

Основы научного исследования и планирование эксперимента

Цель курса:

- **знание** методологии и понятийного аппарата научной деятельности, методов исследования, организации научной деятельности и планирования эксперимента;
- **умение** разрабатывать программу и план эксперимента при исследовании влияния

различных факторов на технологические и прочностные характеристики материалов;

Кожухар В. М.
Основы научных исследований: Учебное пособие / В. М. Кожухар. М.: **опыт** анализа результатов научно-исследовательского эксперимента. Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2010. 216 с.

Огурцов, А.Н.

Основы научных исследований : Учеб.-метод. пособие / А.Н. Огурцов. Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. 178 с. – На рус. яз.

Сабитов Р.А.

Основы научных исследований: Учеб. пособие / Челяб. гос. ун-т. Челябинск, 2002.

Смирин Н.А., Лавров В.В.

Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Конспект лекций. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГПУ-УПИ, 2004. 257 с.

Славутский Л.А.

Основы регистрации данных и планирования эксперимента. Учебное пособие. Изд-во ЧГУ, Чебоксары, 2006. 200 с.

НАУЧНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ:

– один из **видов познавательной деятельности**, характеризующийся объективностью,

воспроизводимостью, доказательностью,

точностью;

ПОЗНАНИЕ – творческая деятельность, ориентированная на получение знаний о мире.
– процесс выработки новых **знаний**.

Формы познания (в зависимости от функционального предназначения, характера знания,

соответствующих средств и методов):

обыденное, мифологическое, **религиозное**, художественное,

ЗНАНИЕ – философская **концепция** (Пендерсбург, Норян (2), 2006. 2142 с.)

определенным способом (методом) полученная (3),

в соответствии с какими-либо критериями (нормами) оформленная

(4),

имеющая социальное значение (5)

и признаваемая в качестве именно **ЗНАНИЯ**.

определенными социальными субъектами и обществом в целом

ИНФОРМАЦИЯ (лат. informatio – разъяснение, изложение, осведомленность) –

одно из наиболее общих понятий науки, обозначающее некоторые

сведения,

совокупность каких-либо данных, знаний и т.п. с.580

1,2. **Селективная, упорядоченная** – информация, относящаяся к некоторой обособленной

части мира и представленная на основе *теоретических*

предпосылок

в форме некоторого логического объекта – **модели**

(схемы, формулы, чертежи, вычислительные программы и т.п.).

ЗНАНИЕ оперирует с моделями, а не с реально существующими объектами.
Теоретические предпосылки – предположения, аксиомы, гипотезы, теории, понятия.

Модель включает наиболее существенные, *по мнению*

исследователя,

свойства исследуемых объектов (явлений, процессов,

и т.п.). **Информация в составе знания** может быть получена

– *теоретически* (классификация, аналогии, идеализация и т.п.)

– *эмпирически* (наблюдение, эксперимент, анализ архетипов, документов и т.п.)

с использованием некоторых критериев (количественных,

ЗНАНИЕ – суждение о некоторой части мира, сформированное на основе информации,

селективной, упорядоченной и полученной в соответствии с определёнными критериями;

имеющая социальное значение и признанная в качестве **ЗНАНИЯ** определёнными социальными группами. **ЗНАНИЕ** по своему происхождению **социально** и **психологично**:

– первичная информация формируется органами чувств (**ощущения**);

– отбор значимой информации (**отражение**) зависит от потребностей, мотивации;

– реакция на значимую информацию (**саморегуляция**) от предыдущим опыта и знаний.

«Наука создана человеком и для человека и вся система её придумана так, что она соответствует природе **человеческого сознания**»

Пономарёв Л.И.

СОЗНАНИЕ – высший уровень психического **отражения** и **саморегуляции**;

представлено непрерывно меняющейся совокупностью чувственных и

умственных

образов, представленных во «внутреннем опыте»

человека

Сознание в каждый момент может оперировать **ограниченным количеством образов** и предвосхищающих его практическую деятельность.

Любая **модель должна и может осознаваться**, если соответствует этому

ограничению,

ДИТЯ (1 год)
2.

$n + m = 3$, n – количество образов (элементов совокупности);
 m – количество связей между элементами;

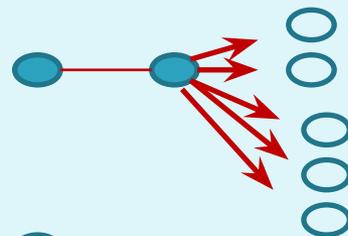
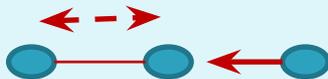
$P = 2m/n$ – связность элементов.

$P = 2m/n$

РЕБЁНОК (7 лет)

$n + m = 5$

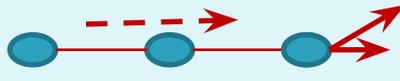
$P = 2m/n = 1,33$



ПОРОСТОК (13 лет)

$n + m = 7$

$P = 2m/n = 1,5$



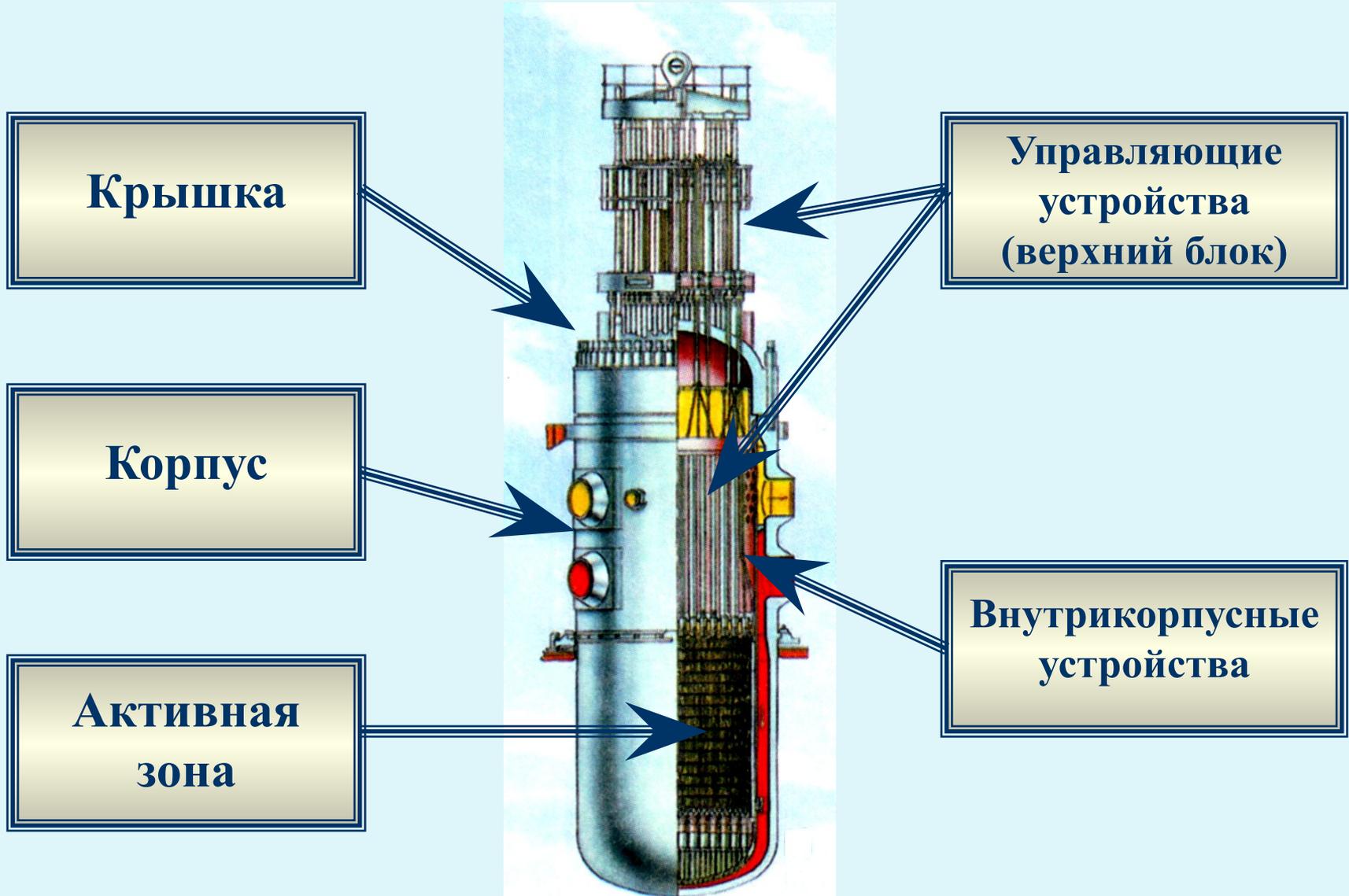
Для линейной схемы $P = 2m/n = 2(n - 1)/n < 2$

