

# РАЗДЕЛ 1

## ОБЗОР МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДОЛГОВЕЧНОСТИ И УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ



# ЗНАКОМСТВО С КОМПАНИЕЙ

- **MSC.Software Corporation** (изначально MacNeal-Schwendler Corporation) занимается разработкой, продажей и поддержкой сложных компьютерных программ в области автоматизации инженерных расчетов (CAE) с 1963 года
- MSC.Software – разрабатывает, распространяет и осуществляет поддержку наиболее совершенной, широко применяемой в разных отраслях промышленности программы для структурного анализа **MSC.Nastran**, а также программы для нелинейного анализа **MSC.Marc** – первой коммерческой программы подобного рода в мире
  - **MSC.Nastran**
  - **MSC.Marc**
  - **MSC.Dytran**
  - **MSC.Patran**
  - **MSC.Marc Mentat**
  - **MSC.Adams**
  - ◆ **MSC.MVision**
  - ◆ **MSC.Fatigue**
  - ◆ **MSC.Laminate Modeler**
  - ◆ **MSC.SuperForm**
  - ◆ **MSC.SuperForge**

*...и так далее*

# ЗНАКОМСТВО С КОМПАНИЕЙ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

- Ключевые моменты в истории MSC.Software
  - ◆ **1963** Компания основана Доктором Ричардом МакНилом и Робертом Швендлером. Разработана первая программа SADSAM (Structural Analysis by Digital Simulation of Analog Methods.) Эта программа была предшественницей современного флагмана MSC - MSC.Nastran.
  - ◆ **1965** MSC участвует в проекте NASA по разработке унифицированного программного инструмента для инженерных расчетов. Программа стала известна под именем NASTRAN (**NASA Structural Analysis**)
  - ◆ **1965** Группа исследователей в Броуновском Университете (Brown University) начала разработку программного комплекса, предшествовавшего программе MARC

# ЗНАКОМСТВО С КОМПАНИЕЙ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

- **1971**- Год основания The MARC Analysis Research Corporation.
- **1972** MSC выпускает собственную версию NASTRAN – MSC.Nastran
- **1972** MARC Corporation выпускает первую собственную версию программы MARC.
- **1994** MSC покупает PDA Engineering (разработчик PATRAN) и становится крупнейшим разработчиком и продавцом на рынке программных систем конечно-элементного инженерного анализа (CAE ).
- **1999** MSC.Software приобретает компанию MARC Analysis Research Corporation.

# MSC ОСУЩЕСТВЛЯЕТ ПОДДЕРЖКУ КЛИЕНТОВ

- Главный офис корпорации находится в Санта Ана, Калифорния. Поддержка пользователей осуществляется через региональные представительства.
  - Пользователи программных комплексов MSC в странах СНГ должны обращаться по всем вопросам в Московский офис представительства MSC.Software по телефонам: 363-06-83, 254-57-10.
  - По вопросам, связанным с MSC.Fatigue можно также обращаться к техническим специалистам:
    - Дмитрий Борисович Копанев ([dmitry.kopanev@mscsoftware.com](mailto:dmitry.kopanev@mscsoftware.com))
    - Дмитрий Валентинович Слезкин ([dmitri.slezkin@mscsoftware.com](mailto:dmitri.slezkin@mscsoftware.com))

# РАСПИСАНИЕ КУРСА

## День 1:

Вводная часть  
Обзор MSC.Fatigue Software  
Пользовательский интерфейс  
MSC.Fatigue  
Упражнения

## День 2:

Пользовательский интерфейс  
MSC.Fatigue (продолжение)  
Теория Stress-Life (S-N)  
Статистическая природа параметров,  
влияющих на долговечность  
Упражнения на закрепление S-N  
метода

## День 3:

Теория Strain-Life (E-N)  
Коррекция среднего напряжения  
Упражнения на E-N метод

## День 3 (Продолжение):

Введение в анализ многоосного  
нагружения  
Упражнения

## День 4:

Рост трещин  
Упражнения (LEFM)  
Точечная сварка  
Программный датчик деформаций  
«Виброфатиг»  
Упражнения  
Дополнительные возможности  
Утилиты MSC.Fatigue

# ВОЗМОЖНОСТИ MSC.FATIGUE

MSC.Fatigue – это мощный инструмент для прогнозирования долговечности, использующий результаты КЭ анализа. Этот комплекс позволяет провести анализ чувствительности долговечности к изменению определенных параметров и спрогнозировать ресурс будущего изделия уже на ранних этапах разработки проекта. Основные подходы, используемые в MSC.Fatigue :

- Метод номинальных напряжений с использованием кривых Велера (S-N)
- Анализ зарождения трещин (E-N, метод локальных деформаций)
- Анализ скорости роста трещин (с использованием методов линейной механики разрушения)
- Анализ точечной и шовной сварки
- Усталость материала конструкции в условиях случайного нагружения («виброусталость»)
- Базы данных материалов и историй нагружения
- Биаксиальный анализ, предшествующий анализу усталости в условиях сложного многоосного нагружения
- Программный датчик деформаций и другие утилиты



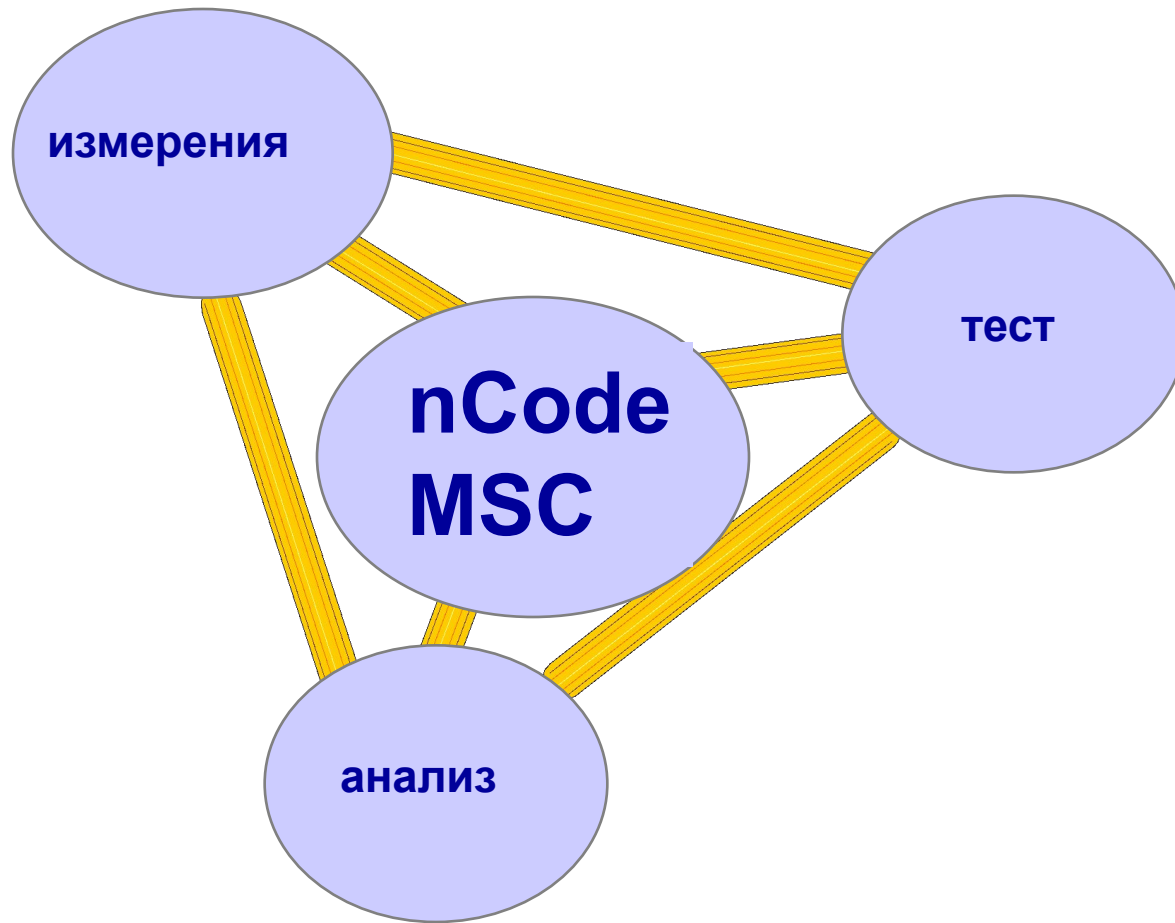
# ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ИНТЕРФЕЙС MSC.FATIGUE

- MSC.Fatigue имеет дружелюбный графический интерфейс пользователя, который состоит из следующих главных компонент:
  - Оконный интерфейс пользователя
  - Интерфейс, позволяющий импортировать КЭ модель и результаты решения
  - Analysis Preferences
  - Опции для инженерного исследования
  - Визуализация результатов

# РЕШЕНИЯ MSC В ОБЛАСТИ СИСТЕМ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА



# РПОГНОЗИРОВАНИЕ ДЛГОВЕЧНОСТИ





*Современные технологии анализа долговечности как  
результат партнерства на высоком уровне*

# ЧТО ТАКОЕ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ?

- Долговечность - это...
  - способность выдерживать эксплуатационные нагрузки без разрушения в течение какого-либо периода времени
- Надежность – это...
  - Вероятность того, что конструкция не разрушится в течение заданного периода времени

- Усталость – это...
  - процесс разрушения материалов под воздействием циклически повторяющихся нагрузок, при этом амплитуда номинальных напряжений меньше даже предела текучести материала;
- А также ...
  - процесс зарождения и последовательного роста трещин как результат развития циклических пластических деформаций;

