

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)
 - Дмитрий Валентинович Слезкин (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

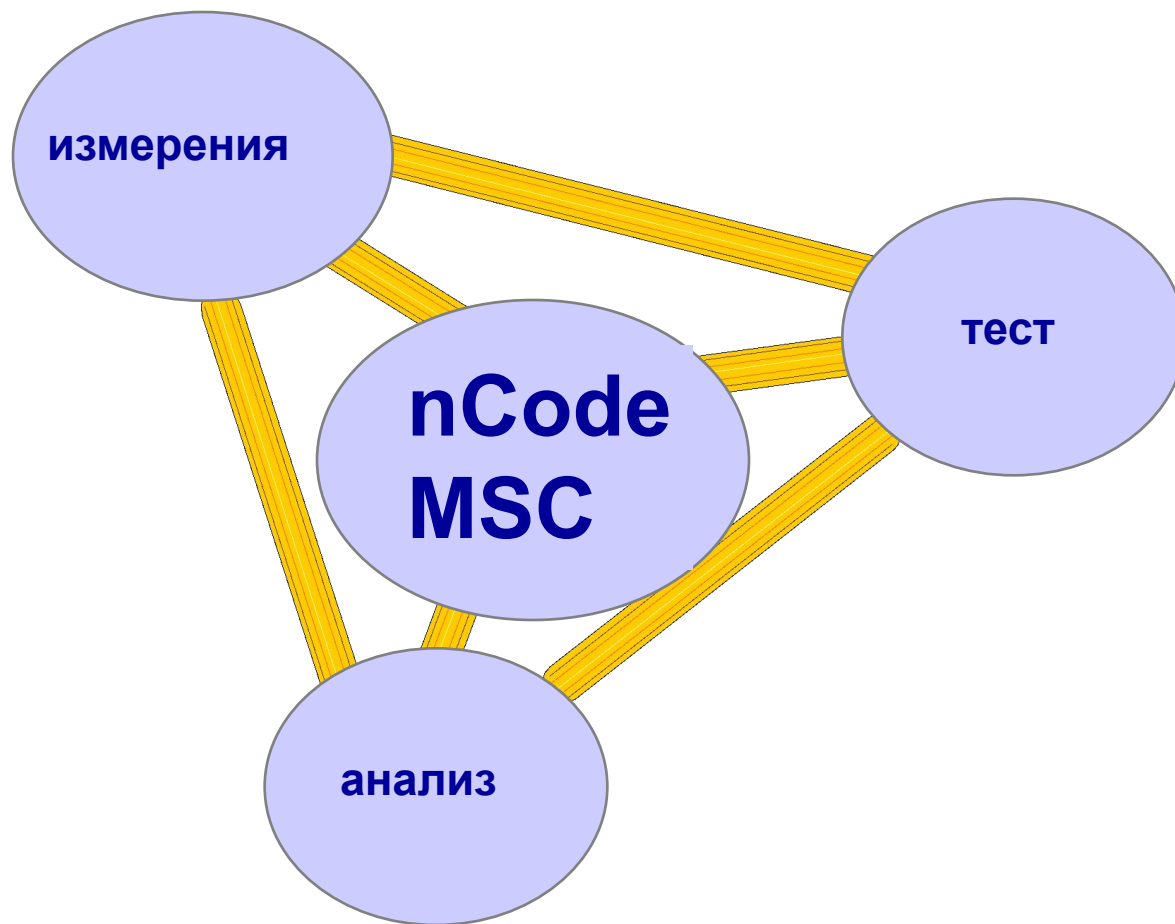
ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ИНТЕРФЕЙС MSC.FATIGUE

- 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?

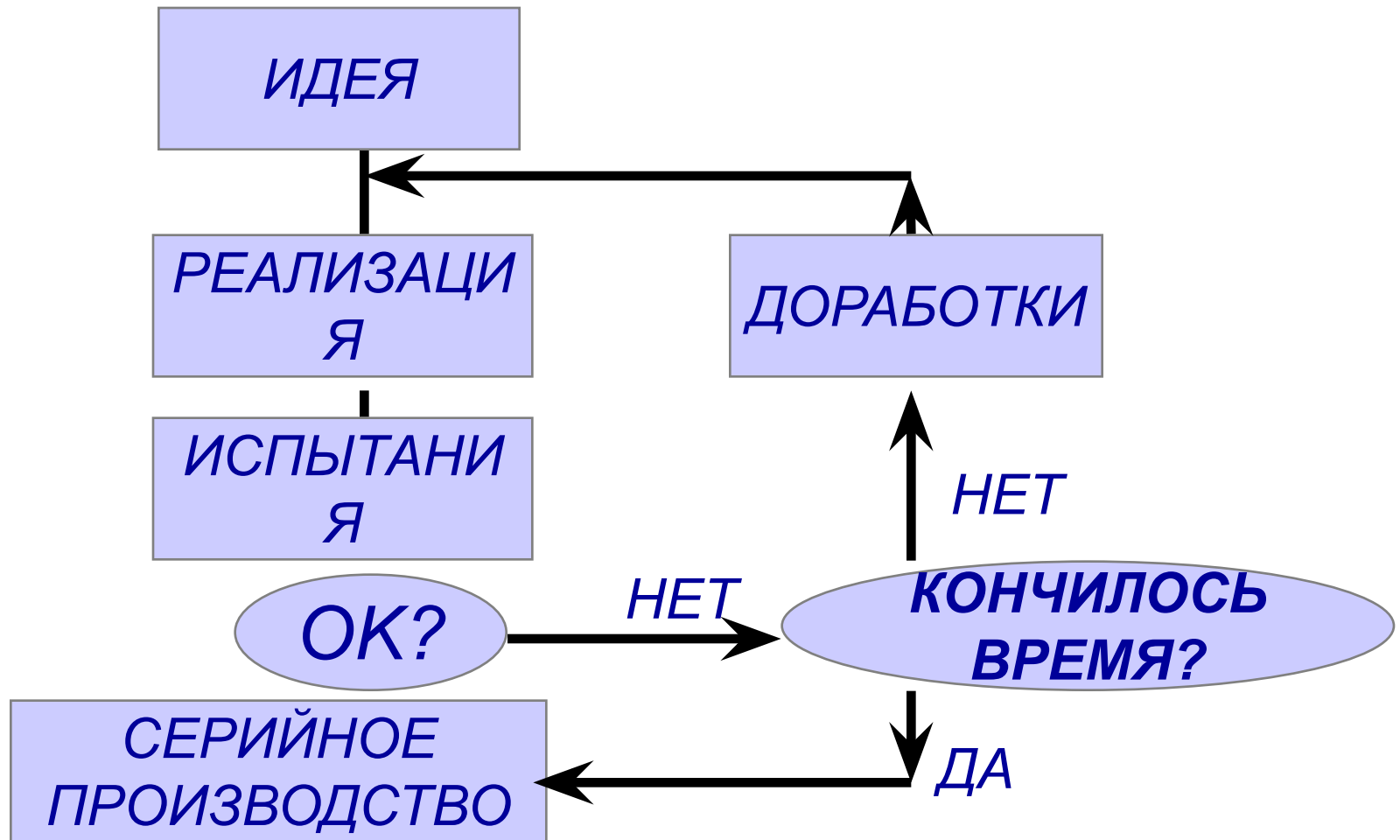
ЦЕЛИ, ПРИЧИНЫ И РЕАЛЬНОСТЬ

- 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.