Для линейной схемы при $n + m = 9$ получим $P = 2m/n = 2 \cdot 4/5 =$

$n + m = 6$

$P = 2m/n = 2$

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА



СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ - БЕЗОПАСНОГО СРОКА СЛУЖБЫ КР И ВКУ

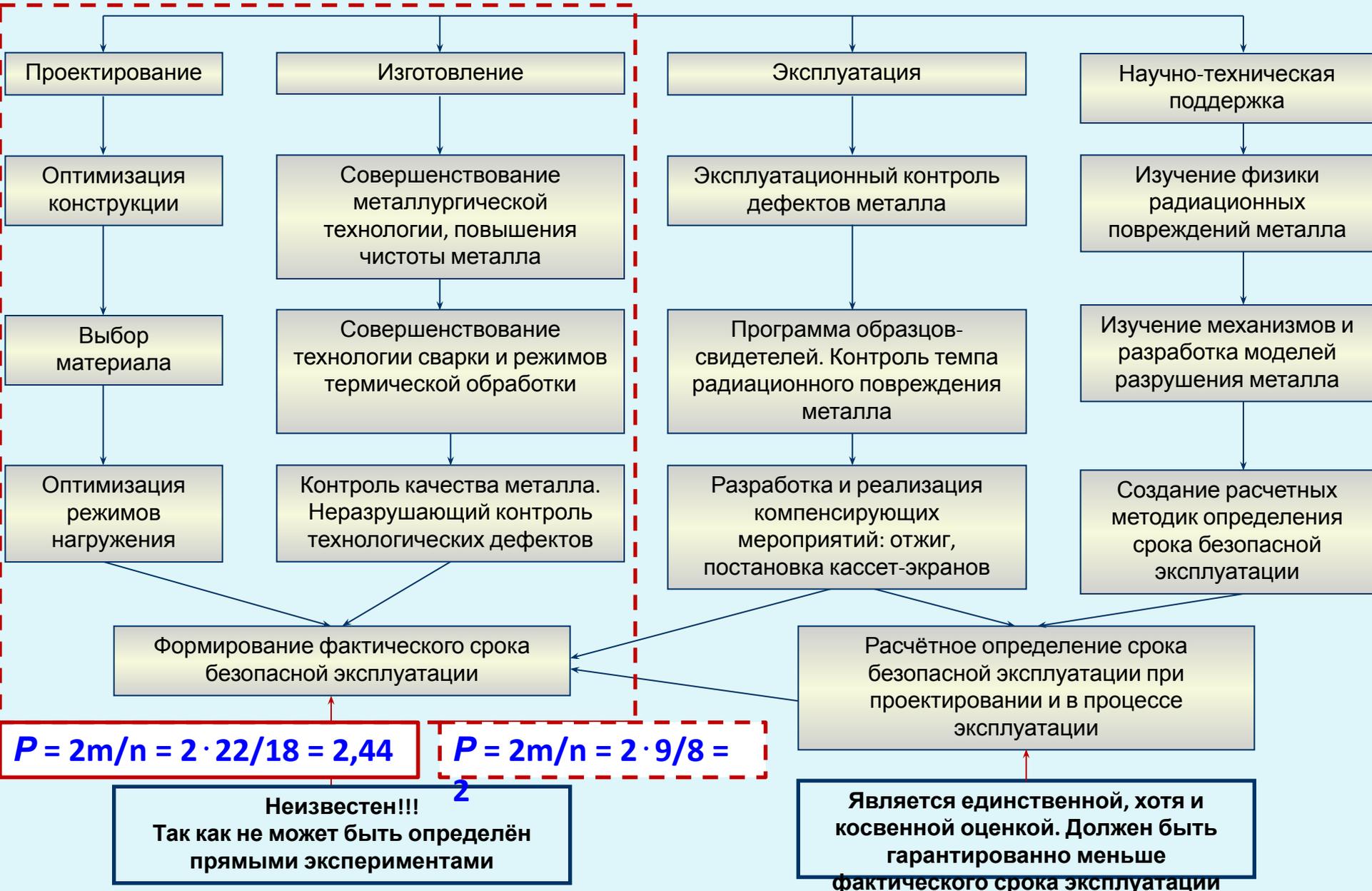


СХЕМА ОБОСНОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КР

на основании расчетно-экспериментальных методов

$$P = 2m/n = 2 \cdot 21/23 = 1,83$$



Модель максимального осознания

При $n = 4$ число всех возможных связей $m = 6$ – это **тетраэдр**.

Для тетраэдрической модели сумма $n + m = 10$ связность $P = 2m/n = 3$.

Для человека предельно $n + m = 9$, отбросив одну связь, получим $P = 2m/n = 2,5$.

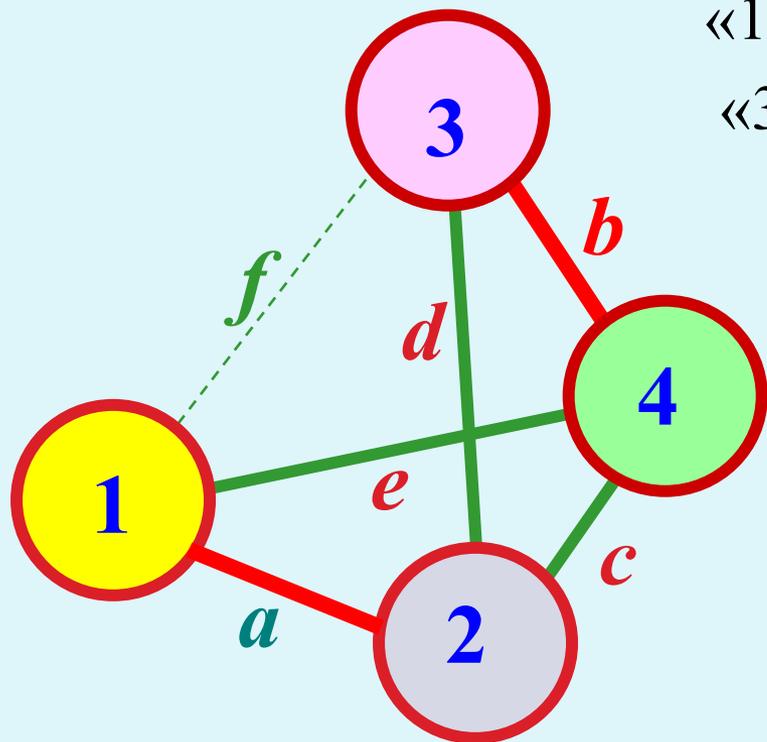
«1 – 2» – первая пара противоположностей

«3 – 4» – вторая пара противоположностей

a и b – отношения, связи между
противоположностями «1 – 2» и «3 – 4»

c, d, e – отношения, связи, **осознаваемые**
в данный момент

f – отношение, связь, **не осознаваемая**
в данный момент



Тетраэдрическая модель

Модель научного знания
тетраэдрическая

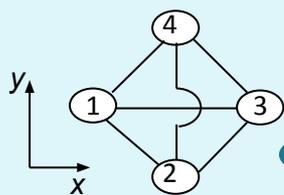
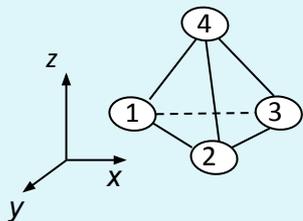
– максимально осознаваемая;