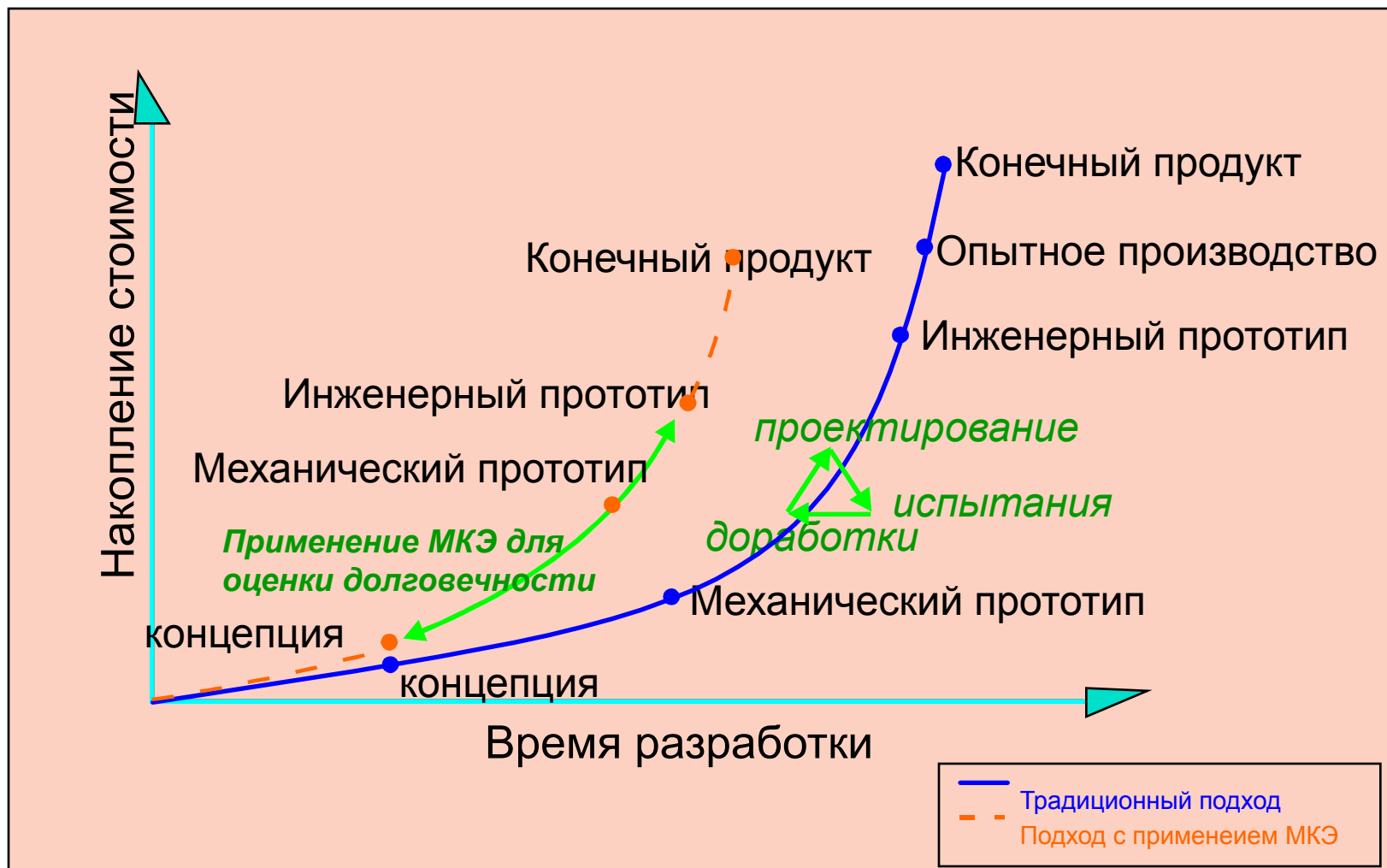
# ЧТО ЗАСТАВЛЯЕТ ПРОГНОЗИРОВАТЬ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ?



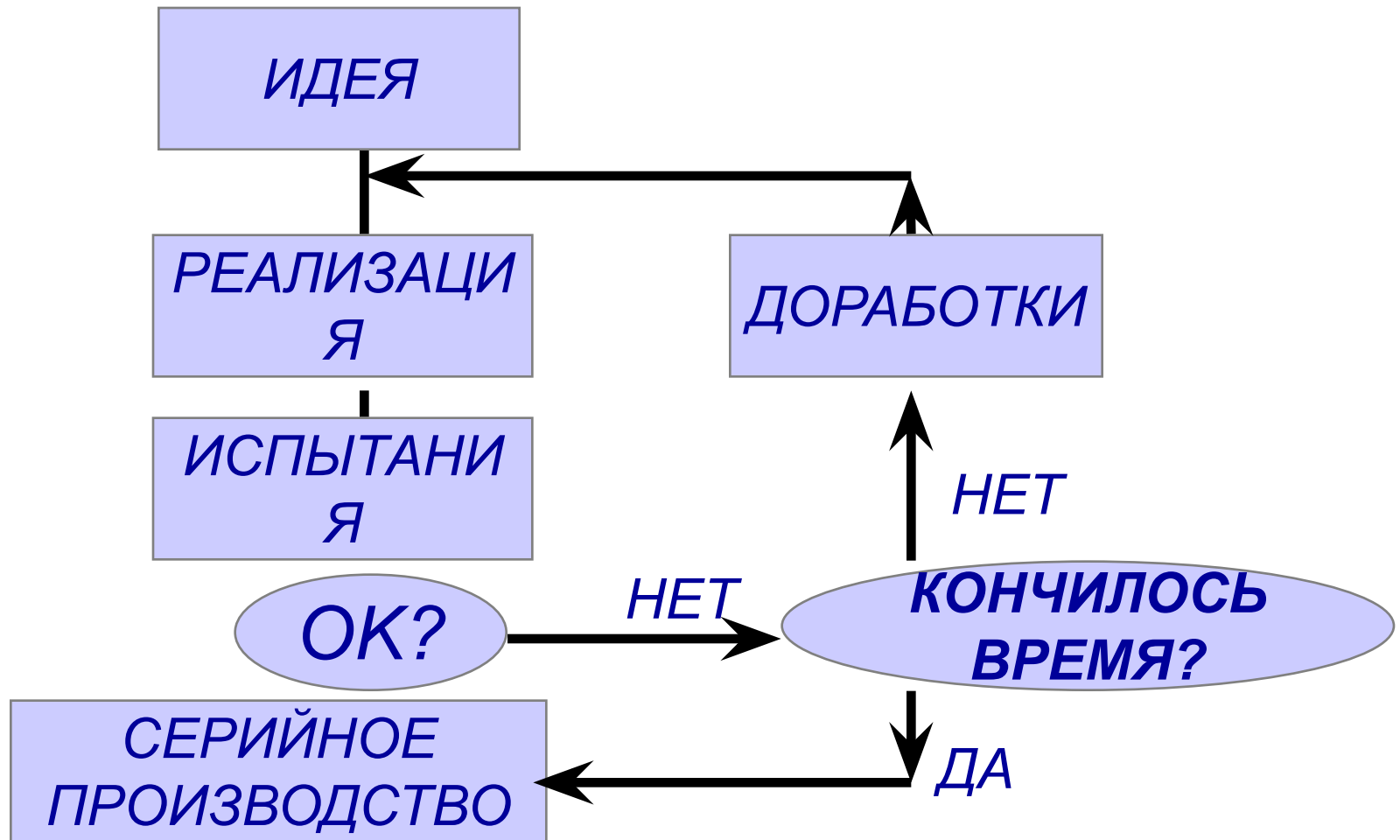
# ЦЕЛИ, ПРИЧИНЫ И РЕАЛЬНОСТЬ

- Конкуренция требует **УСКОРЕННОГО** выхода на рынок новой продукции.
- Чтобы увеличить прибыли надо удешевлять продукцию и в целом производственные процессы, при этом уровень качества не должен падать.
- Рынок требует расширения функциональности изделий с применением высоких технологий.
- Нормативные государственные и отраслевые документы требуют от производителя повышения уровня надежности изделий и уменьшения затрат времени на инспекции и ремонтно-восстановительные работы.
- Потребитель хочет, чтобы последний километр/полет/час работы изделие отработало так как если бы оно было новым.

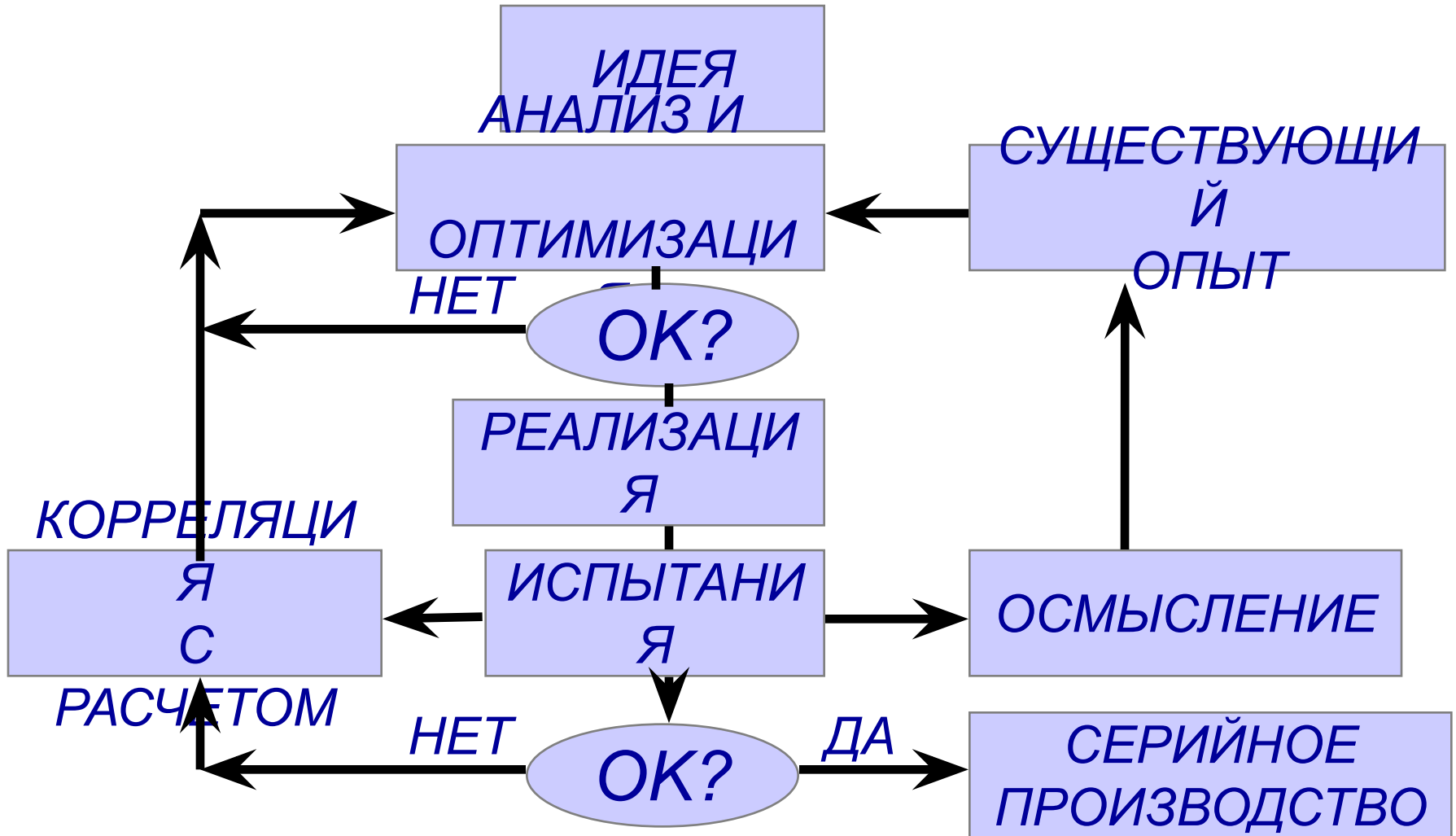
# ИЗМЕНЕНИЕ СТОИМОСТИ ПРОДУКТА В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ



# ТРАДИЦИОННЫЙ ПОДХОД, БЕЗ МКЭ: ПОСТРОИТЬ, ИСПЫТАТЬ, ДОРАБОТАТЬ



# ДОБАВИМ МКЭ: АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ



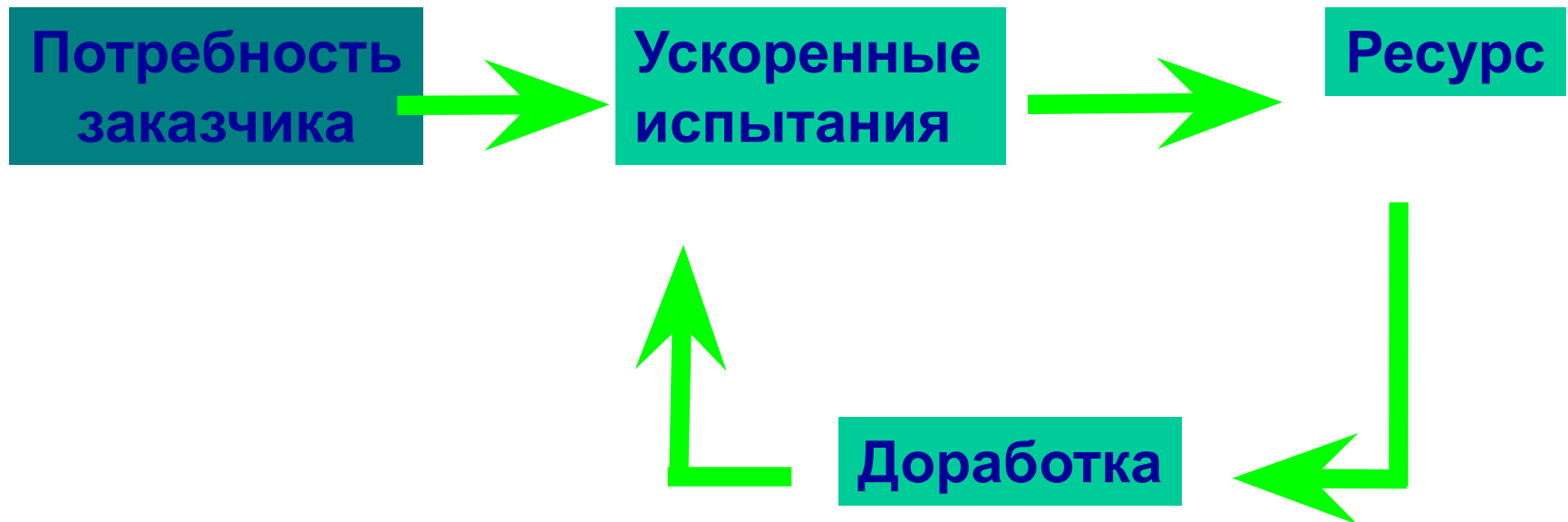
# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ 1 - ПОСТРОИЛ И ИСПОЛЬЗУЙ



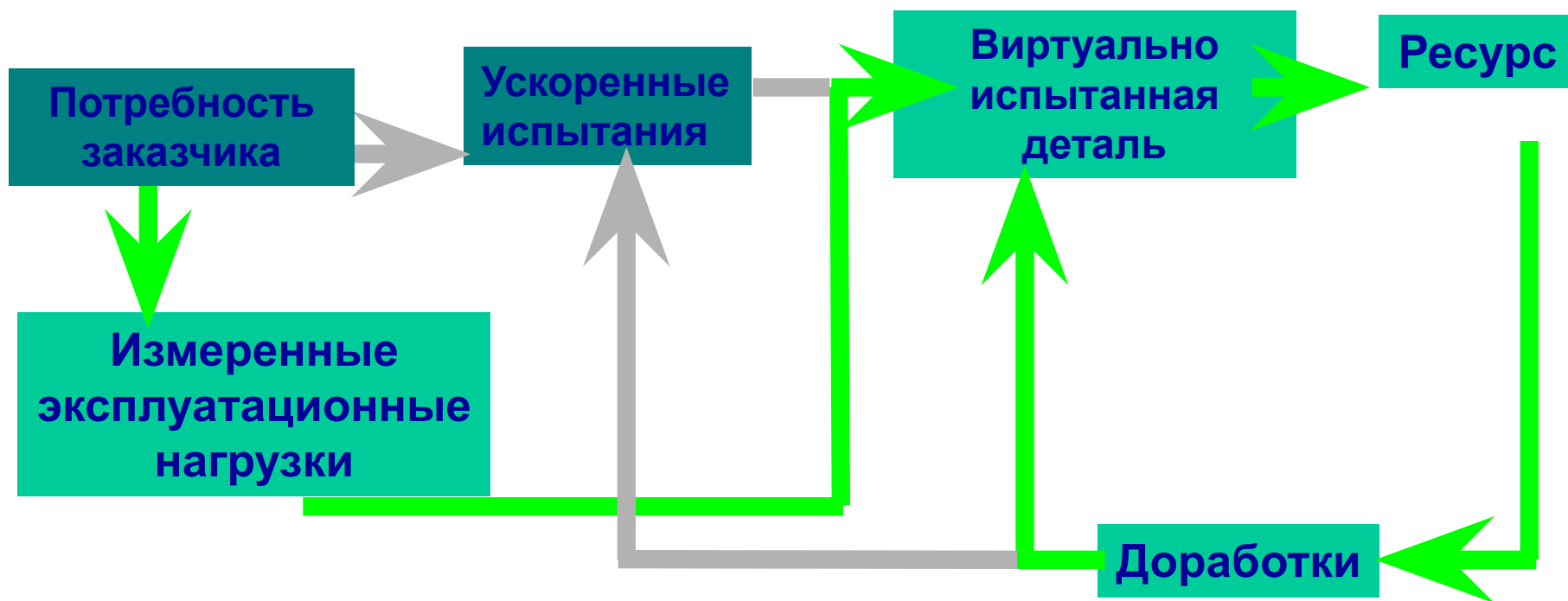
Построил и  
используй

Проверка ресурса в  
процессе  
эксплуатации

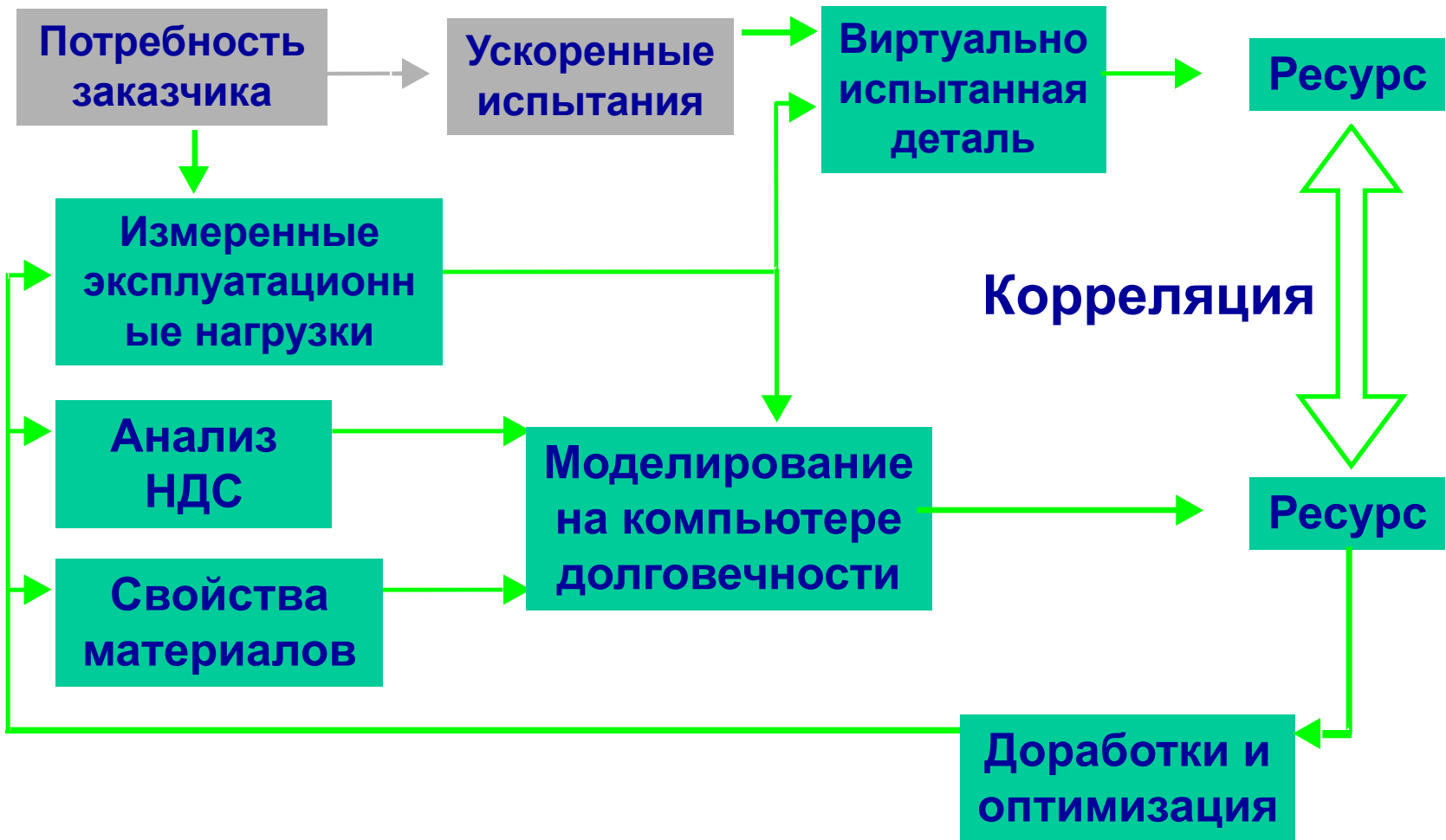
# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ 2 - ДОБАВИМ НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ



# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ 3 - ДОБАВИМ ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

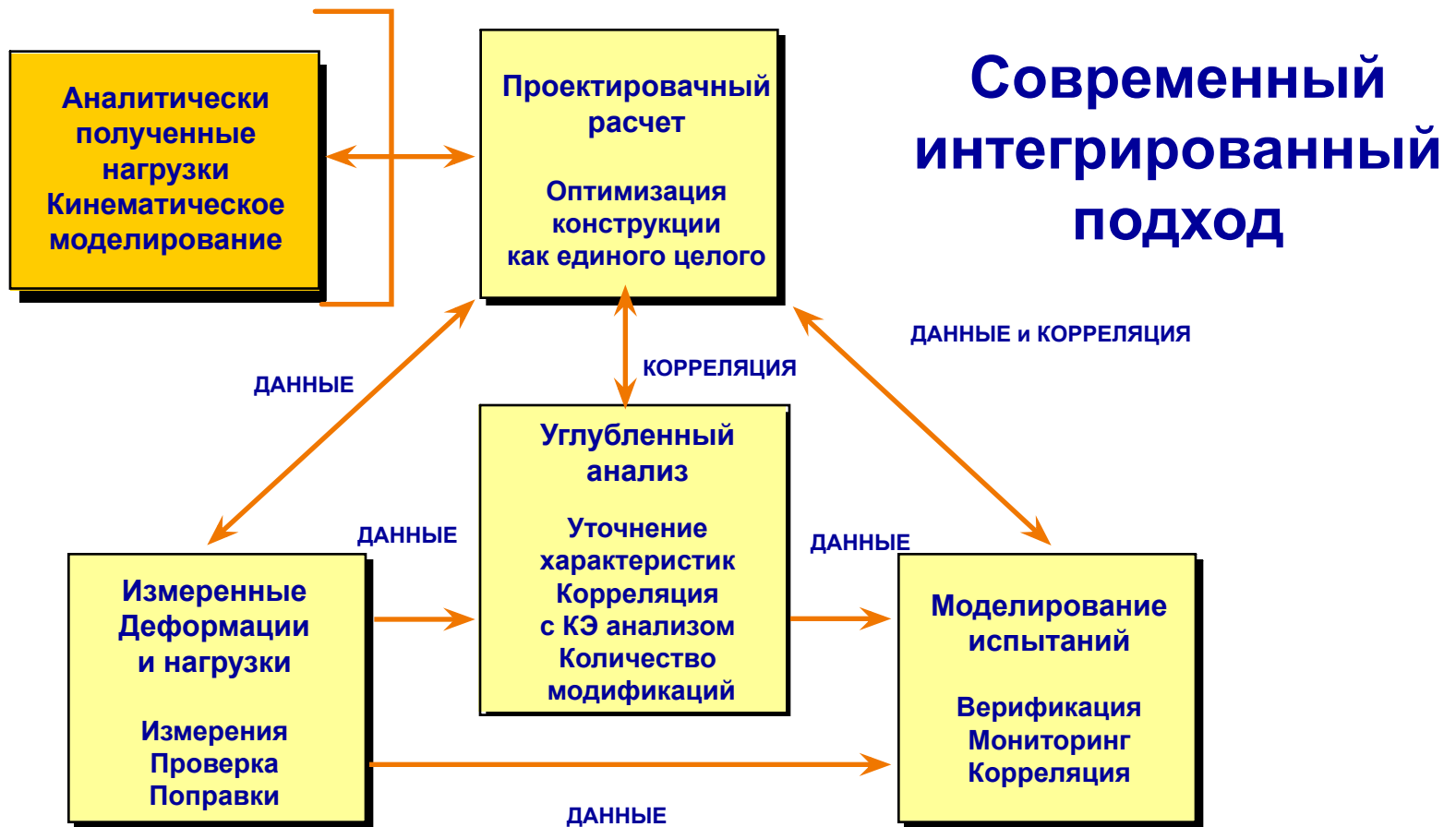


# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ 4 - ДОБАВИМ КЭ АНАЛИЗ





# СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПРОЦЕССА ИНТЕГРИРОВАННОГО АНАЛИЗА ДОЛГОВЕЧНОСТИ



# ИНТЕГРАЦИЯ

- Чтобы быстрее, дешевле, на более высоком уровне интеграции провести анализ долговечности, необходимо:
  - Иметь высокий уровень взаимодействия различных подразделений.
  - Иметь интегрированные программные инструменты, общие для вовлеченных в процесс отделов.
  - Всесторонний обмен данными в рамках структуры предприятия.
  - Всесторонний обмен данными между компанией и смежниками, а также сервисными службами.

# ПОДХОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ УСТАЛОСТИ

- Концепция отсутствия повреждений (SAFE LIFE)
  - Вычисляется долговечность, используется коэффициент безопасности, конструкция проектируется так, чтобы заданный ресурс был обеспечен, после выработки ресурса эксплуатация полностью прекращается.
- Концепция безопасного разрушения (FAIL SAFE)
  - Конструкция обеспечивается избыточными, страхующими элементами. Разрушение должно произойти без потери несущей способности всей конструкции в целом. Страхующие элементы должны обеспечить необходимый уровень безопасности до проведения в соответствии с регламентом ближайших ремонтно-восстановительных работ.
- Концепция контроля разрушения (DAMAGE TOLERANCE)
  - Заранее предполагается наличие повреждений определенных размеров. При проектировании анализируется время роста трещин до критического размера. Исходя из этих расчетов назначается регламент ремонтно-восстановительных работ.

# КАК ЭТО БЫЛО РАНЬШЕ

Избыток прочности – 42 детали  
Разрушилось – 7 деталей



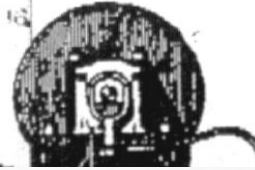
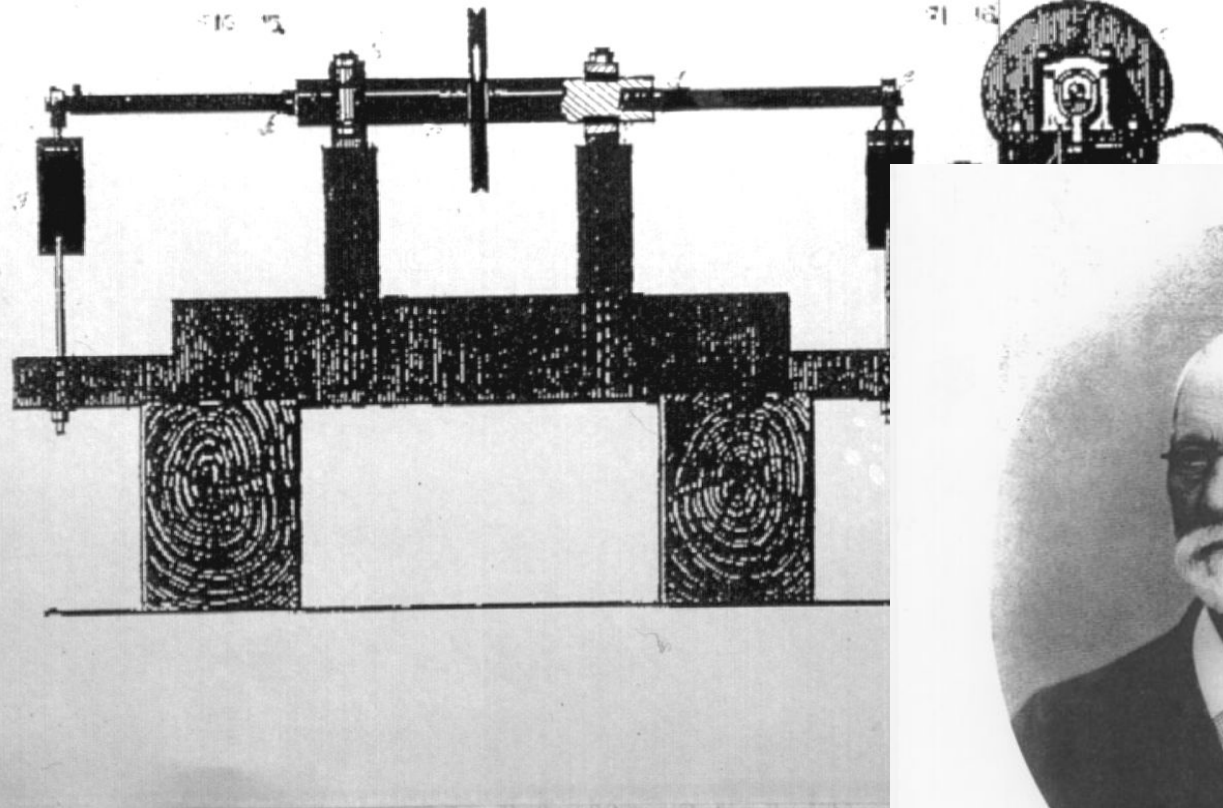
Оценка долговечности было делом редким