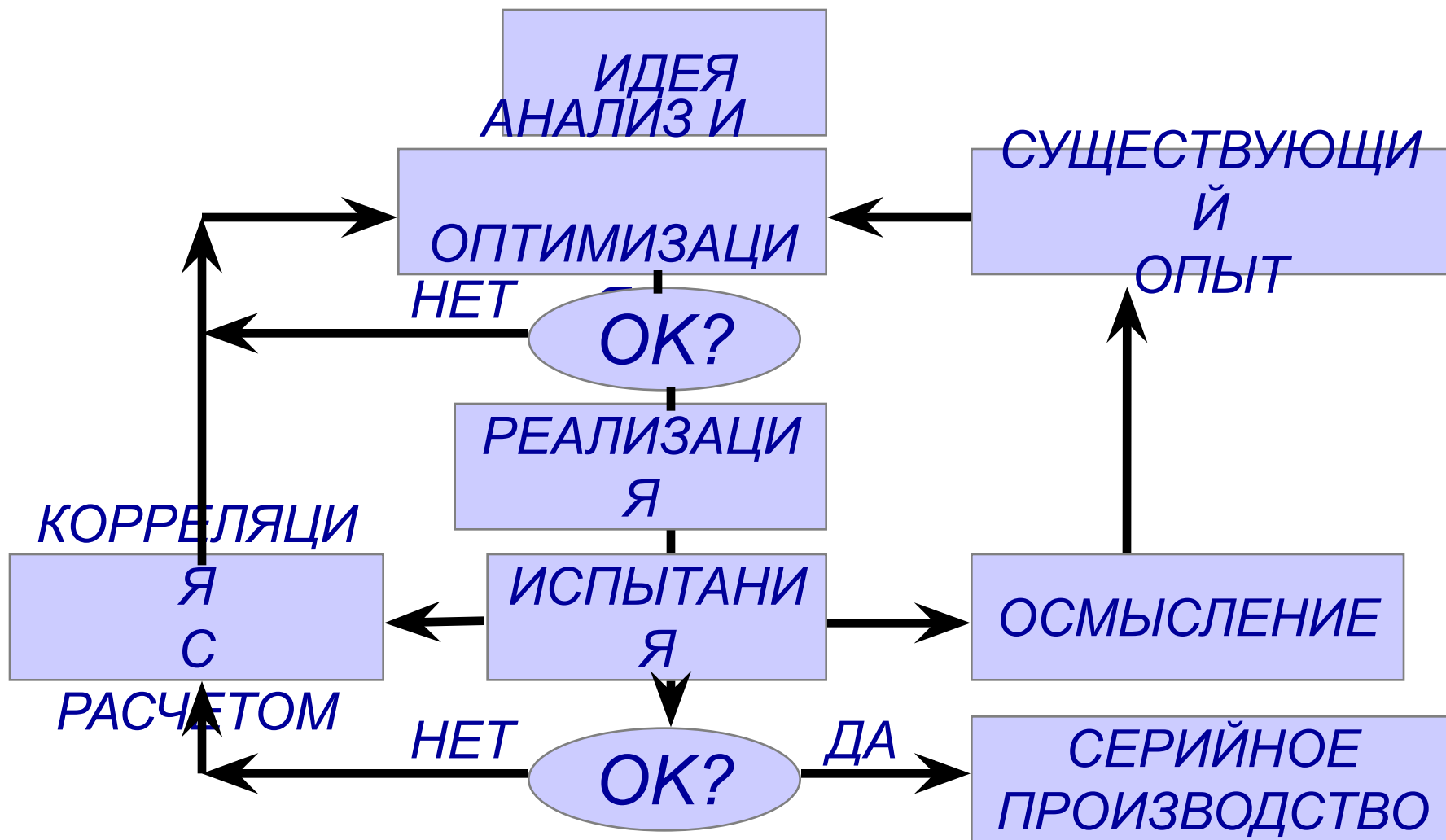
ИЗМЕНЕНИЕ СТОИМОСТИ ПРОДУКТА В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ



ТРАДИЦИОННЫЙ ПОДХОД, БЕЗ МКЭ: ПОСТРОИТЬ, ИСПЫТАТЬ, ДОРАБОТАТЬ



ДОБАВИМ МКЭ: АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ 1

- ПОСТРОИЛ И ИСПОЛЬЗУЙ

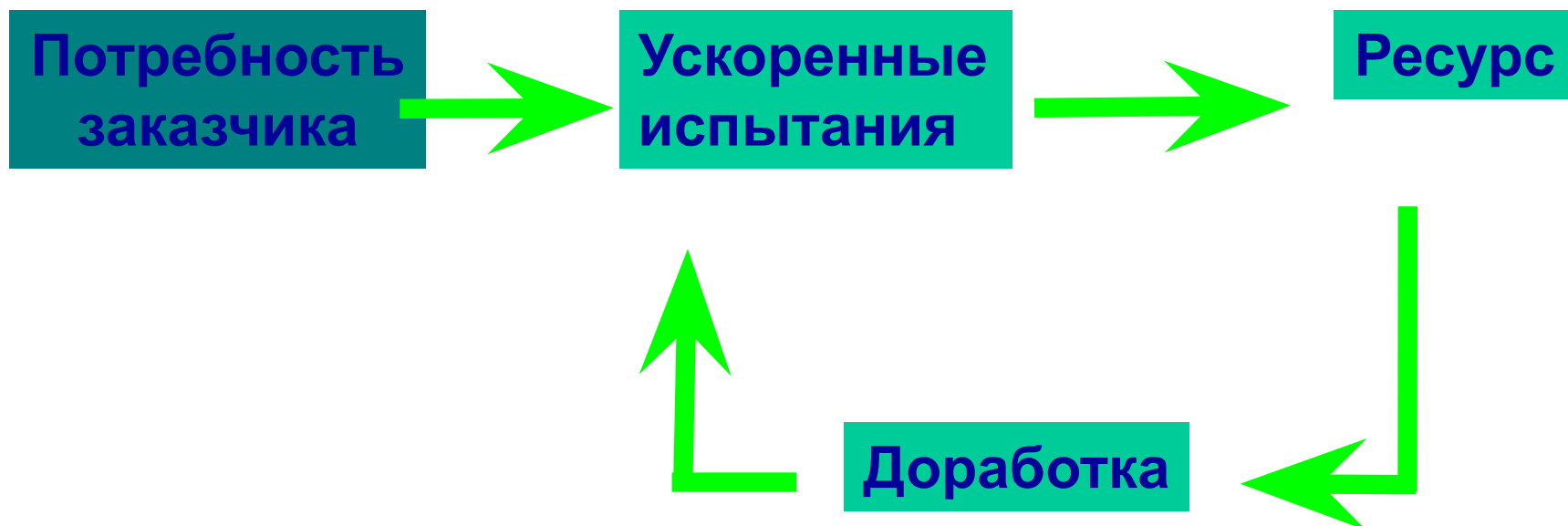


Построил и
используй

Проверка ресурса в
процессе
эксплуатации

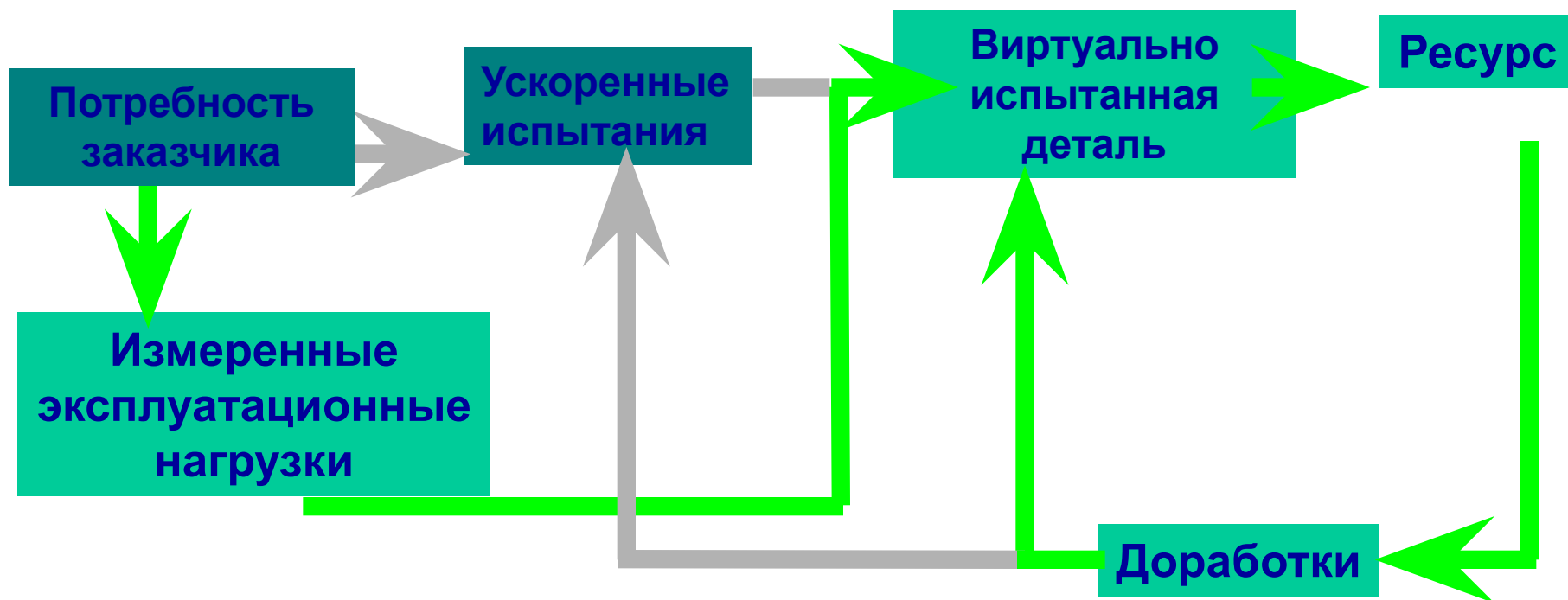
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ 2