– открытая для развития

Знание в обучении представлено
линейно,

осознание недостаточное, но открытое

Тетраэдрическая модель форм познания



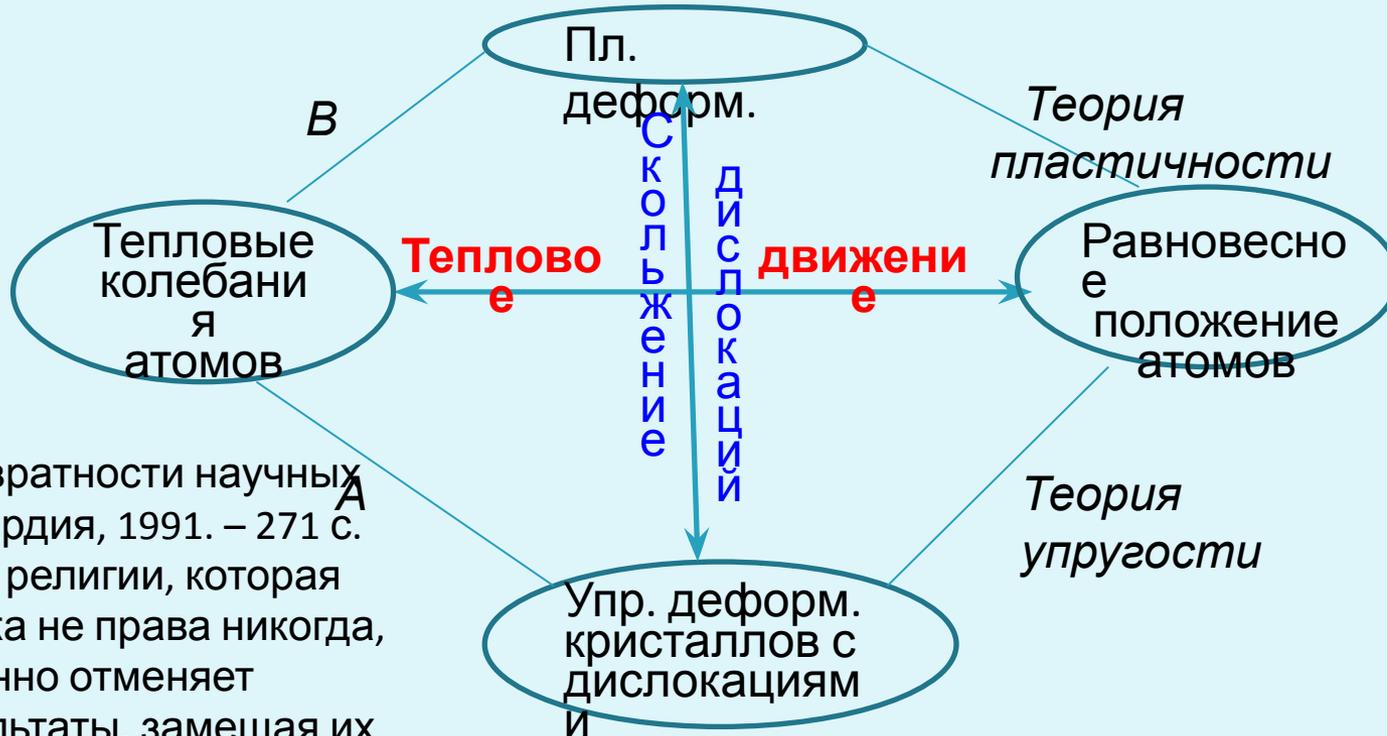
Познание
рассудочное

и эмоциональное

Тетраэдрическая модель механизмов деформирования и разрушения металлов

Деформация

– результат смещения атомов



Сухотин А.К. Превратности научных идей. – М.: Мол.гвардия, 1991. – 271 с.

В отличие от религии, которая всегда права, наука не права никогда, потому что постоянно отменяет собственные результаты, замещая их

ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНЫХ

ИССЛЕДОВАНИЙ

Научные исследования

– по источнику финансирования (*бюджетные, хоздоговорные и нефинансируемые*);

– по целевому назначению (*фундаментальные, прикладные, поисковые и разработки*).

Фундаментальные научные исследования –

это экспериментальные или теоретические исследования, направленные на получение новых знаний об основных закономерностях строения, функционирования и развития человека, общества, окружающей природной среды.

Прикладные научные исследования – это исследования, направленные на применение

Поисковые научные исследования проводятся с целью определения ^{новых знаний.} путей решения

Разработка (ОКР) – это исследование, направленное на внедрение в практику результатов фундаментальных и прикладных исследований.

Проблема ⇒ создание новых сплавов (разработка (?), поисковые; прикладные НИ и

фундаментальные

Обобщенная схема исследования

1. Выявление **проблемы** (Кожухарь В.М.)
2. Распознавание проблемы, выявление ее актуальности, **значимости**, масштабов и т. д.
3. Выявление **объекта и предмета исследования**. Постановка его **цели**
4. Разрыв герменевтического круга
5. Выбор подхода к исследованию и его концепции
6. Выдвижение исследовательской гипотезы (гипотез)
7. Сбор недостающей информации, включая постановку эксперимента
8. Обработка, визуализация, представление информации в удобном для восприятия виде
9. Формулировка выводов: подтверждение или опровержение гипотезы (гипотез)
10. Верификация нового знания
11. Составление модели изучаемого объекта. Верификация модели
12. Модельное экспериментирование. Прогнозирование поведения объекта исследования
13. **Выявление проблемы**
Проблема (как осознанное значимое несоответствие действительного и желаемому, имеющегося и должного) может иметь непосредственное отношение к жизни общества, к производству, науке и научному сообществу, системе воспитания и подготовки кадров.
Проблема обусловлена как объективными (реальными потребностями сохранения и развития), так и субъективными факторами (ценностями, идеалами и т.п.).

Распознавание проблемы

– это выявление **противоречий** и обуславливающих эти противоречия **противоположностей** реального или идеального мира. Выявление и распознавание проблемы направляются **научной парадигмой**.

Научная парадигма – это система понятий и основополагающих научных идей, которая

принимается сообществом учёных и обеспечивает их схемами

На основе научной парадигмы данной группы исследователей формируется **концепцией исследования** решений этих проблем. **Научная парадигма**

исторична.
Взглядов

Методы разработки концепции на способ разрешения выявленной

проблемы.

Дивергенция – расширение области исследования для обеспечения достаточного пространства поиска, проблемного

поля.

Методы дивергенции : обсуждение, анализ, визуализация проблемы; выявление

Трансформация — изменение представления о проблеме в наиболее приемлемого

для исследования.

Методы трансформации: классификация и выбор критериев классификации источников

и частей проблемы; уточнение структуры проблемы; ранжирование

Конвергенция — целесообразное сужение границ предмета исследования, источников и частей; установление взаимодействия источников и

Методы конвергенции: обосновывающие расчеты; проектирование и оценочные

частей.

эксперименты.

На основе концепции исследования определяются

- *объекта исследования;*
- *предмета исследования;*
- *цели исследования.*

Объекта исследования – определенные явления и процессы природного или социального характера, отдельные свойства предметов, различных систем и т.п.

Искомую информацию можно “снять” только с вещей и явлений в процессе их испытания, функционирования в реальных условиях. Информационную базу исследования часто смешивают с объектом исследования.

В исследовании *информация* выступает в виде фактов, которыми оперирует исследователь.

Факт — *это событие или явление действительности* (отраженное в сигнальной форме),

реально существовавшее, убедительное подтвержденное; следовательно, в той или иной

степени подвергнутое осмыслению, оценке его значимости.

Научные факты — *это факты, имеющие научную ценность*, отражающие определенный способ восприятия действительности, дающие новое знание или понимание явлений.

Принципы работы с предполагаемыми фактами:

- объективность;
- отношение к существу проблемы (проверка на релевантность);
- информационная емкость;
- научная ценность;
- соответствие предмету исследования;
- достаточность фактов для обобщения;
- рациональность сопоставления, сочетания и соединения фактов;
- научная интерпретируемость.

Ошибки в работе с фактами:

- подтасовка;
- фальсификация;
- абсолютизация отдельных фактов (переоценка их значимости);
- искажение содержания;
- манипуляция (преднамеренный выбор таких, которые дают одностороннее представление о действительности).

Предмета исследования – взаимосвязи, закономерности функционирования и развития объекта исследования, по поводу которых требуется новая (недостающая) информация;

обобщающая структура исследуемого объекта или ее отдельные частные аспекты (частные структуры), условно обособленные механизмы жизнедеятельности объекта,

предопределяющие наблюдаемые свойства рассматриваемого объекта.

Цель любого вида деятельности – это идеальный образ желаемого результата.

Универсальной целью исследования является **получение новых, достоверных знаний**.
Для определения объекта, предмета и цели исследования необходимо осмыслить

ситуацию, которую предстоит решить. Возможно полную информацию исследователь отыскивает в собственном или общечеловеческом прошлом опыте и научном знании близкое по своей сущности явление и **переносит все известные ему знания о нем на новый объект исследования. Главное – найти «слабое» место!!!.**

Рабочая гипотеза

– гипотеза исследования, выдвигаемая первоначально на основе анализа уже известной

информации и научного знания. Гипотеза является **организующим началом исследования**.

Д.И. Менделеев. Заветные мысли. СПб. 1903-1904. 285 с. “У **рабочей гипотезы** впрочем до вероятно справедливого исследования. а тем паче до достоверного или несомненно истинного и определяет существо научной самостоятельности”.