# ОБЗОР ИСТОРИИ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТИ - 1

- 1828 Альберт испытывает металлические цепи под действием циклических нагрузок
- 1839 Понселет проектирует мельничные колеса с чугунными осями. В его книге по механике впервые встречается термин «Усталость»
- 1849 Широко обсуждается теория кристаллизации
- 1850 Август Веллер проводит первые систематические исследования усталости осей железнодорожного состава. Им были проведены усталостные испытания осей в условиях кручения и изгиба. Впервые строятся кривые усталости и вводится понятие предела усталости. Проблеме усталости начинают уделять больше внимания, появляется много работ на эту тему. Выясняется принципиальное значение циклических напряжений, а также уровня средних напряжений.

that they run truly on the axis,  $a$ , and  
ends are then fitted with the bearings,  $cc$ . 10  
these bearings are attached the spring dynamo-  
meters,  $gg$ , by the aid of which any desired load  
was imposed upon the test rods.

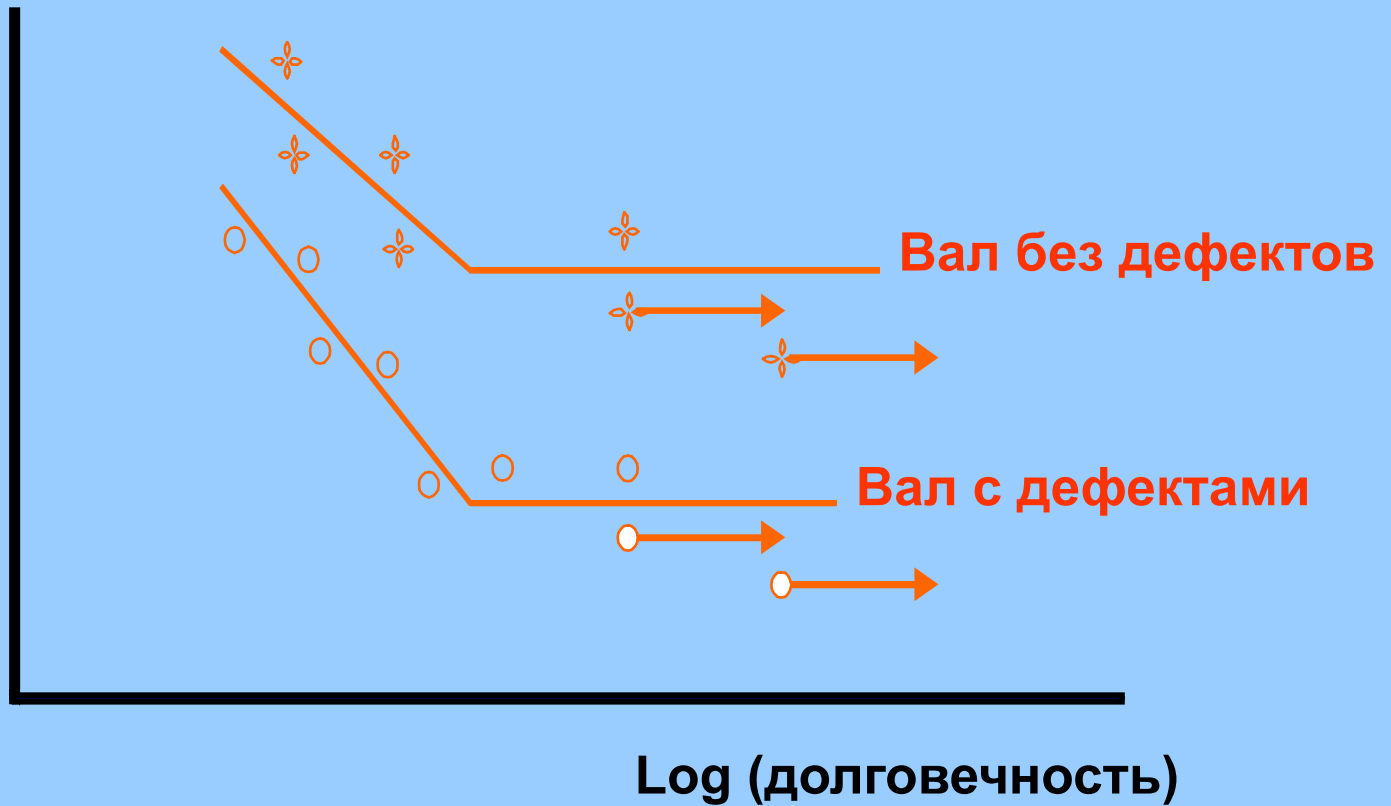
317  
In Krupp's steel bars of  
form, Nos. 41 to 45 inclusive, the differences be-  
tween the diameters of the parts marked  $d'$  and  $d''$ , on  
the diagram E, were as follows: In No. 41, the



August Wöhler (1819 - 1914)

Испытательная установка Велера для  
исследования усталости осей  
железнодорожного транспорта

## Амплитуда напряжений



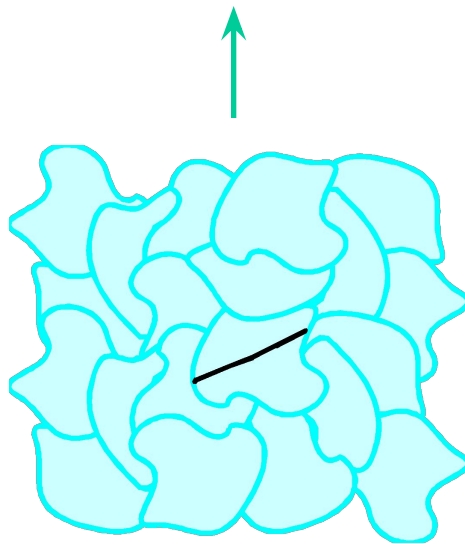
Типичные кривые Велера построенные при изгибно-крутильном циклическом нагружении

# ОБЗОР ИСТОРИИ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТИ - 2

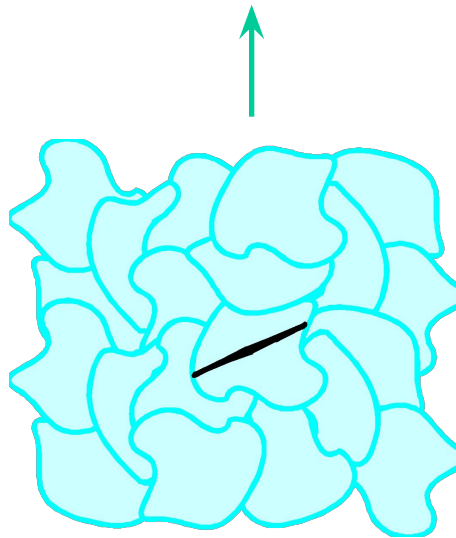
- 1864 Фэирбэйрн экспериментирует с повторяющимися нагрузками
- 1886 Баушингер – первые доклады о свойствах петли гистерезиса
- 1903 Ирвинг и Хамфри опровергают теорию кристаллизации и показывают, что причиной усталости являются зоны скольжения
- 1910 Баирстоу открывает явления циклического упрочнения и разупрочнения
- 1920 Гриффитс исследует трещины в стекле. Его работы стали причиной появления новой науки, которую назвали механика разрушения.



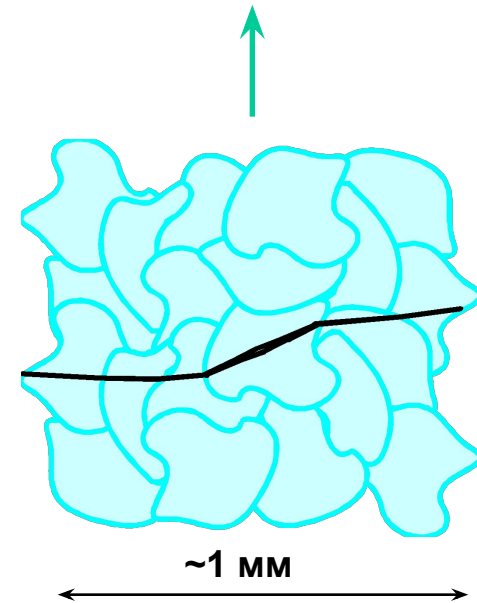
# ЗАРОЖДЕНИЕ И РОСТ ТРЕЩИН – ЭТАПЫ 1 И 2