- ДОБАВИМ НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

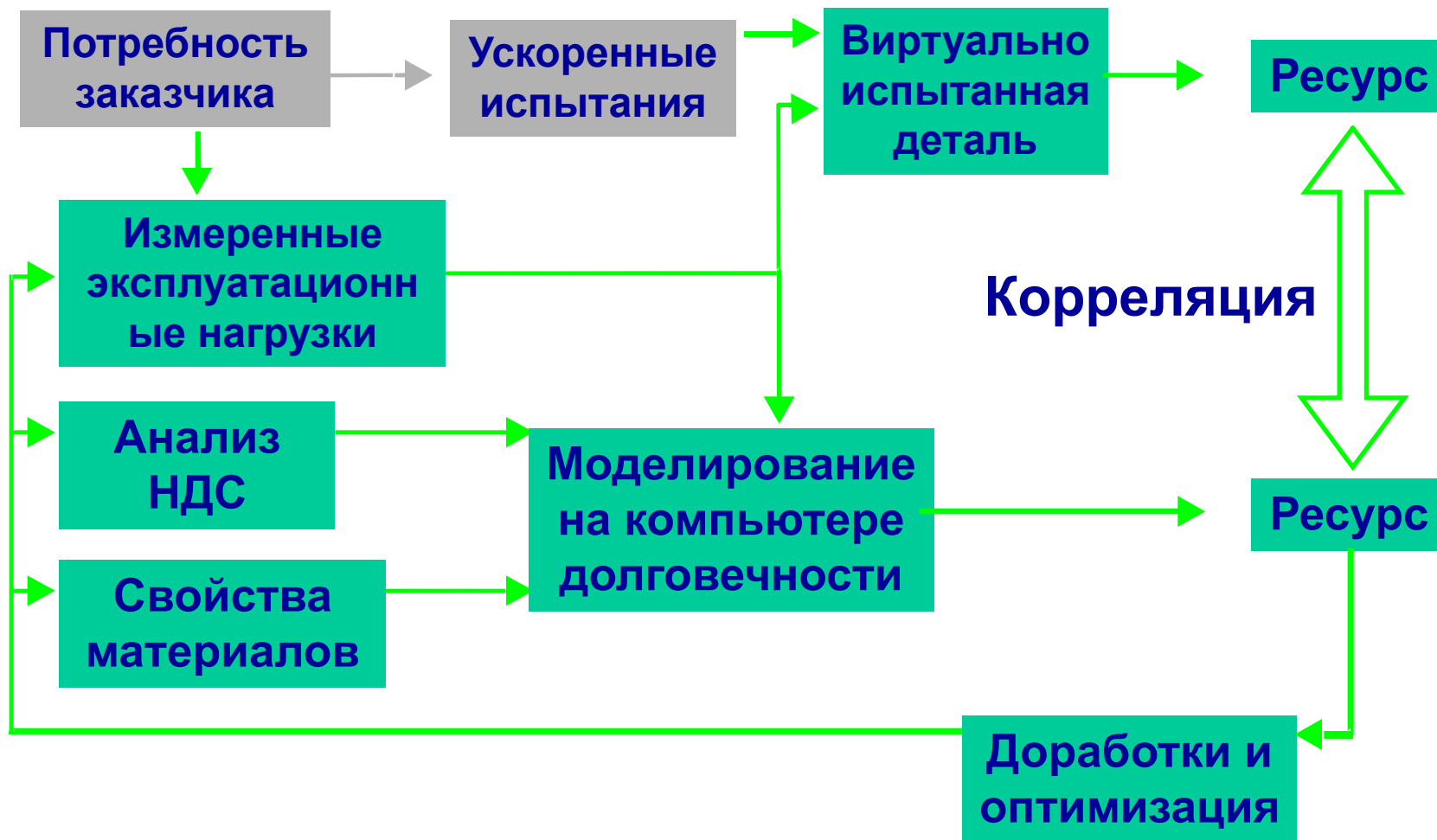


ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ 3

- 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



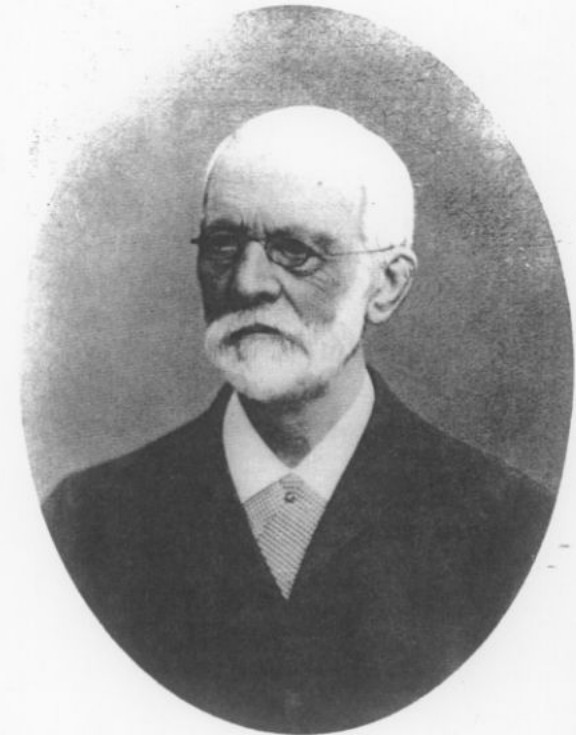
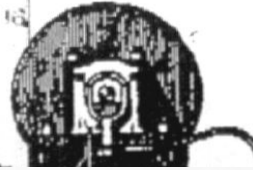
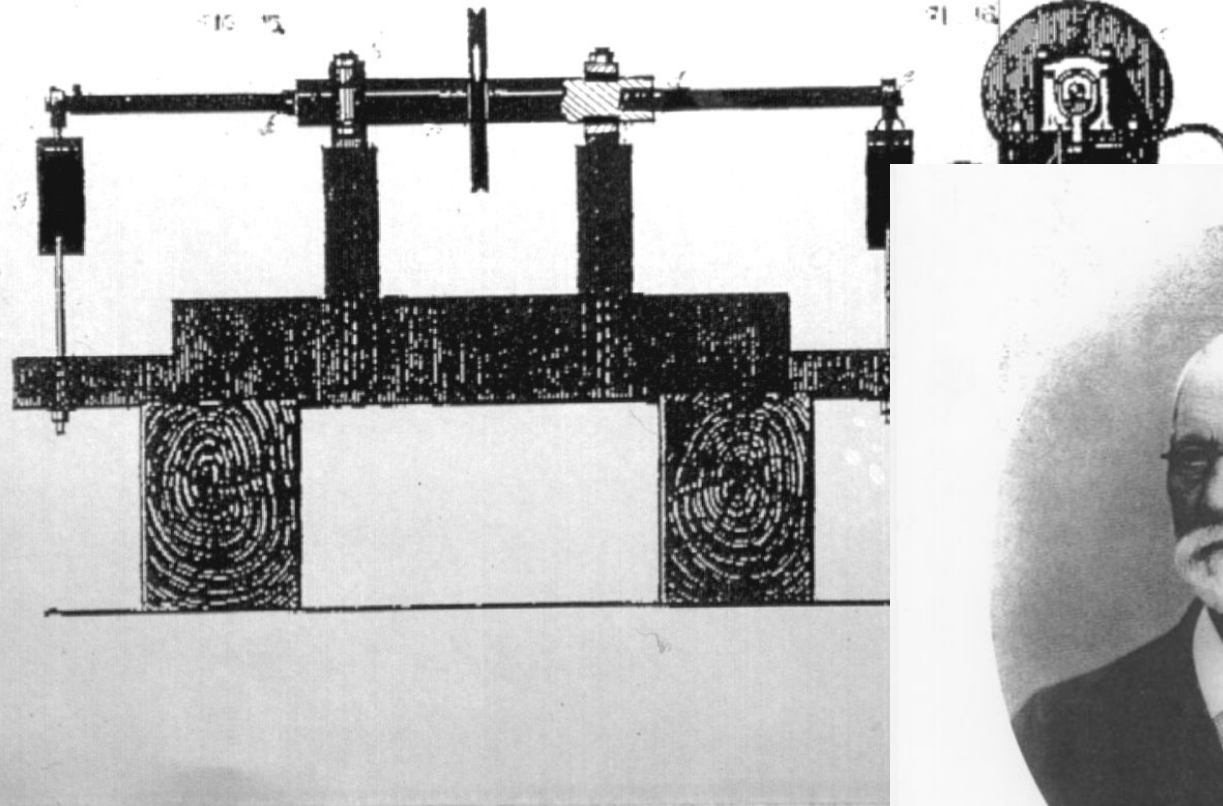
Оценка долговечности было делом редким

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 the ends are then fitted with the bearings, cc . To these bearings are attached the spring dynamometers, gg , by the aid of which any desired load was imposed upon the test rods.

