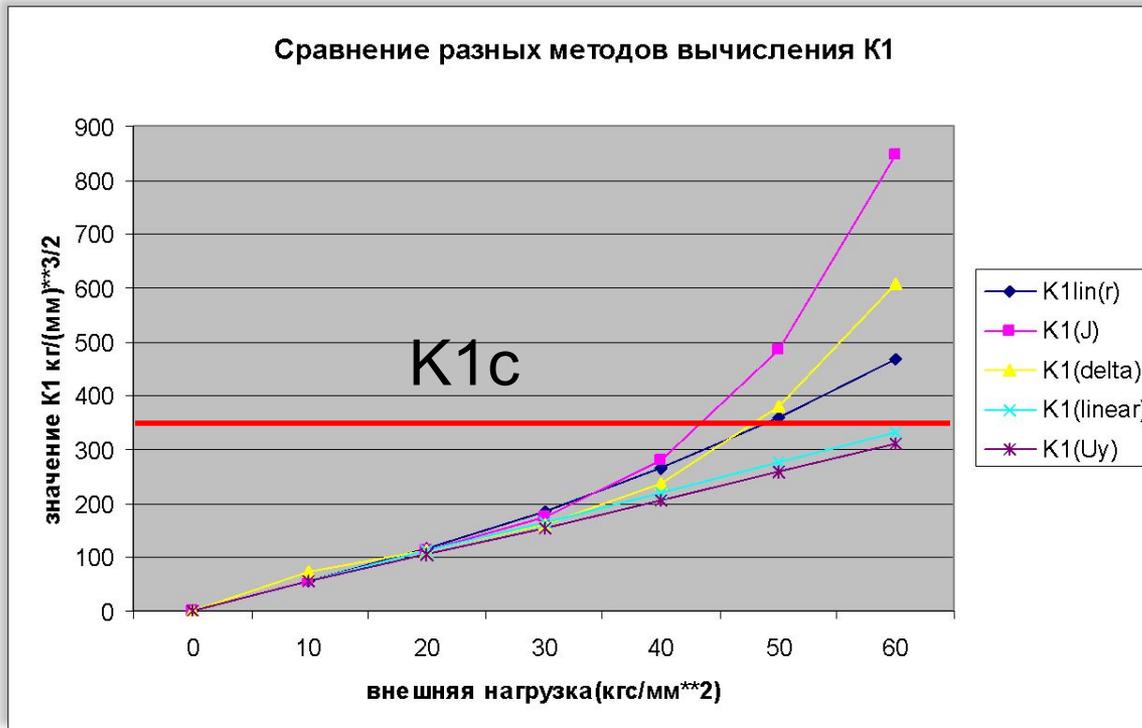


Размеры и нагружение образца

$D=10$ мм., $d=5$ мм., $c=2.5$ мм., от $\sigma=10$ кгс/мм²

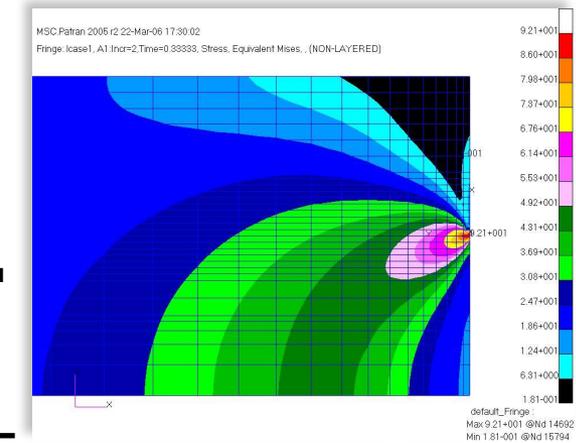
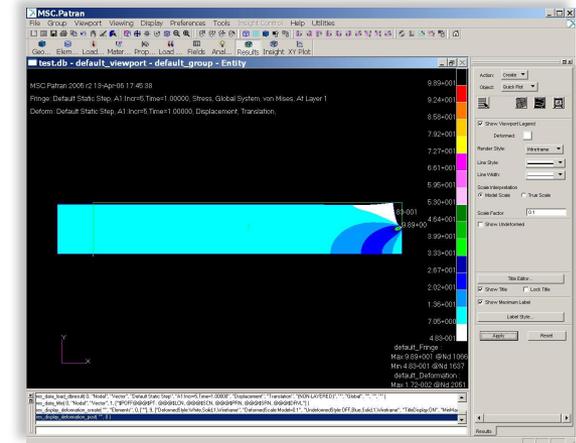
Характеристики материала при $t=20^\circ$ С: $E=20500$ кгс/мм², $\mu=0.3$, $\sigma_{0.2}=68$ кгс/мм²,
 $K_{1c}=340$ кгс/мм^{3/2}