Формирование  
устойчивых  
зон скольжения

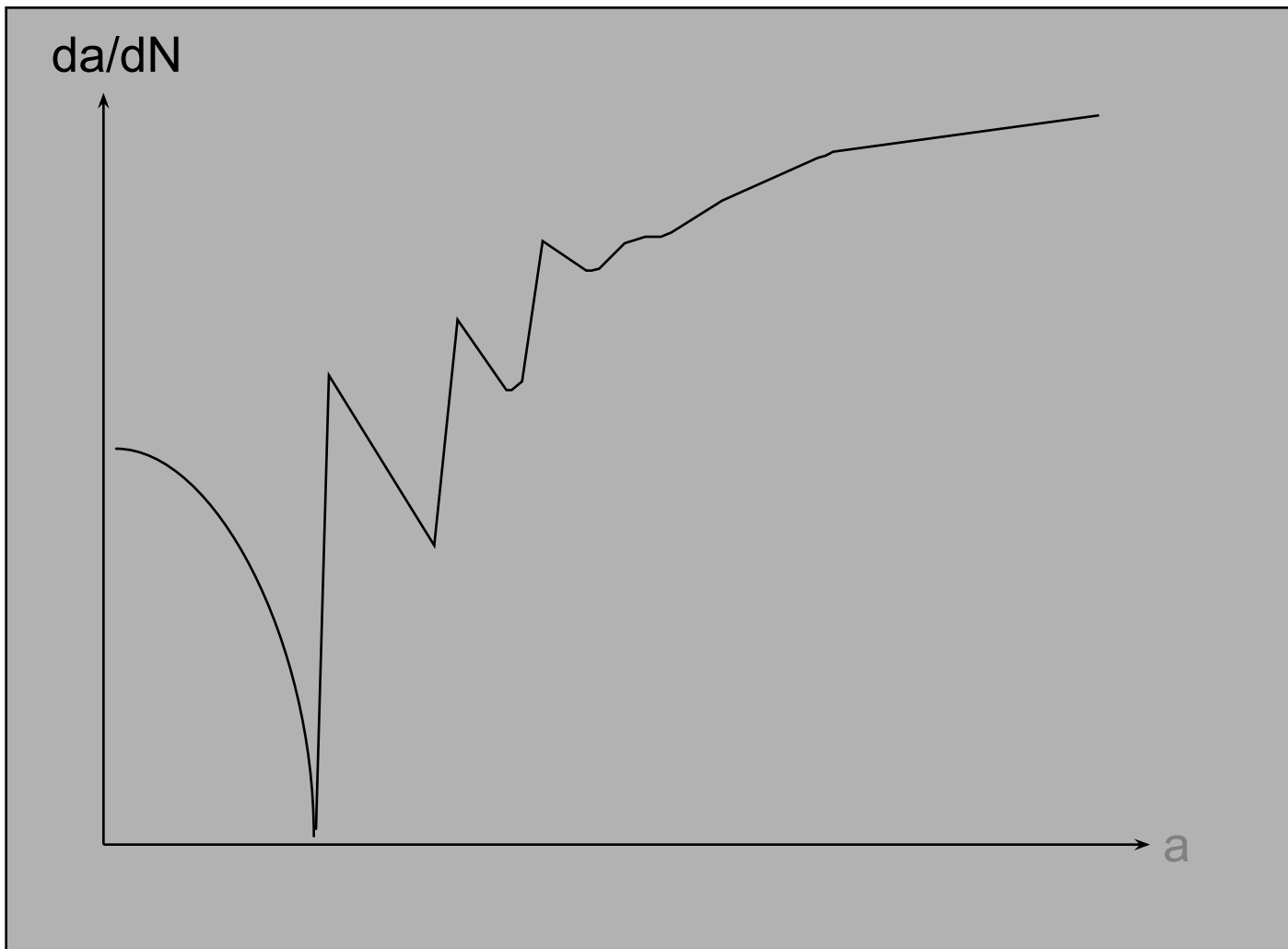


Этап 1  
Рост трещины



Этап 2  
Рост трещины

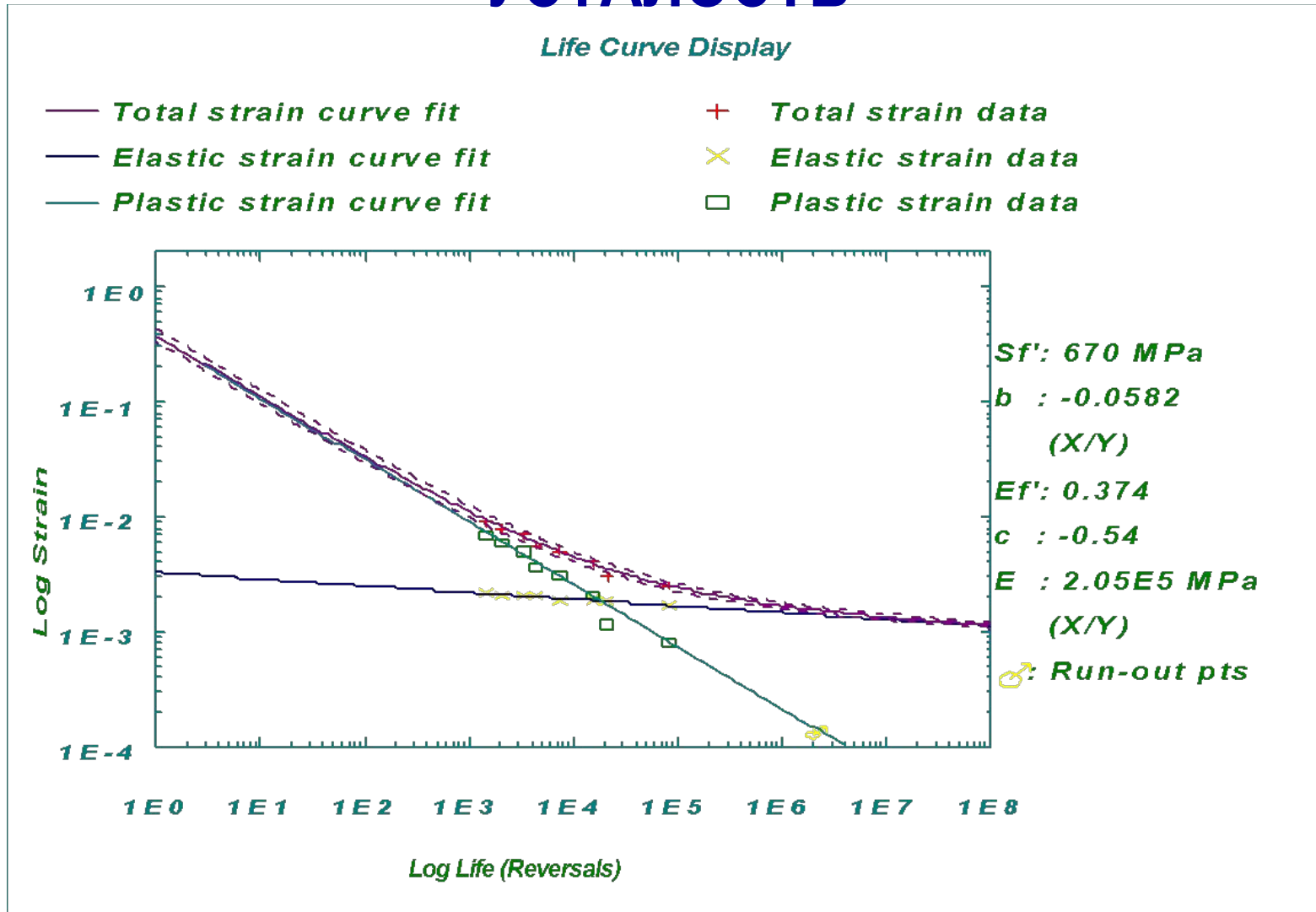
# МИКРОСТРУКТУРНЫЙ РОСТ ТРЕЩИН



# ОБЗОР ИСТОРИИ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТИ - 3

- 1955 Коффин и Менсон исследовали процесс усталости, контролируя деформации, термоциклирование, малоцикловая усталость.
- 1959 Парис и Эрдоган представили первый систематический метод для анализа скорости роста трещин основанный на выводах линейной механики разрушения
- 1961 Форсайт обнаружил и исследовал стадийность роста трещин
- 1961 - Нейбер предложил метод для оценки упруго-пластических напряжений и деформаций в концентраторе
- 1968 - Матсуиши и Эндо представили метод падающего дождя для схематизации циклов нагружения

# РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО ИСПЫТАНИЯМ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ



# ОБЗОР ИСТОРИИ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТИ - 4

- 1982 - США оценили ежегодные потери, причиной которых являются усталостные разрушения – это 4.4% валового национального продукта страны (миллиарды долларов). Кроме того, было подсчитано, что потери можно сократить на треть, активно применяя существующие технологии
- 1982 - nCode International начинает свою деятельность на рынке программного обеспечения и сервиса в области анализа долговечности конструкций
- 1990 - Проект создания MSC.Fatigue инициирован компанией PDA Engineering

# МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ

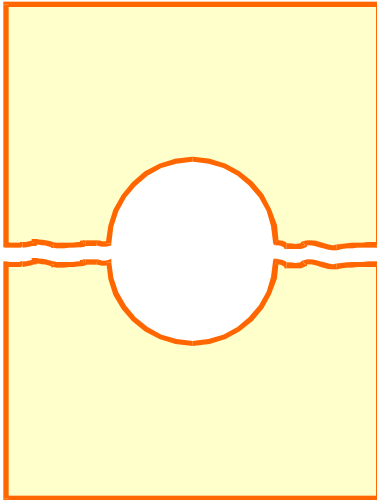
- S-N (метод суммарной долговечности)
  - Отражает зависимость долговечности от номинальных или локальных упругих напряжений
- e-N (метод номинальных деформаций)
  - Отражает зависимость долговечности от локальных деформаций
- LEFM (метод оценки скорости роста трещин)
  - Характеризует скорость роста трещины
- Все методы основаны на принципе подобия

$$N_f = N_i + N_p$$

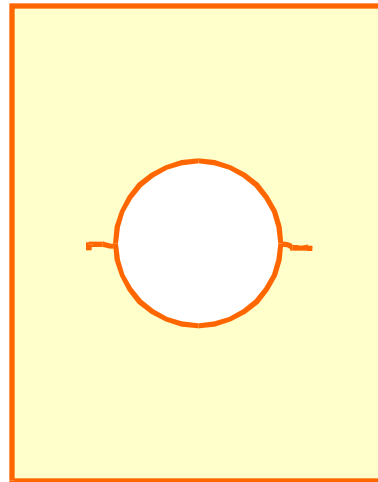
---

Суммарная  
долговечность

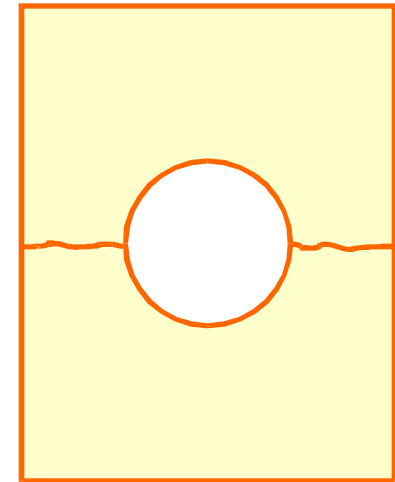
= зарождение трещины + Рост



S-N

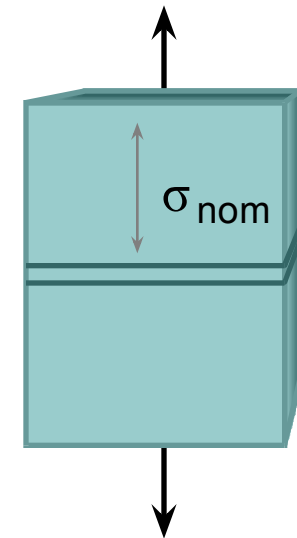


локальные деформации



линейная  
механика  
разрушения  
(LEFM)