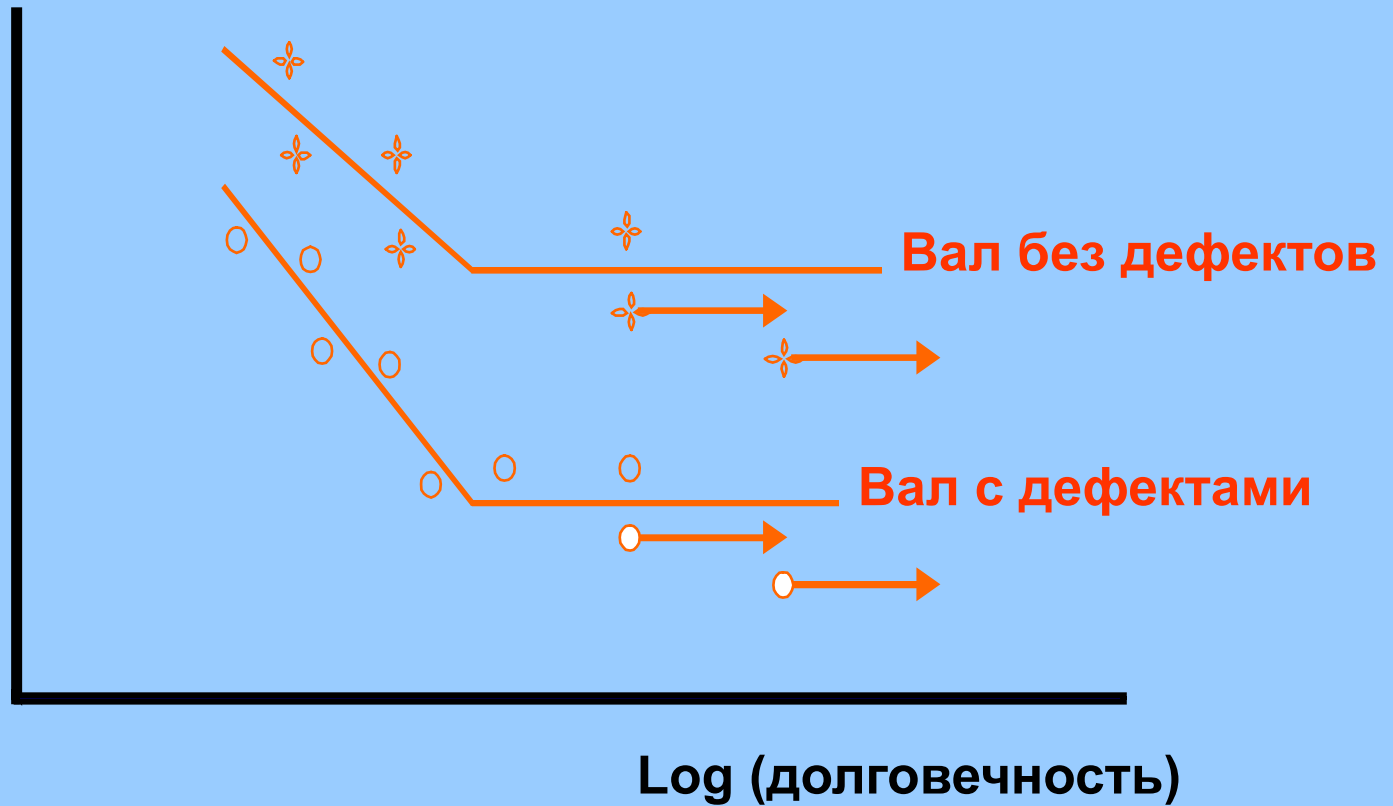
In Krupp's steel bars of form, Nos. 41 to 45 inclusive, the differences between the diameters of the parts marked d and d' , on the diagram E, were as follows: In No. 41, the



August Wöhler (1819 - 1914)

Испытательная установка Велера для исследования усталости осей железнодорожного транспорта

Амплитуда напряжений

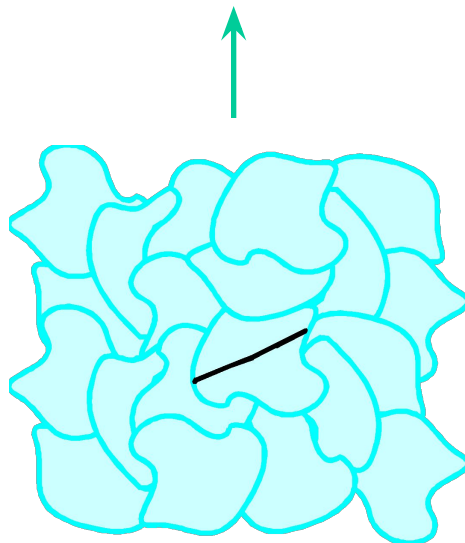


Типичные кривые Велера построенные при изгибно-крутильном циклическом нагружении

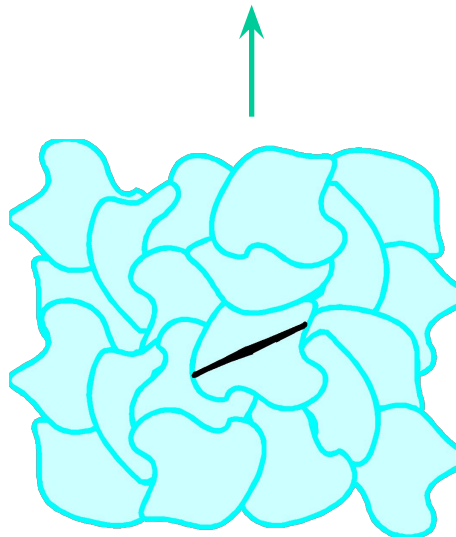
ОБЗОР ИСТОРИИ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТИ - 2

- 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 Баirstоу открывает явления циклического упрочнения и разупрочнения
- 1920 Гриффитс исследует трещины в стекле. Его работы стали причиной появления новой науки, которую называли механика разрушения.