MSC.Marc – эффективный инструмент для решения задач линейной и нелинейной механики разрушения



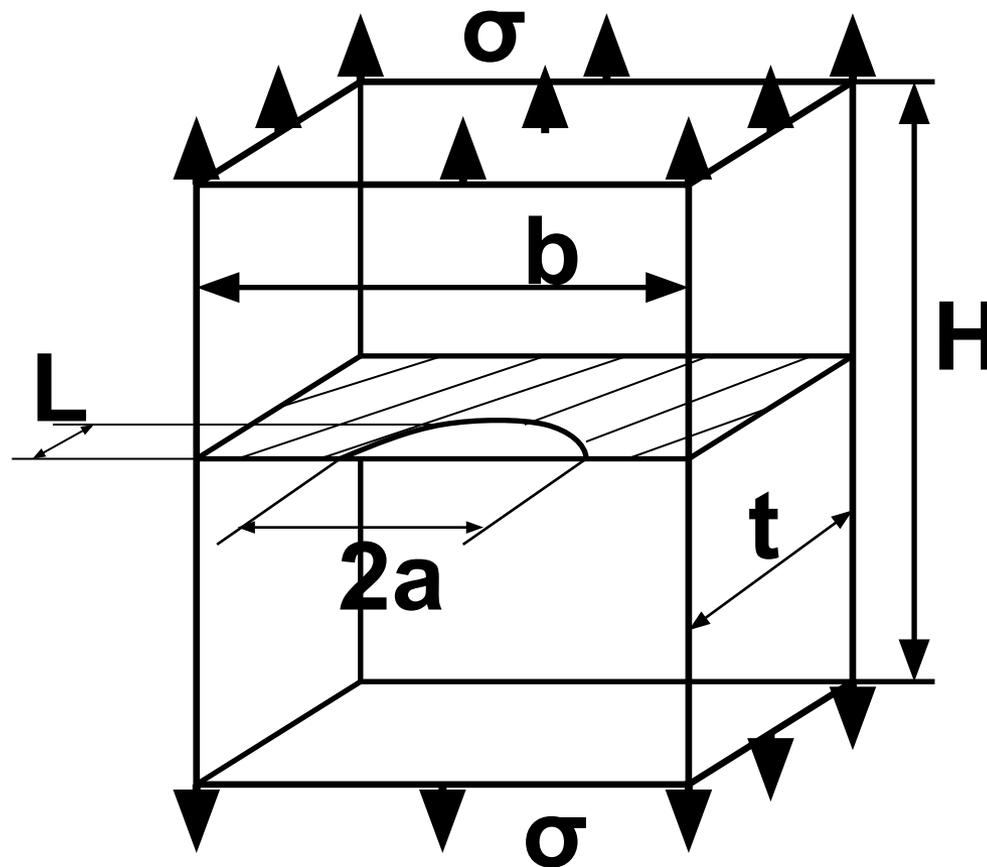
Анализ области применимости линейной механики разрушения в зависимости от интенсивности внешней нагрузки (характеризующей размеры пластической зоны вблизи вершины трещины)

$K1_{lin(r)}$ – КИН1, вычисленный по формуле (2) с учетом поправки по Ирвину, **$K1(J)$** – КИН1, вычисленный с помощью J-интеграла, **$K1(delta)$** – КИН1, вычисленный по раскрытию вблизи вершины трещины, **$K1(linear)$** – КИН1, вычисленный по справочной формуле, **$K1(Uy)$** – КИН1, вычисленный по перемещениям раскрытия берегов трещины