«Слабое место» – можно ли использовать расчётные модели и характеристики, которые применялись для оценки прочностной надёжности стальных конструкций;

Научные гипотезы — это проверяемые утверждения, связывающие исследуемые переменные и определяющие направление сбора данных об исследуемом объекте. Впоследствии истинность гипотезы и теории проверяется с опытом.

Требования к гипотезе:

- **релевантность**, т.е. соответствие фактам, на которые она опирается;
- **проверяемость** опытным путем, сопоставляемость с данными наблюдения или эксперимента (исключение составляют непроверяемые гипотезы);
- **совместимость** с существующим научным знанием;
- **возможность получения следствий** и фактов, подтверждающих гипотезу;
- **простота**, никаких произвольных допущений. (Огурцов А.Н.)

Описательная гипотеза – это предположение о существенных свойствах объектов.

Объяснительная гипотеза – это предположение о причинно-следственных зависимостях.

Прогнозная гипотеза – это предположение о тенденциях и закономерностях развития объекта исследования. (Огурцов А.Н.)

Общенаучные методы

исследования

Метод – совокупность приёмов и

Эмпирические методы исследования

операций

Наблюдение – метод, основанный на **непосредственном и пассивном восприятии**

(созерцания и регистрации) предметов и явлений при помощи органов чувств. Фиксировать возможно максимальное разнообразие первичной информации, точность и полнота описания наблюдаемого. **Счет** – нахождение числа, определяющего количественное соотношение однотипных объектов или их параметров.

Измерение – определение численного значения некоторой величины путем сравнения ее с эталоном.

Сравнение – установление различия между объектами или сходства некоторых качеств объектов, осуществляемое при помощи органов чувств или специальных приспособлений. **Оценивание** – вычисление значения величины, если ее измерение невозможно.

Натуральное моделирование – создание натурального (физического) аналога исследуемого объекта (аналог по условиям функционирования, по размерам, по форме, по составу и структуре).

Натуральное экспериментирование (эксперимент) – процесс, при котором исследуемый объект или его натуральная модель помещаются в определённые варьируемые условия с целью оценки реакции объекта на изменение этих условий.

Программа исследования рассматривается как средство достижения цели исследования, как форма конкретизации концепции.

Определяет цели и задачи исследования, его предмет, условия

проведения

Разделы программы:

- цель исследования;
- содержание программы; актуальные и важнейшие подпроблемы;
- парадигма и рабочая гипотеза решения проблемы;
- основная концепция исследования;
- ресурсное обеспечение;
- предполагаемый результат показатели эффективности исследования.

На основе программы разрабатывается детализирующий её план.

План исследования — совокупность показателей, отражающих связь и последовательность

ключевых мероприятий (действий , процедур и т. д.), ведущих к полной реализации программы и разрешению проблемы

План исследования рассматривается в качестве организующего

фактора

последовательного движения к цели исследования

Установление инвариантов – это задача науки,
решающей задачи на *феноменологическом уровне*,
т.е. отвечающей на вопрос «как происходит?»

Закон Ньютона $F = ma$. Здесь m есть *инвариант данного тела*.

Любое явление (феномен) можно характеризовать отношением воздействия (Ac) и реакции (R) на это воздействие:

$$X = Ac / R$$

Пример. Сопротивление проводника есть отношение напряжения к силе тока

Аксиомы теории размерностей

- физическая величина A не должна зависеть от выбора единицы её измерения;
- *математическое описание физического явления*, определяющее функциональную зависимость между численными значениями физических величин, *не зависит от выбора единиц измерения этих величин.*

Так как размерности правой и левой частей зависимости равны, то при делении их на постоянную той же размерности можно получить зависимость безразмерных величин.

Инварианты *явлений* – это безразмерные величины, безразмерные комплексы.

π - теорема для безразмерных комплексов

соотношение между n размерными величинами, для измерения которых использовано k основных независимых единиц измерения, можно представить в виде соотношения $(n - k)$ безразмерных комбинаций – комплексов этих величин

Упругое деформирование

В инварианте C укажем, обособим геометрические параметры l, A и характеристику материала X :

$$\Delta l = C F = F \times f(l, A, X) \quad (1)$$

Зависимость (1) содержит $n = 5$ размерных величин:

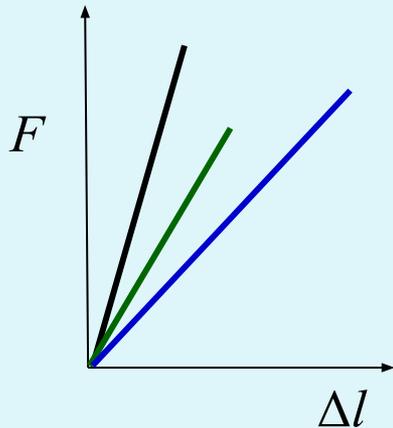
$$\Delta l, F, l, A, X;$$

и $k = 3$ основных единиц измерения: $m, кг, с$.

Постулируется создание $(n - k) = 2$

безразмерных комплексов:

$$K_1 = \Delta l / l = \varepsilon; \quad K_2 = f(A, X, F) = ?.$$



Закон Гука

$$\Delta l = C F$$

Податливость C есть

инвариант данного образца

Размерность $C = м/Н$

Размерность X в $K_2 = f(A, X, F)$ не известна

А. Вводим некоторые предположения, основанные на опыте:

1. Податливость C уменьшается при увеличении площади A
2. Для получения одной и той же деформации Δl образца большего сечения A необходимо увеличить силу F

$$K_2 = F^r / (A^s; X)$$

Б. Согласно теореме размерностей $P(F^r) = P(A^s) \times P(X)$

$$\text{Следовательно, } (\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2)^r = \text{м}^{2s} \times (\text{кг}^t \cdot \text{м}^u \cdot \text{с}^v) \quad (2)$$

Из соотношения (2) запишем равенства показателей степени:

– для единицы измерения «кг» $r = t$

– для единицы измерения «с» $2r = v$

– для единицы измерения «м» $r = 2s + u$

В. Предположим (?), что $r = 1$

Получим $t = 1; v = -2; 2s = 1 - u$

Наименьшее значение $s = 1$ и тогда $u = -1$

Размерность $P(X) = \text{кг} / (\text{м} \cdot \text{с}^2) = (\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2) / \text{м}^2 = \text{Н} / \text{м}^2$

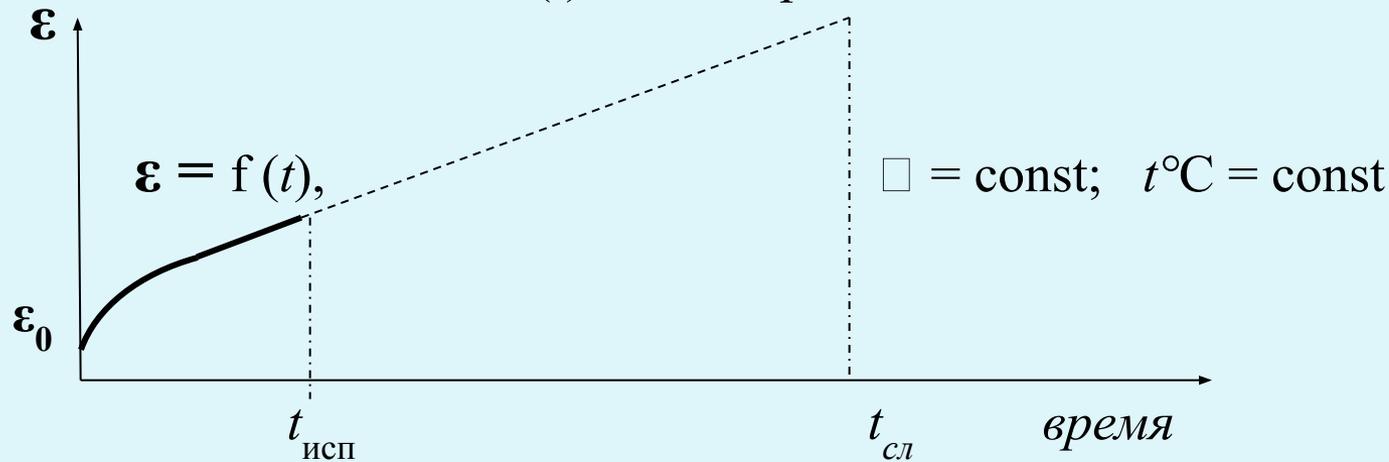
$$K_2 = F / (A; X) = \square / X = \square / E$$

$$\text{Закон Гука } K_1 = K_2; \varepsilon = \square / E$$

Ползучесть материалов

I. В результате испытаний на ползучесть получают зависимость

$$\varepsilon = f(t), \text{ где } t - \text{ время, } \square = \text{const, } t^{\circ}\text{C} = \text{const}$$



Запишем отношение «воздействие dt – реакция $d\varepsilon$ » в виде

$$d\varepsilon = dt / X, \text{ где } X - \text{неизвестная характеристика материала}$$

Так как $d\varepsilon$ - безразмерная величина, то $P(X) = P(t)$, а $X = Ct$

Соответственно, $d\varepsilon = dt / X = dt / (Ct)$;

$$\varepsilon = \int dt / (Ct) = (1/C) \ln t + \varepsilon_0 - \text{логарифмическая ползучесть}$$

Испытания проводят при различных $\square = \text{const}$ и получают ряд значений ε за срок испытания $t_{\text{исп}}$.