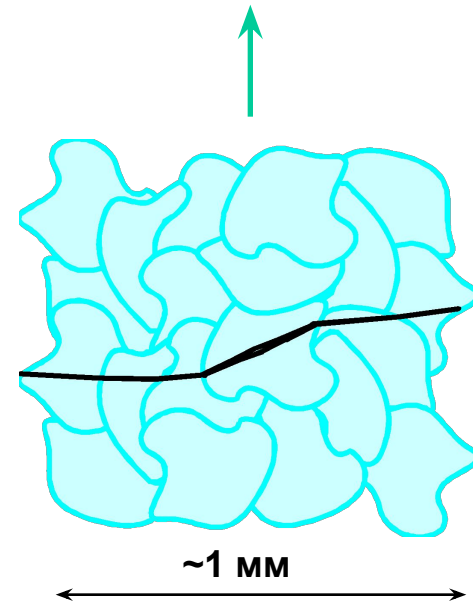
ЗАРОЖДЕНИЕ И РОСТ ТРЕЩИН – ЭТАПЫ 1 И 2



Формирование
устойчивых
зон скольжения

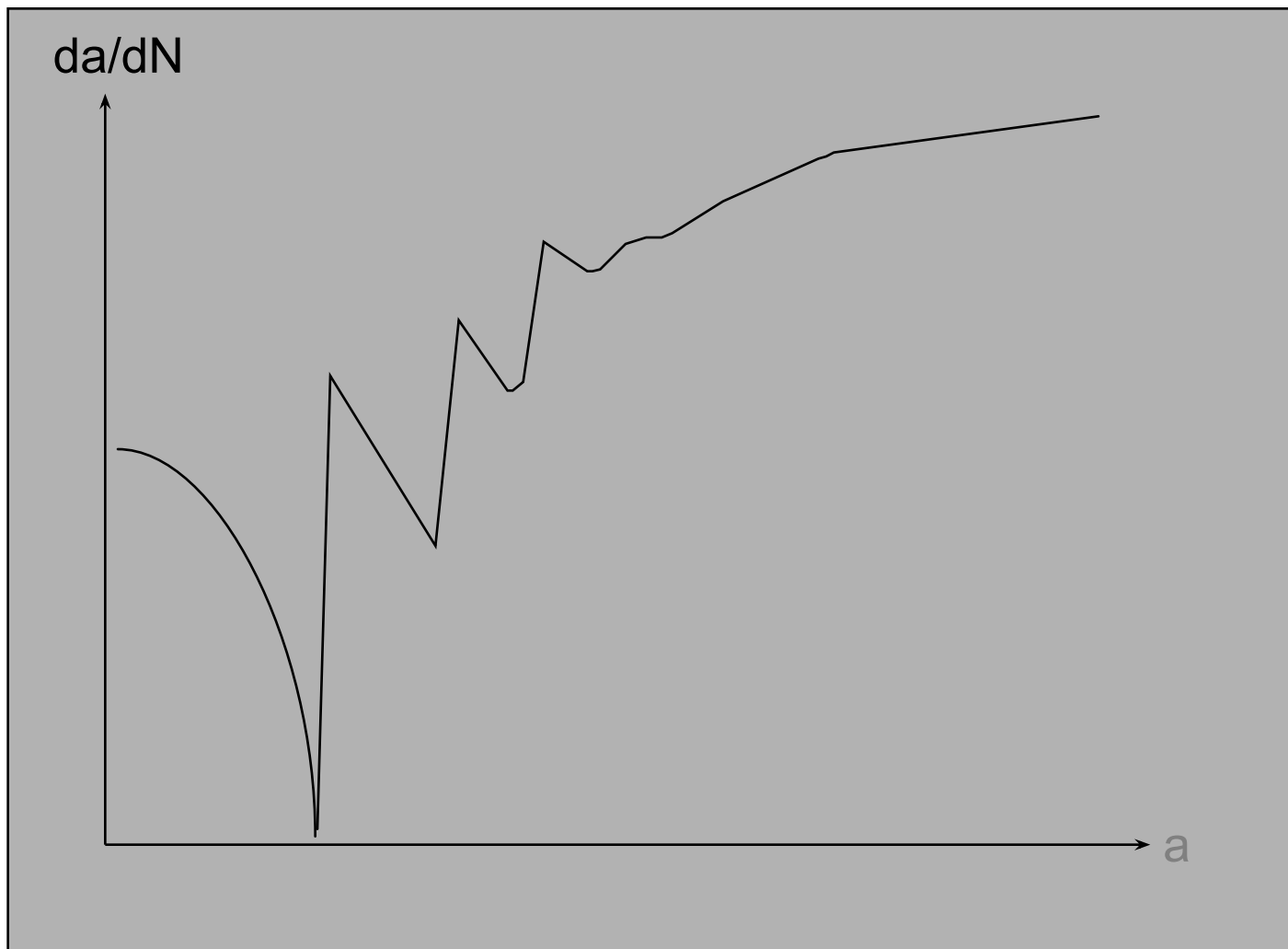


Этап 1
Рост трещины



Этап 2
Рост трещины

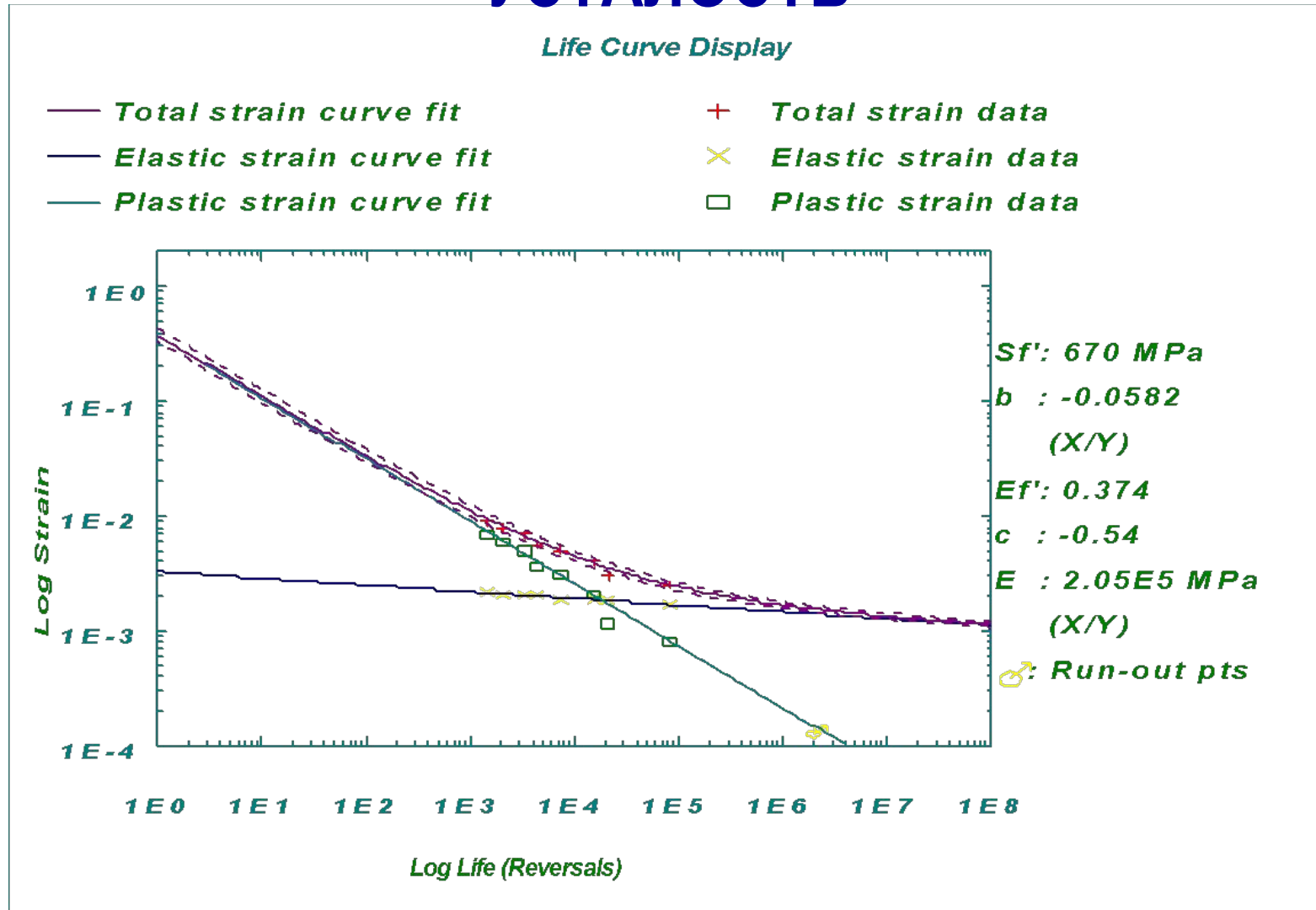
МИКРОСТРУКТУРНЫЙ РОСТ ТРЕЩИН



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

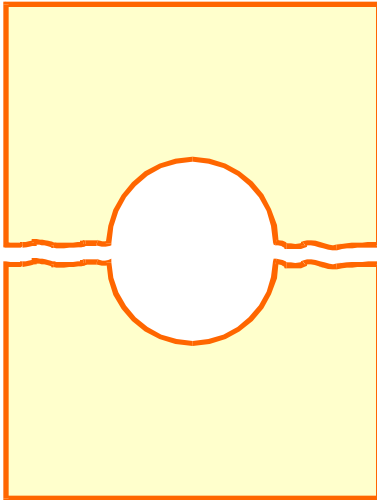
МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ

- 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

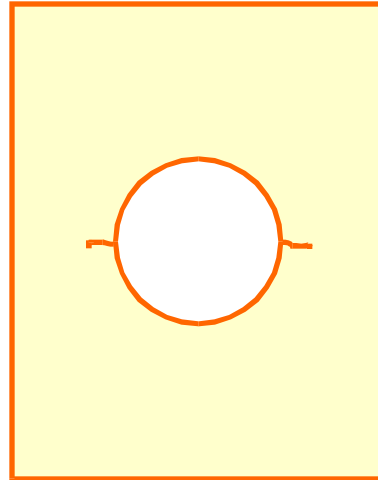
$$N_f = N_i + N_p$$

**Суммарная
долговечность**

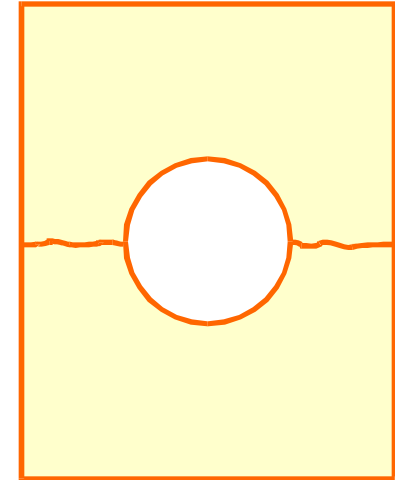
= зарождение трещины + Рост



S-N

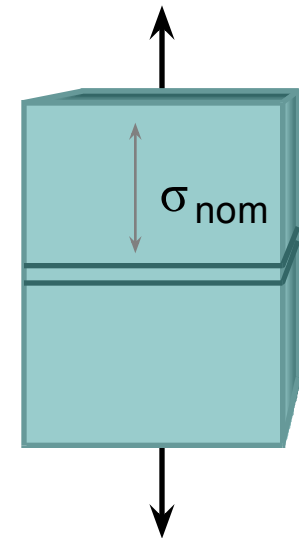


локальные деформации



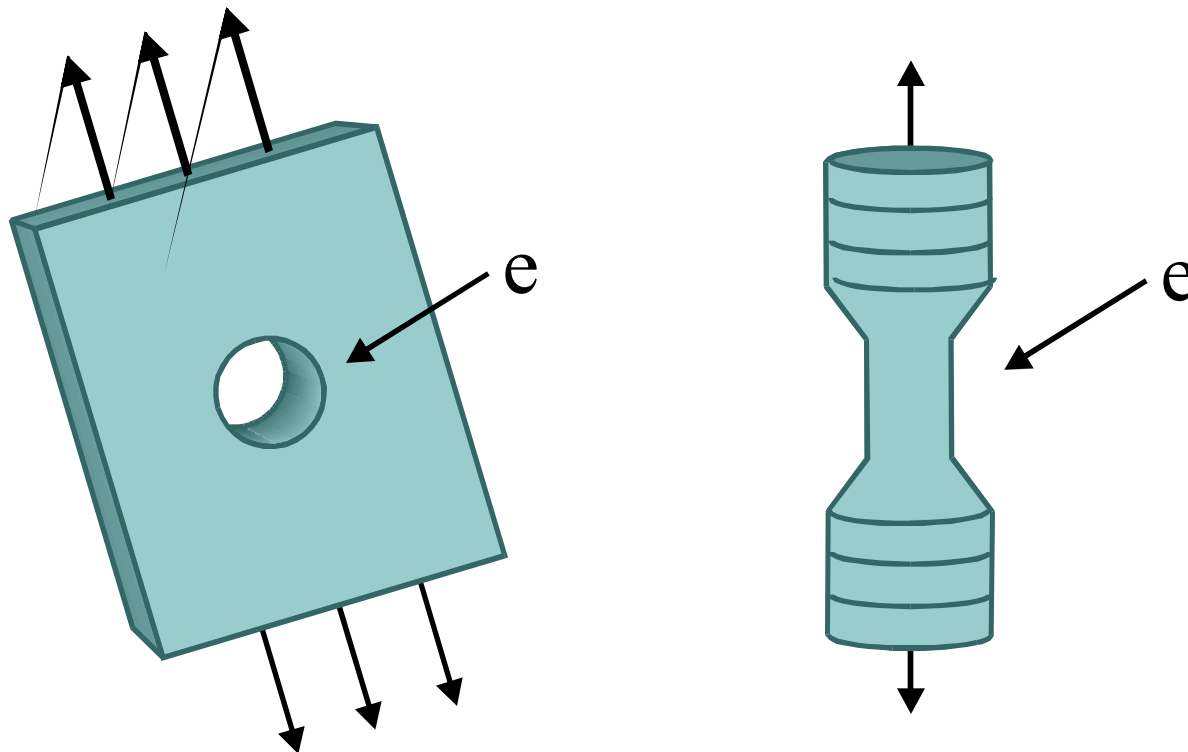
**линейная
механика
разрушения
(LEFM)**

S-N МЕТОД - ПОДОБИЕ



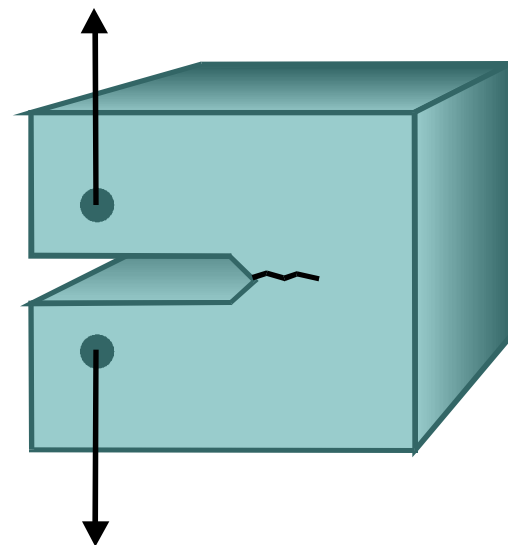
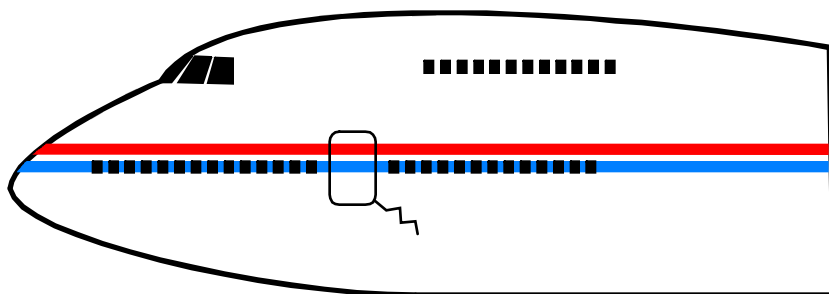
*Долговечность здесь Такая же как здесь
В обоих случаях номинальные напряжения одинаковы*