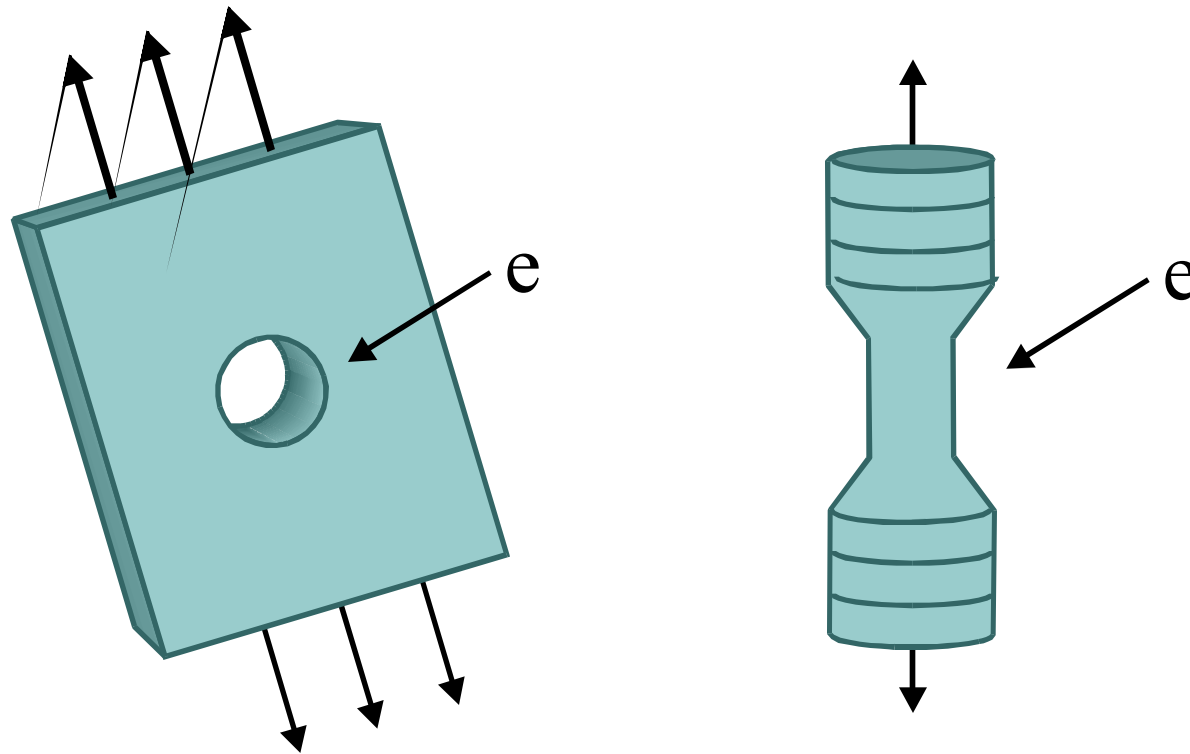
# S-N МЕТОД - ПОДОБИЕ



*Долговечность здесь . . . . . Такая же как здесь . . . . .  
В обоих случаях номинальные напряжения одинаковы*

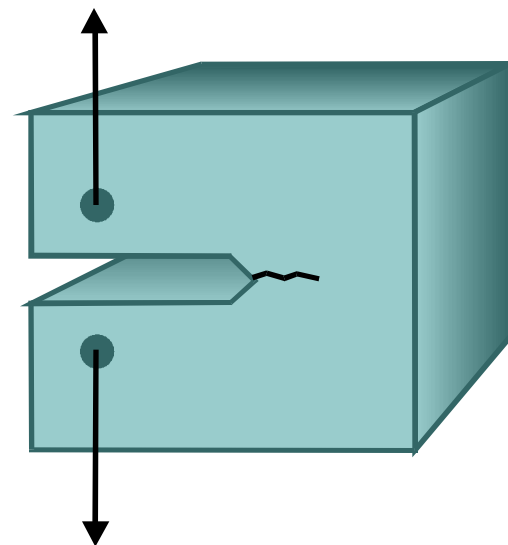
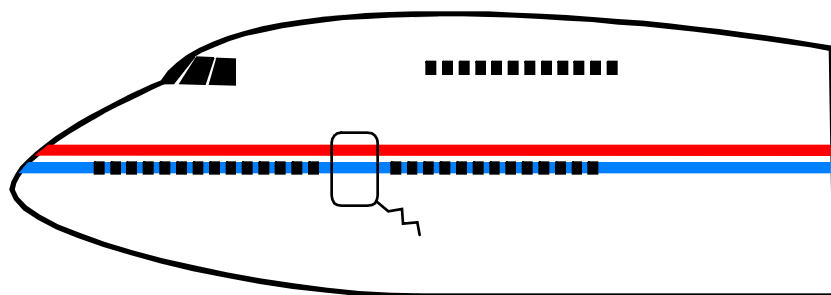


# МЕТОД НОМИНАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ - ПОДОБИЕ



*Долговечность детали с концентратором сравнима с долговечностью образца, испытанного в условиях жесткого нагружения (измеренные деформации на образце соответствуют локальным деформациям в концентраторе – см. рис.)*

# АНАЛИЗ СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИНЫ - ПОДОБИЕ



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

# УСТАЛОСТНЫЕ РАЗРУШЕНИЯ И ПРОГРЕСС

«Несмотря на более чем 150-ти летний опыт исследований в области усталости материалов, внештатные случаи разрушения все еще случаются.

Большой объем исследований не уменьшает количество разрушений. Для этого требуется более глубокое изучение проблемы»

-профессор Д. Сочи  
Университет штата Иллинойс, 1990

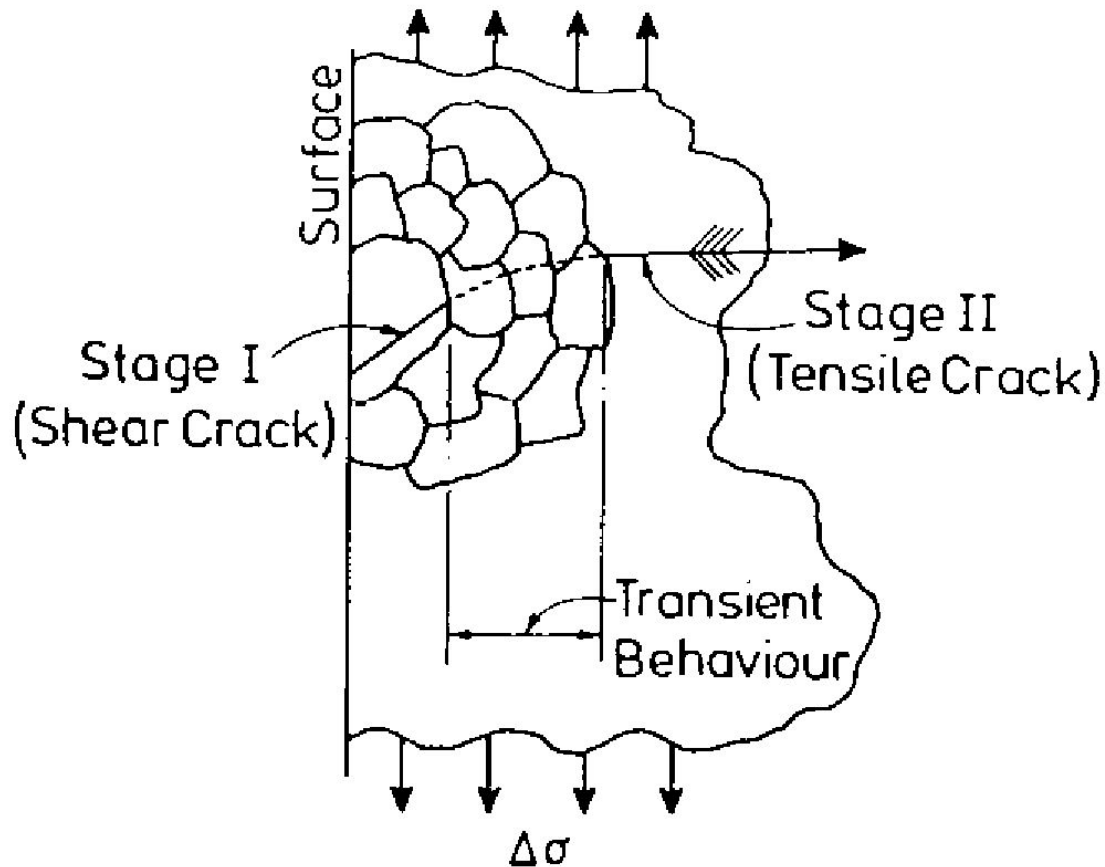
# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСТАЛОСТИ

- Типичным местом, в котором начинается разрушение, является поверхность образца или детали
- Усталостное разрушение начинается с появления микроскопических трещин. На этом этапе микротрещины очень чувствительны к даже минутному воздействию циклических напряжений
- Как уже отмечалось, процесс усталостного разрушения протекает в условиях знакопеременных пластических деформаций

# ЗОНЫ СКОЛЬЖЕНИЯ И 1-ый ЭТАП РОСТА ТРЕЩИНЫ

- В процессе циклического нагружения устойчивые зоны скольжения стремятся объединиться в группы и проявляются в виде полос на поверхности, образуя экструзии и интрузии.
- Очевидно интрузии и являются причинами появления будущих трещин.
- Начальный размер экструзий и интрузий составляет от 1 до 10 микрон.