Ползучесть материалов

II. При проектировании деталей в условиях ползучести ограничивают деформацию ползучести за срок службы допустимым значением $\varepsilon \leq [\varepsilon]$.

По результатам испытаний при разных значениях $\square_i = \text{const}$ определяют
Следовательно, $\varepsilon = f(\square_i, t)$. набор значений ε_i .

В безразмерное соотношение $d\varepsilon = dt / X$ необходимо ввести \square/w ,
где неизвестный параметр w имеет размерность Н/м^2 .

Теперь отношение «воздействие–реакция» запишем в виде

1. $d\varepsilon = (\square/w)^m dt / X$, где m – неизвестный показатель степени;

2. $d\varepsilon = \exp(\square/w)^m dt / X$.

Ранее было показано, что $\mathbf{P}(X) = \mathbf{P}(t)$, а $X = Ct$.

Соответственно, $d\varepsilon = (\square/w)^m dt / (Ct)$.

(3) А. Если в (3) $w = \text{inv}$, то $\varepsilon = C_2 \square^m \ln t + \varepsilon_0$.

(4) Размерность $\mathbf{P}(w) = \text{Н/м}^2 = \text{Нм/м}^3 = \text{Дж/м}^3$.

Если экспериментально получены зависимости (4), то $w = \text{inv}$.

Вывод. Данный материал сохраняет способность рассеивать энергию деформирования в процессе ползучести.

Ползучесть материалов

Б. При повышенных температурах кривые ползучести обычно имеют линейный участок, соответственно, скорость ползучести $d\varepsilon / dt = \text{const}$.

$$\text{В этом случае } d\varepsilon / dt = (\sigma/w)^m dt / (C t) = \text{const} \quad (5)$$

При $\sigma = \text{const}$ и $C = \text{const}$ из (5) следует, что $w^m \times t = \text{inv}$

Следовательно, с увеличением времени под нагрузкой w *уменьшается*.

Способность материала рассеивать энергию деформирования снижается.

В материале накапливаются различные повреждения (поры, трещины).

III. Ползучесть исследуется обычно в некотором интервале температур при $T_i = \text{const}$ и интервале напряжений $\sigma_j = \text{const}$.

В этом случае отношение «воздействие–реакция» запишем в виде

$$d\varepsilon = \exp [-(U_0 - \gamma \sigma) / (kT)] (\sigma/w)^m dt / (Ct), \quad (6)$$

где U_0 , γ – параметры материала ; k – *постоянная Больцмана*

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}(\text{°C})^{-1}$$

Вывод. 1. В соотношении (6) 9 величин при 3 единицах изменения, возможны 6 безразмерных комплексов – *критериев подобия*.

2. Практически невозможно выполнить требование постоянства 6 безразмерных комплексов одновременно. Поэтому (6) следует использовать только для аппроксимации экспериментальных данных.

Радиационное повреждение

Радиационное повреждение материалов активной зоны атомных реакторов проявляется в увеличении удельного объёма материала.

Воздействие на материал представим тремя величинами:

E – энергия частиц, Мэв; ϕ – плотность потока частиц, $1/\text{см}^2$;

dt – продолжительность облучения, с.

Реакция материала – относительное увеличение объёма $\Delta V/V$.

Характеристика материала $X = E \phi dt / d (\Delta V/V)$

Тогда $d (\Delta V/V) = E \phi dt / X$,

где $P(X) = P(E \phi dt) = \text{Мэв} \cdot \text{с} / \text{см}^2 = P(w) \cdot P(t) \cdot P(l)$,

здесь w – энергия, диссипируемая единицей объёма;

l – линейный параметр, например, длина свободного пробега частиц

Тогда зависимость определяющих величин представим в виде

$$d (\Delta V/V) = E \phi dt l / (w t) = [E \phi l / w] dt / t \quad (8)$$

Соотношение (8) аналогично (3) и (5).

Выводы, полученные на основе (3) и (5), применимы и в данном случае.

Длительная прочность

Длительная прочность – разрушение материала под действием постоянного

напряжения $\sigma = \text{const}$ ($\sigma < \sigma_B$).

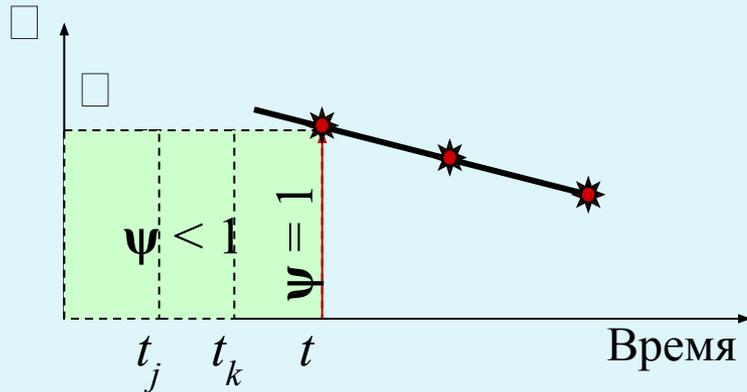
Отношение «воздействие–реакция»:

1. **Воздействие** изменяет материал.

Это время t действия напряжения $\sigma = \text{const}$

2. **Реакция** – то, что изменяется в материале.

Материал разрушается за время dt на $d\psi$.



При очень малом времени t_0 принять $\psi_0 = 0$, а $\psi = 1$ (безразмерная) при t_{\square} .

3. **Характеристика** $X = dt / d\psi$. Тогда $d\psi = dt / X = dt / (Ct)$,

$$\int d\psi = \int dt / (Ct) \Rightarrow 1 = (1/C) \ln t_{\square} / t_0, t_{\square} = t_0 \exp C.$$

В случае различных $\sigma_i = \text{const}$ запишем в безразмерной форме

$$t_{\square} = t_0 (\sigma/w)^{-m} \exp C \quad \text{или} \quad t_{\square} = t_0 \exp(-\sigma/w) \exp C$$

При испытании в интервале температур $T_i = \text{const}$ и напряжений $\sigma_j = \text{const}$.

$$t_{\square} = t_0 \exp [(U_0 - \gamma \sigma) / (kT)] (\sigma/w)^{-m} \quad (7)$$

Вывод. Практически невозможно выполнить требование постоянства одновременно 6 безразмерных комплексов в (7). Поэтому (7) следует использовать только для аппроксимации экспериментальных данных.

Разрушение тел с трещиной при кратковременной статической нагрузке

А.А. Гриффитс исследовал образцы из практически хрупкие материалов.

Используя энергетический подход, он предположил, что трещина растёт, если энергия W упругой деформации, освобождаемая в теле образца при увеличении длины трещины на δl , превышает энергию Γ , расходуемую на увеличение поверхности трещины.

Предельному состоянию соответствует $\partial (W - \Gamma) / \partial l = 0$ (9)

Решение (9) для пластины

Энергия упругого деформирования:

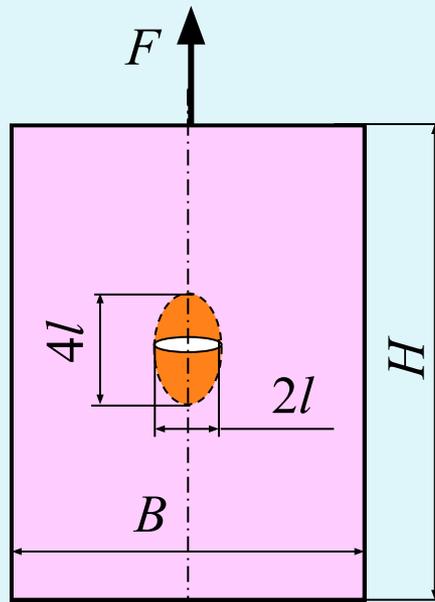
- для пластины без трещины $[\sigma^2/(2E)] \cdot BhH$,
- для пластины с трещины $[\sigma^2/(2E)] \cdot (BhH - \pi \cdot l \cdot 2lh)$,
- освобождаемая энергия $W = [\sigma^2/(2E)] \cdot \pi \cdot 2 l^2 h$,
- энергия на образование трещины $\Gamma = 2\gamma \cdot 2lh$.