Эквивалентные напряжения по Мизесу для внешней нагрузки 20 кгс/мм²

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ С ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОЙ



Справочное значение
 $K_I = 186.7 \text{ кгс/мм}^{3/2}$ [3]

$L = 5 \text{ мм.}$, $a = 10 \text{ мм.}$, $t = 20 \text{ мм.}$, $b = 80 \text{ мм.}$, $H = 120 \text{ мм.}$, $0 < L/a < 1.0$, $0 < L/t \leq 0.4$.
Характеристики материала при $t=20^\circ \text{ C}$: $E=20500 \text{ кгс/мм}^2$, $\mu=0.3$, $\sigma_{0.2}=68 \text{ кгс/мм}^2$,
 $K_{Ic}=340 \text{ кгс/мм}^{3/2}$. Напряжение $\sigma=50 \text{ кгс/мм}^2$

РЕЗУЛЬТАТЫ

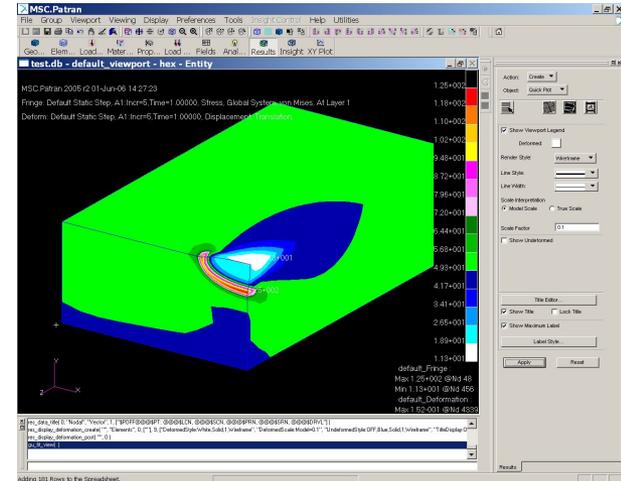
Справочное значение $K_I = 186.7 \text{ кгс/мм}^{3/2}$ [3]

Для данного образца получено следующее значение J-интеграла: $J=1.45$

Соответственно, K_{IN1} :

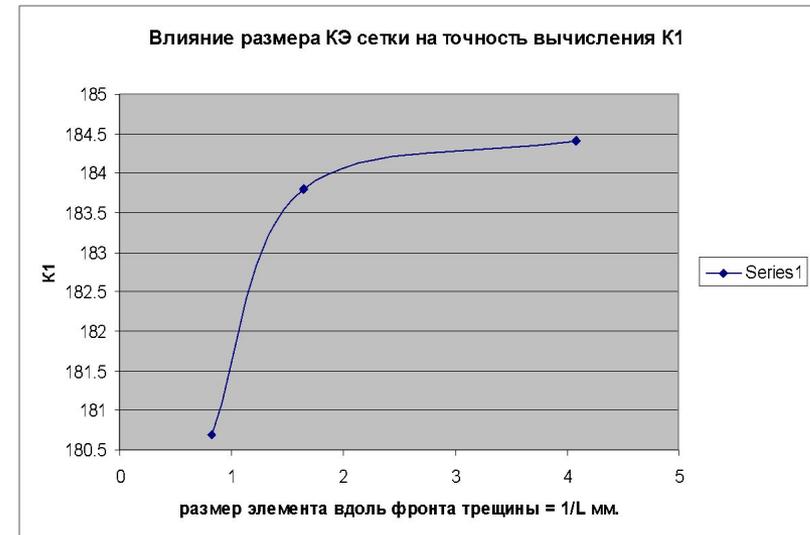
$$K_1 = \frac{\sqrt{J * E}}{\sqrt{1 - \mu^2}} = \frac{\sqrt{1.45 * 20500}}{\sqrt{1 - 0.3^2}} = 180.7$$

Конечноэлементная модель - 13167 степеней свободы, размер элемента вдоль фронта трещины = 1.22 мм.



Проведены расчеты для КЭ сеток разного размера:

1. Размер элемента вдоль фронта трещины 0.61 мм., $K_I=183.8$, 37359 ст.св.
2. Размер элемента вдоль фронта трещины 0.245 мм., $K_I=184.4$, 267000 ст.св.