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

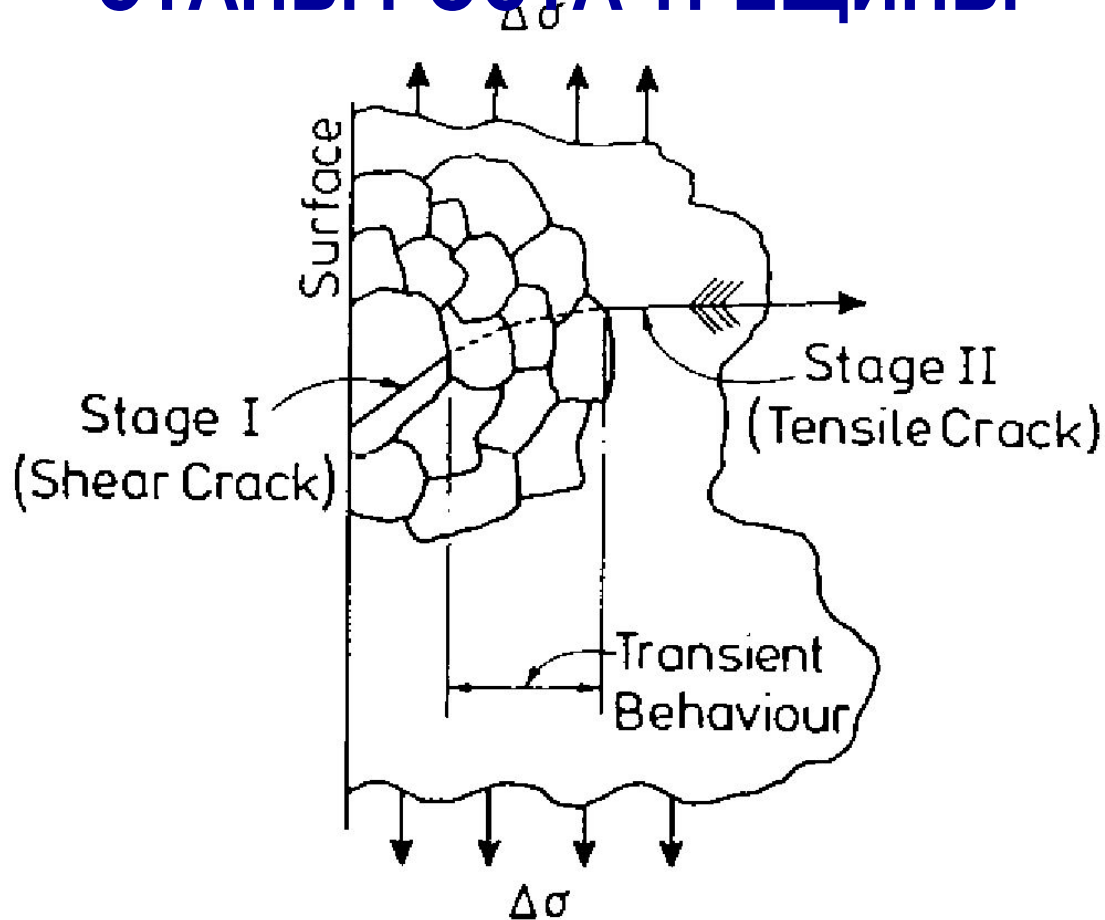
- Типичным местом, в котором начинается разрушение, является поверхность образца или детали
- Усталостное разрушение начинается с появления микроскопических трещин. На этом этапе микротрещины очень чувствительны к даже минутному воздействию циклических напряжений
- Как уже отмечалось, процесс усталостного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

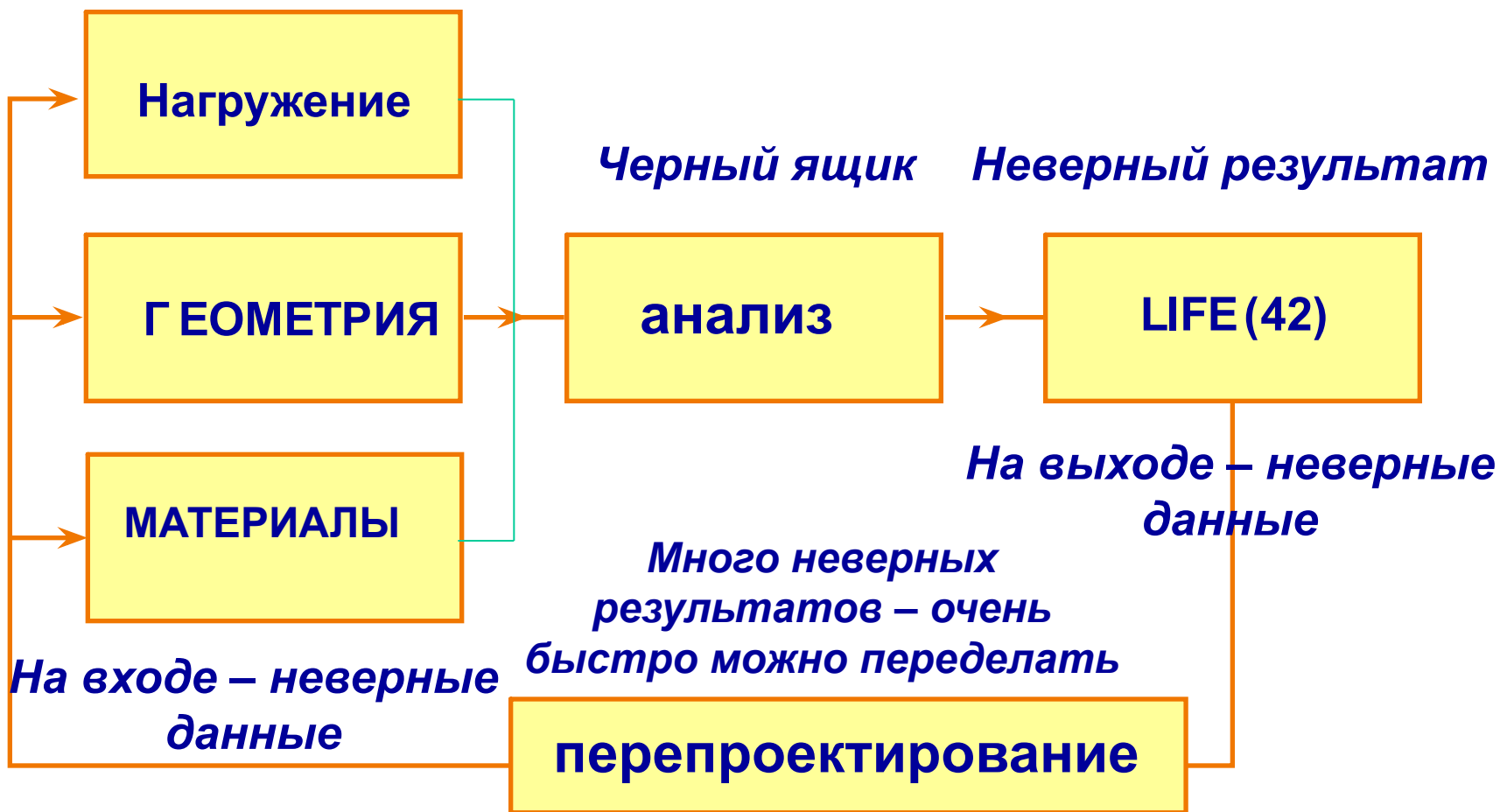
ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ РАЗРУШЕНИЙ

- 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