Тогда $\partial (W - \Gamma) / \partial l = [\sigma^2/(2E)] \cdot 4 \pi \cdot l h - 4 \gamma h = 0$,

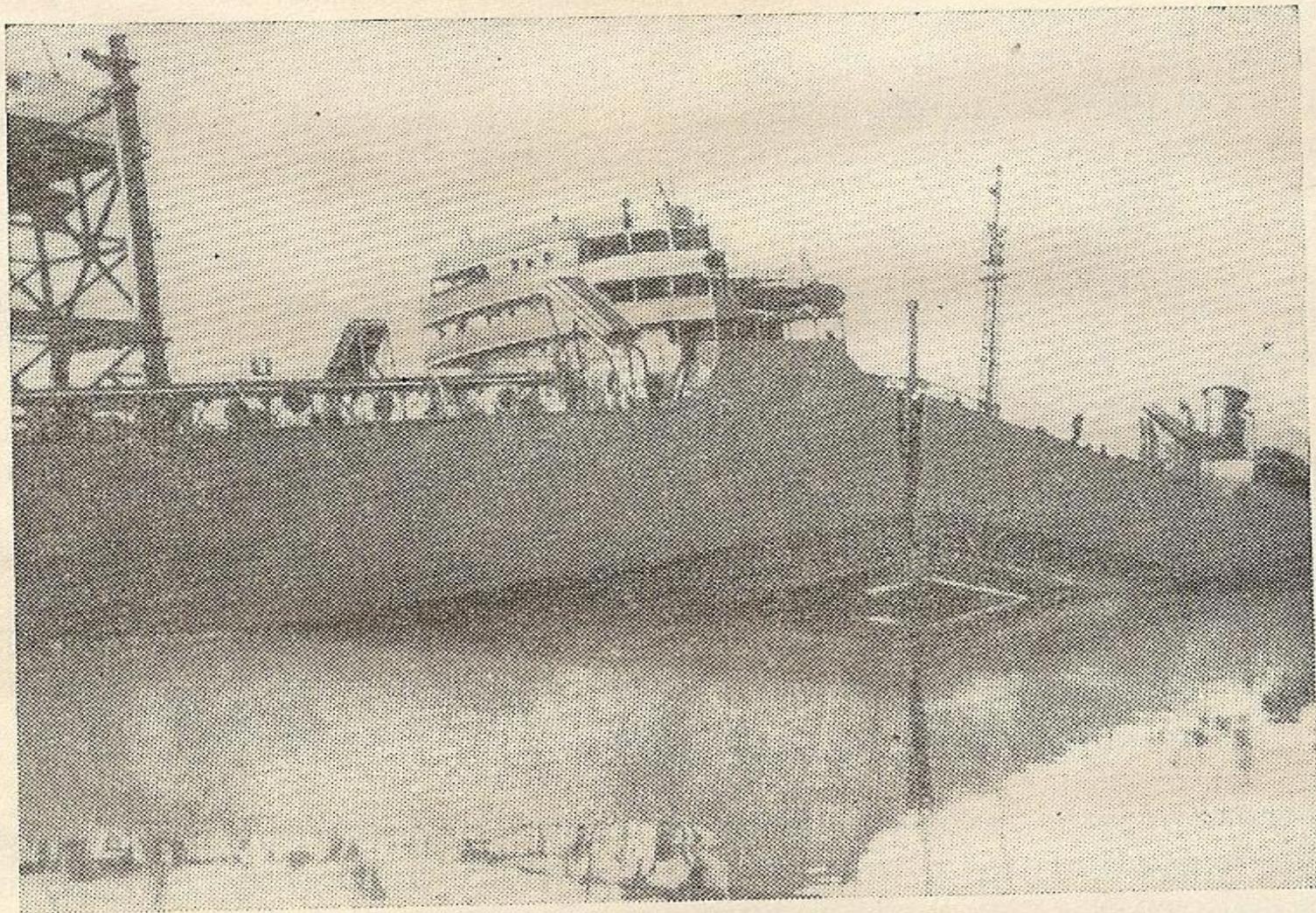
критическое $\sigma_c = \sqrt{2 E \gamma / (\pi l)}$ – для плоского НС,

$\sigma_c = \sqrt{2 E \gamma / [(1 - \nu^2) \pi l]}$ – для плоского ДС.

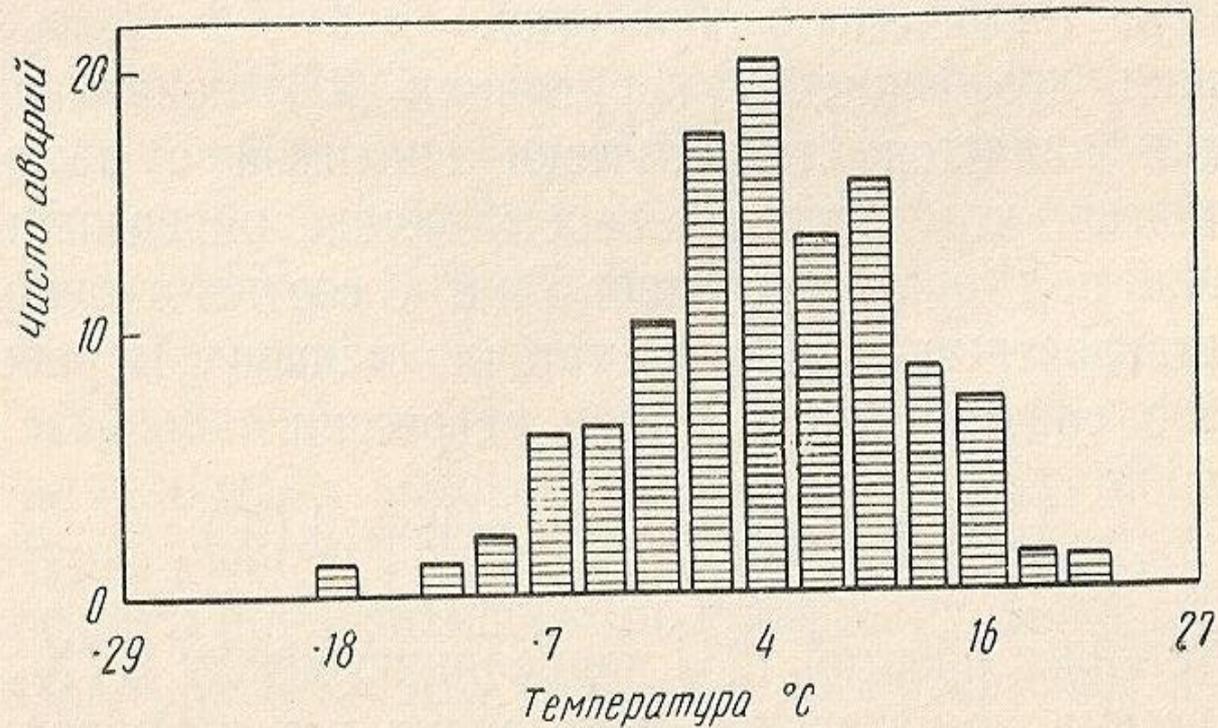
Критическая длина трещины $l_c = 2 E \gamma / (\pi \sigma^2)$



$$\begin{aligned} 2l &\ll B \\ h &\ll B \end{aligned}$$



Морское судно после хрупкого разрушения сварного корпуса
из кипящей стали



Частота аварий судов при различных температурах воздуха

Разрушение тел с трещиной при кратковременной статической нагрузке

Энергетический подход А.А. Гриффитса, в котором γ есть поверхностная энергия данного вещества, оказался неприменим к разрушению металлов.

Учитывая, что разрушающее напряжение σ_c существенно зависит от длины трещины l , запишем отношение «воздействие-реакция»:

- «воздействие» при мгновенном разрушении пластины с трещиной – это напряжение σ , длина трещины l и время dt ;
- «реакция» материала – это увеличение повреждённости на $d\psi$;

Разрушающее $\sigma_c < \sigma_T \Rightarrow$ в соотношение есть безразмерный комплекс σ/E .

Тогда $d\psi = (\sigma/E)^m (\sigma l / X)^n dt$ где безразмерны σ/E ; C и $\sigma l / X$.