MSC.Marc – эффективный инструмент для решения задач линейной и нелинейной механики разрушения

НЕЛИНЕЙНАЯ МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ

J-интеграл

- Вычисление J-интеграла с помощью метода Де-Лоренци
- Линейный и нелинейный материалы
- Учет больших деформаций
- Температурные нагрузки
- Возможность учета контакта между берегами трещины, включая трение
- Автоматически распознаются граничные условия симметрии
- Нагружение свободных поверхностей трещины
- Вычисление динамических КИН

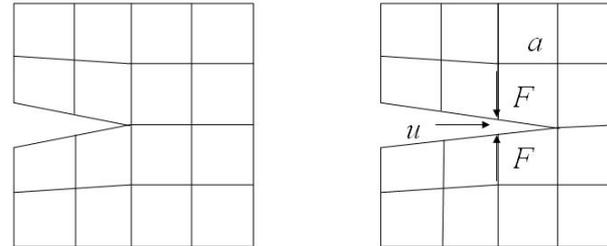
MSC.Marc – эффективный инструмент для решения задач линейной и нелинейной механики разрушения

ЛИНЕЙНАЯ МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ

- ❑ Применение техники виртуального закрытия трещины (VCST) для вычисления потока упругой энергии G в вершине трещины
- ❑ Для расчетов используются только узловые усилия, необходимые для закрытия трещины, перемещения берегов вблизи вершины трещины и геометрия, корректно описывающая трещину
- ❑ Можно использовать элементы высокого порядка

VCST

$$K = \sqrt{G * E}$$



Consider a crack growing a length a . The crack is initially closed.

Energy release rate:

$$G = Fu/a$$

F is force needed to close the crack

u is crack opening displacement

ВЫВОДЫ

1. Решена сложная задача вычисления коэффициента интенсивности напряжений для первой формы раскрытия трещин и J-интеграла с помощью систем MSC
2. На основе полученных решений разработаны и опробованы специалистами НТЦ им. Люльки пошаговые руководства по вычислению КИН и J-интеграла на примере расчета тестовых образцов (плоская пластина с трещиной, цилиндрический образец с круговой трещиной, массивный образец с эллиптической трещиной)
3. Описанные в работе подходы применимы не только при расчете элементов конструкции ГТД, но и при расчете деталей других конструкций из различных материалов
4. Накоплен важный опыт решения задач трещиностойкости, которым могут воспользоваться специалисты других предприятий по соответствующему запросу руководителей (необходимо быть официальным пользователем систем MSC.Software)
5. Выявлены области применения каждого из использованных в работе методов определения КИН
6. На основе анализа результатов решений полученных методом конечного элемента (МКЭ) можно рекомендовать, как достаточно оптимальный, диапазон размеров конечных элементов в вершине трещины от 0.1 мм до 1 мм. для вычисления КИН и J-интеграла

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A modern family of crack tip elements for MSC/Nastran. Jatin C. Parekh, Rocky R. Arnold, Peter J. Woytowicz, Anamet Laboratories Inc., San Carlos, California 94070; Presented at the MSC/NASTRAN User's conference, Universal City, California 91608, March 20-21, 1986;
2. Hughes T. J. R., Akin J. E., "Techniques for Developing Special Finite Element Shape Functions with Particular Reference to Singularities", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 15, pp. 733-751, 1980.
3. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х томах. Ито Ю., Мураками Ю., Хасебэ Н., Юуки Р., Тоя М., Того К., Мията Х., Терада Х., Миядзаки Н., Аоки С. Перевод с английского. – М.: Мир, 1990, 448 стр.
4. О. Зенкевич, Метод конечных элементов в технике. Перевод на русский язык, М.: Мир, 1975, 440 стр.
5. В. М. Пестриков, Е. М. Морозов Механика разрушения твердых тел: курс лекций. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 стр.
6. Хеллан К. Введение в механику разрушения. Пер. с англ. – М.:Мир, 1998. – 364 стр.
7. Слезкин Д. В. Методика вычисления Коэффициентов Интенсивности Напряжений с применением MSC.Nastran, 2006 год. Методическое пособие MSC.Software Moscow



Спасибо за внимание!