# ЗАРОЖДЕНИЕ И РОСТ ЭТАПЫ РОСТА ТРЕЩИНЫ



# ЗАРОЖДЕНИЕ И РОСТ

- Процесс усталостного разрушения происходит в несколько этапов, при этом трещина вырастает из микроскопических размеров в зонах скольжения до большой трещины в упруго-пластическом континууме и может продолжить свой рост до полного разрушения.
- Существует много причин зарождения малых трещин:
  - Растрескивание или разрыхление материала на второй стадии
  - Устественные царапины и заводские метки на поверхности
  - Коррозионные раковины или межкристаллические разрушения
  - Дефекты литья
  - Перехлесты, получившиеся послековки или формовки
  - Охрупчивание упрочненных слоев у поверхности

# ИСПЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТАЛОСТНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

- Технологии усталостного расета не новы (50-170 лет);
- Представляют собой преимущественно набор эмпирических правил, построенных на основе наблюдаемых эффектов;
- Считается, что инженеру, использующему эти методы, не надо вникать во все тонкости;
- В процессе использования (при этом необходимы обучение и практика) могут быть доведены до уровня интеллектуальной базы данных.



# УСТАЛОСТНЫЙ АНАЛИЗ...?

- На стадии ранней фазы разработки:
  - Нагрузки получены аналитически или из предыдущего проекта, предполагаемые свойства материалов, первые попытки оптимизации
- В процессе окончательной проработки:
  - Нагрузки измерены, реальные свойства, усовершенствование и оптимизация
- Производственная фаза:
  - После выхода промышленной продукции можно заняться модификацией и усовершенствованием, а также новыми разработками для завоевания новых рынков. Продолжается «пожаротушение».

# КТО ПРОВОДИТ УСТАЛОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ И КАК ИСПОЛЬЗУЮТСЯ РЕЗУЛЬТАТЫ?

- Проектировщик:
  - Оптимизация долговечности по виртуальной модели детали
- Расчетчик
  - Сравнивает расчетные данные с результатами испытаний, выдает рекомендации по исправлению ошибок.
- Испытатель
  - Планирует проведение испытаний таким образом, чтобы получить данные о наиболее опасных местах. Таким образом предварительный расчет позволяет сэкономить время.
- Технолог
  - Исследует случившиеся в процессе эксплуатации разрушения и выдает рекомендации по усовершенствованию технологии производства.

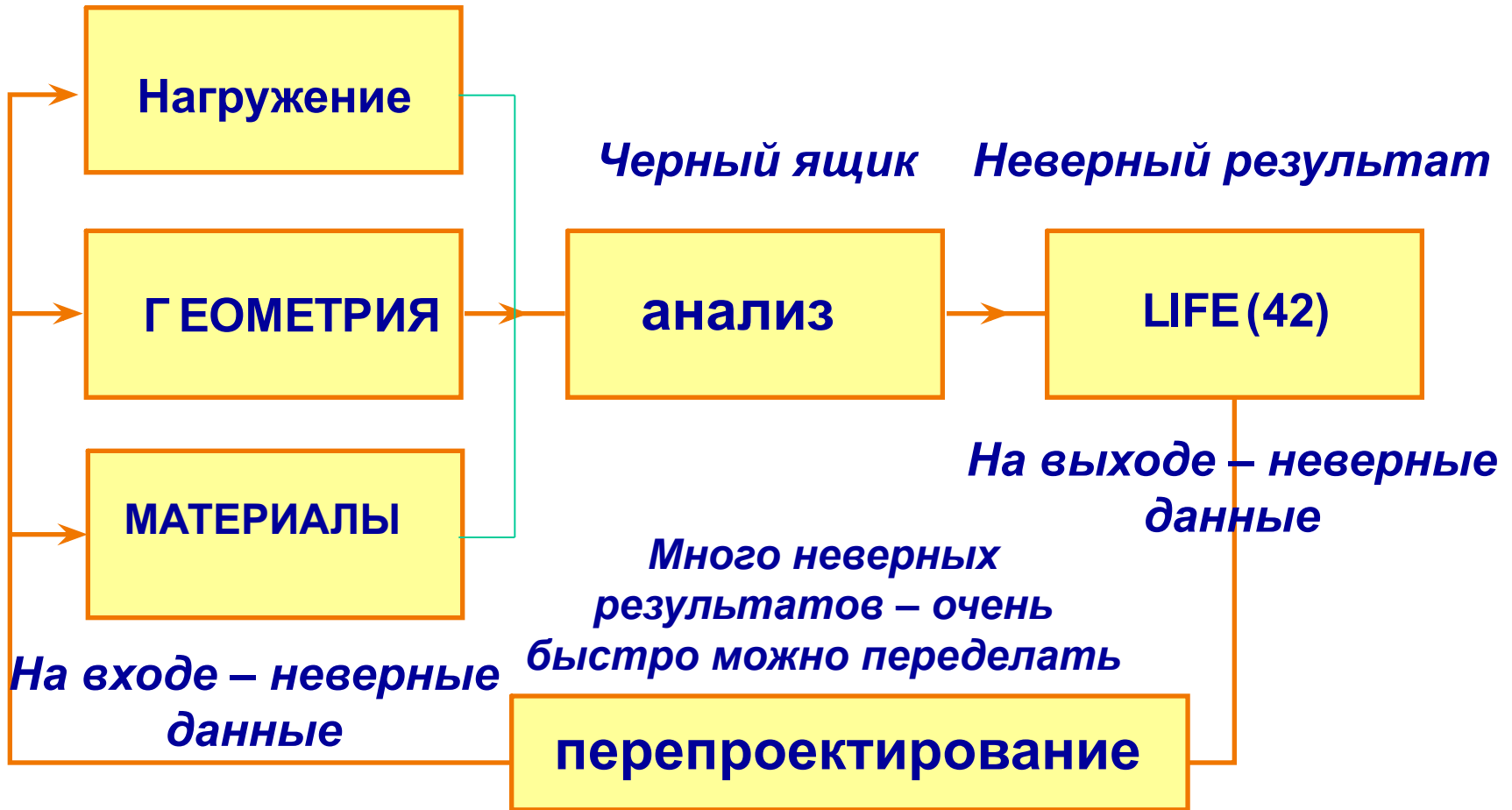
# ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ РАЗРУШЕНИЙ

- Требования:
  - Повышенные потребительские качества
  - Уменьшение веса
  - Долгий срок службы
  - Разумная цена
  - Как можно быстрее

# ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ РАЗРУШЕНИЙ

- Ограничения:
  - Усталостные расчеты намного менее точны прочностных
  - Усталостные свойства материалов не могут быть получены из статических механических свойств
  - Лабораторные испытания часто дают очень приблизительный результат, кроме того в лабораторных условиях трудно провести полномасштабные испытания изделия или даже детали
  - Очень часто требуется проведение полномасштабных натурных испытаний для подтверждения назначенного ресурса
  - Чаще всего необходимо делать конструкцию так, чтобы рост трещин протекал медленно, при этом ближайшая проверка должна выявить их наличие (то есть в соответствии с концепцией 'damage tolerant')
  - Там, где это возможно, необходимо проектировать так изделие, чтобы полностью исключить возможность появления трещин (в соответствии с концепцией 'fail safe')

# РЕАЛИЗАЦИЯ УСТАЛОСТНЫХ РАСЧЕТОВ – БЛОК-СХЕМА ИЗ 5-ти БЛОКОВ



# РЕАЛИЗАЦИЯ УСТАЛОСТНЫХ РАСЧЕТОВ

- Информация, которая необходима для проведения быстрого и эффективного усталостного расчета, может быть разделена на следующие группы:
  - Описание условий нагружения
  - Описание геометрии
  - Специфическая информация о поведении материала в условиях циклически повторяющихся нагрузок, а также усталостные свойства материалов

# ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА И ИСПЫТАНИЙ

- Инструменты, применяемые при усталостном анализе, также применяются в проектировочных расчетах и при испытаниях:
  - одни для всех файлы с историей нагружения
  - один для всех банк данных по свойствам материалов
  - одинаковые алгоритмы исследования усталости
- Разница между расчетчиком и испытателем состоит в том, что один использует КЭ модель, в то время, как другой пользуется датчиком деформаций.

# ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

- Факты:
  - Натурные испытания далеко не самый правильный способ для оптимизации конструкции, однако они всегда необходимы для подтверждения полученных расчетным путем характеристик.
  - Каждый усталостный анализ требует подтверждения испытаниями и наличия информации, полученной экспериментальным путем.
  - Как испытания, так и анализ не дают в отдельности правильный результат.
  - Лучшие результаты достигаются в случае применения интегрированного подхода, объединяющего анализ и испытания.



# ЧЕМ ИСПЫТАНИЯ ПОМОГАЮТ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАСЧЕТОВ

- Обеспечивают данными о нагружении
- Обеспечивают усталостными свойствами материалов
- Позволяют верифицировать напряжения/деформации полученные в расчете
- Подтверждение прогнозированного ресурса
- Только испытания могут окончательно подтвердить расчеты

# КАК АНАЛИЗ СОЧЕТАЕТСЯ С ИСПЫТАНИЯМИ

- Позволяет исключить избыточные испытания
- Ускоряет процесс испытаний
- Позволяет заранее и точнее выбрать тип и месторасположение датчиков
- Участие в подготовке испытаний

Искусство инженера состоит в умении отличить примерное решение, но правдивое от точного, но ложного.

-профессор Род Смит  
Шеффилдский Университет, 1990