$R(\sigma) = P[\sigma l] = \text{Нм/м}^2 = \text{Дж/м}^2$ X – это энергия образования единицы площади трещины, или 1 м^2 .

При $m = 1$, $n = 1$ и $(d\psi/dt) t = 1$ (при разрушение $\psi = 1$) получим

$$\sigma_c^2 l / (EXC) = 1, \quad \sigma_c^2 l / C = K_c^2 = EX, \text{ где } K_c = \sigma_c \sqrt{cl} -$$

критический коэффициент интенсивности напряжений (КИН)

Условие прочности запишем в виде $K = \sigma \sqrt{cl} \leq K_c / [s_c]$. Метод расчёта K !?!

$K^2/E = G$ – приток энергии в вершину трещины.

Рост трещины не происходит,

если $G \leq G_c$ – критическое значение. По Гриффитсу $G_c = 2\gamma$.

Для ПДС $(1 - \nu^2) K_{Ic}^2 = EG_{Ic}$;
Для ПНС $K_c^2 = EG_c$.

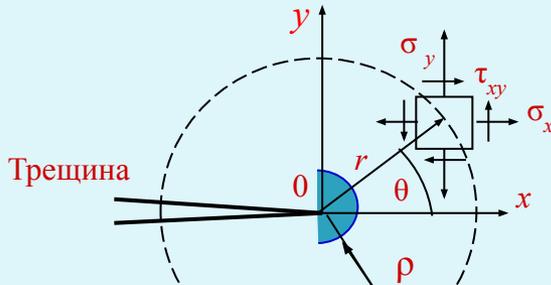
Напряжённое состояние вблизи вершины трещины

Методами теории упругости получены решения для концентраторов,

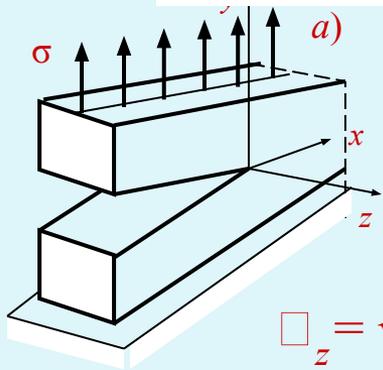
радиус вершины которых $r \ll l$, но $r \gg a$ межатомного расстояния.

В 1957 г. (через 45 лет после Гриффитса) Дж.Р. Ирвин предложил считать, что

- минимальный $r = \rho$ – радиус зоны пластической деформации в вершине трещины;
- при $\rho \ll l$ и $\rho \ll (B - 2l)$ не учитывать влияние пластической деформации на напряжённое состояние материала в области вне ρ .



1. Трещина отрыва



$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{cases} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \end{cases}$$

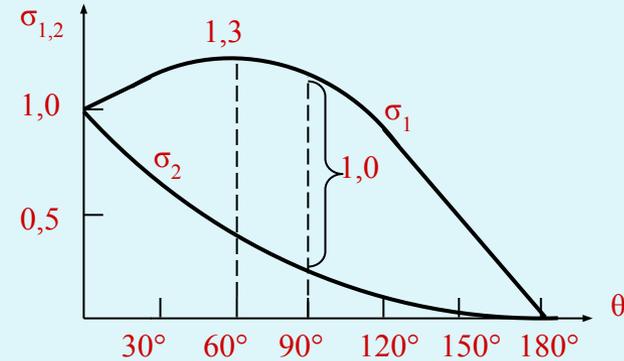
$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{cases} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \end{cases}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}$$

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y); \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

$$K_I = \lim_{\substack{r \rightarrow \rho \\ \theta \rightarrow 0}} \sigma_y \sqrt{2\pi r}; \quad \sigma_y = \sigma (l+r) / \sqrt{(l+r)^2 - l^2}$$

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} - \text{КИН при растяжении}; \quad K_{II} = K_{III} = 0$$



1. σ_{max} при $\theta = \pm 60^\circ$

2. $\sigma_1(\theta) = \sigma_2(\theta)$ при $\theta = \pm 90^\circ$

3. $\tau_{max} = 1/2 \sigma_1(0^\circ) = 1/2 \sigma_2(0^\circ)$ при $\theta = \pm 90^\circ$

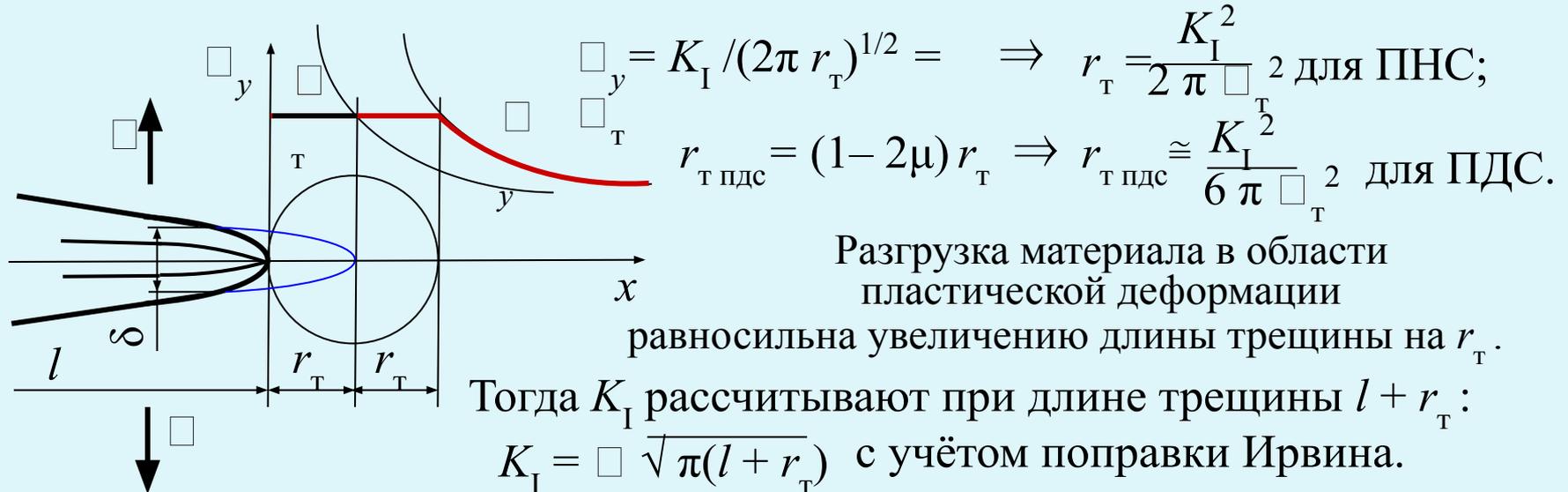
$\sigma_1(90^\circ) - \sigma_2(90^\circ) = 2\tau_{max}$

4. $E_{pF} = max$

при $\theta = \arccos 1/3 \cong \pm 70^\circ$

2. Пластическая деформация в вершине трещины

Дж.Р. Ирвин предложил использовать решения теории упругости, но вводить при этом поправку на размер области пластической деформации.



$G = K_I^2/E \cong m \sigma_T^2 \delta$, где $m = 1 \dots 3$, учитывает упрочнение в результате пластической деформации.

Пластическое смещение δ в вершине трещины принимают равным $\delta \cong K_I^2/(E\sigma_T)$.

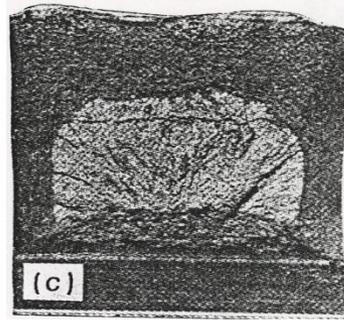
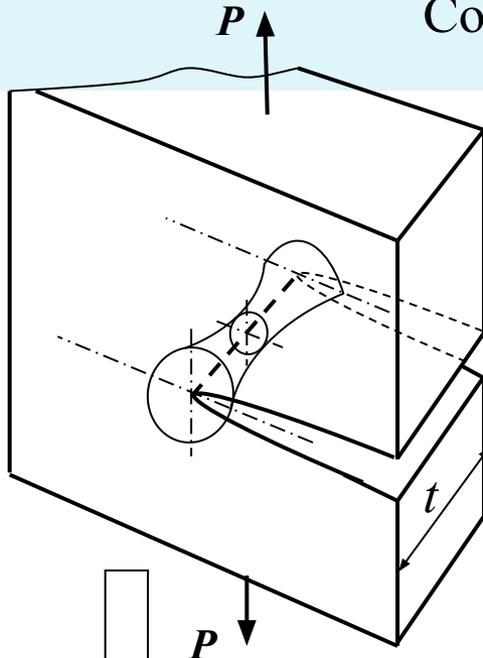
Вывод. Радиус пластической зоны r_T , пластическое смещение δ и интенсивность потока энергии G в вершине трещины зависят от

- напряжённости материала (K_I);
- напряжённого состояния материала (ПНС или ПДС);
- сопротивления материала пластической деформации (σ_T).

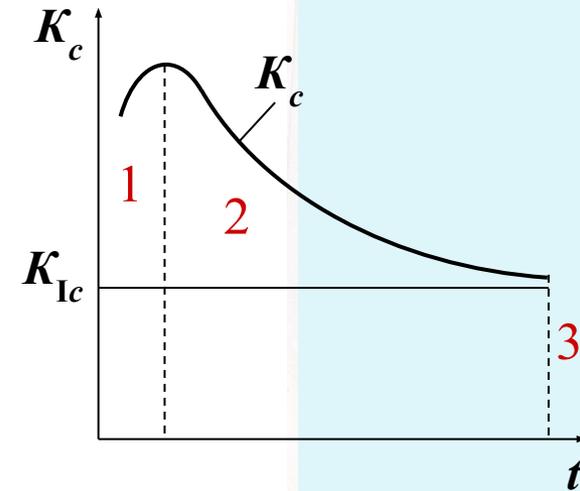
Зависимость критического КИН от толщины образца

При одноосном растяжении напряжённое состояние изменяется от плоского ($\sigma_3 = 0$) на поверхности до всестороннего растяжения ($\sigma_3 > 0$) в сердцевине.

Соответственно, $r_T = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_T^2} \downarrow$ до $r_{T\text{ пдс}} \cong \frac{K_I^2}{6\pi\sigma_T^2}$ при $t \rightarrow \infty$, сопротивление разрушению уменьшается.



Эффект тоннелирования

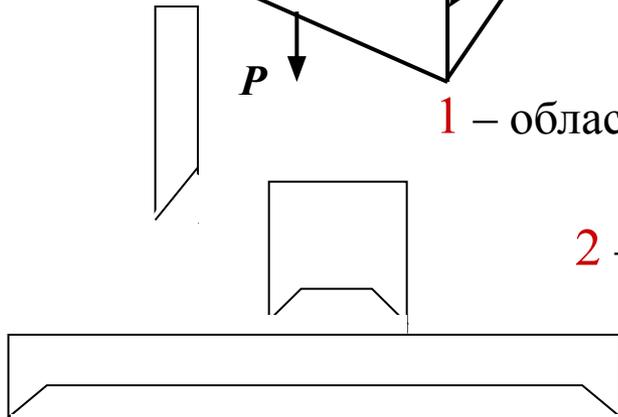


1 – область вязкого разрушения сдвигом ($K_c \uparrow$ при $t \uparrow$);

2 – область смешанного разрушения ($K_c \downarrow$ при $t \uparrow$);

3 – область хрупкого разрушения ($K_c \cong \text{const}$ при $t \uparrow$)

$$K_c \rightarrow K_{Ic}$$



Ограничение при определении критического КИН K_{Ic}

Стандартом указывается граничная толщина образцов для корректного определения критического КИН K_{Ic} : $t_{\Gamma} \geq 2,5 (K_{Ic} / \sigma_T)^2$

Протяжённости пластической зоны $2r_T$ к толщине t_{Γ} составляет

$$\beta = 2r_T / t_{\Gamma} = 2 \frac{K_{Ic}^2}{2 \pi \sigma_T^2} : [2,5 (K_{Ic} / \sigma_T)^2] \cong 1/8.$$

Вывод

Минимальная толщина образца должна быть в 8 раз больше диаметра пластической зоны.

Пример.

При 20°C критический $K_{Ic} = 100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ стали 20 нормализованной, $\sigma_T = 270 \text{ МПа}$.

$$t_{\Gamma} \geq 2,5 (K_{Ic} / \sigma_T)^2 = 2,5 (100/270)^2 \text{ м} = 0,34 \text{ м} = 340 \text{ мм} (!?!)$$

Ширина стандартного образца с центральной трещиной $b \geq 8 t$,

длина трещины $2l = (0,3 \dots 0,5) b$.

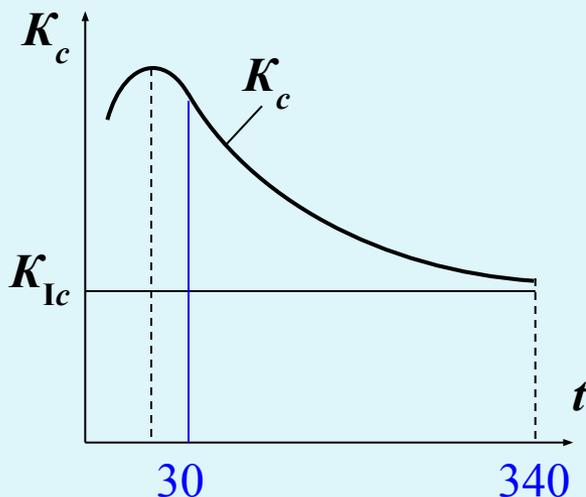
В данном случае $b \geq 2720 \text{ мм}$ и $2l \cong 1000 \text{ мм}$;
площадь поперечного сечения $\cong 0,585 \text{ м}^2$.

Требуемое усилие порядка 160 Мн, или $16 \cdot 10^6 \text{ кгс}$.

Таких испытательных машин нет!!!

Внимание.

При расчёте деталей из стали 20 толщиной стенок 30 мм использование K_{Ic} приведёт к необоснованному завышению требований к размерам трещин или занижению допускаемых напряжений.



Ограничение при определении критического КИН K_{Ic}

Для стали 20 значение $G_{Ic} = K_{Ic}^2 / E = (100 \cdot 10^6)^2 / (2 \cdot 10^{11}) = 0,5 \cdot 10^5$ Дж/ м²,
или $G_{Ic} = 5$ Дж/ см². Для сравнения: $KCU \geq 50$ Дж/ см² стали 20.

Пример

При 20°C критический $K_{Ic} = 92$ МПа · м^{1/2} стали Н18К9М5Т при $\sigma_T = 1670$ МПа.

Сталь Н18К9М5Т ($\leq 0,03\%C$, $\approx 0,7\% Ti$) мартенситностареющая.

Закалка 850°C ($\sigma_{0,2} \approx 1100$ МПа, $KCU \approx 200$ Дж/ см²)

+ отпуск 500°C ($\sigma_{0,2} \approx 2000$ МПа, $KCU \approx 40 \dots 60$ Дж/ см² при - 40 °C).

В данном случае $t_r \geq 2,5 (K_{Ic} / \sigma_T)^2 = 2,5(92/1670)^2 \text{ м} = 0,0076 \text{ м} = 7,6 \text{ мм}$.

Ширина стандартного образца с центральной трещиной $b \geq 8 t = 60$ мм,
длина трещины $2l \cong 20$ мм, площадь поперечного сечения $\cong 300$ мм².

Требуемое усилие всего порядка $50 \cdot 10^3$ кгс.

Внимание

Линейная механика разрушения применима,

если $t_r \geq 2,5 (K_{Ic} / \sigma_T)^2$ с учётом **поправки Ирвина на длину трещины**.

В этом случае распространение трещин контролируется КИН, а критический КИН = K_{Ic} .

Считается корректным применение линейной механики разрушения, если
критическое напряжение в сечении с трещиной не более $0,8 \sigma_T$.

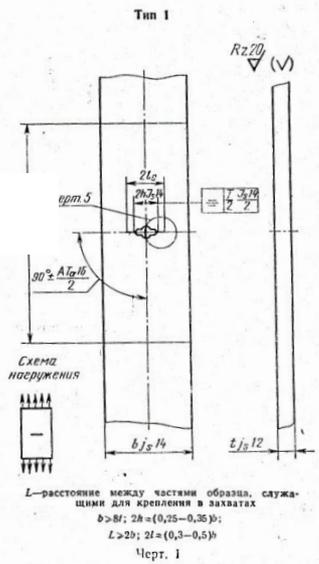
Если $\sigma > 0,8 \sigma_T$, то применяют методы нелинейной механики разрушения,
основанные на использовании теории пластичности.

Определение трещиностойкости металлов (ХТС) при статическом нагружении (ГОСТ 25506-85)

ГОСТ 25506 -85 устанавливает методы определения ХТС образцов не менее 1 мм при температурах от $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$.
ХТС используют

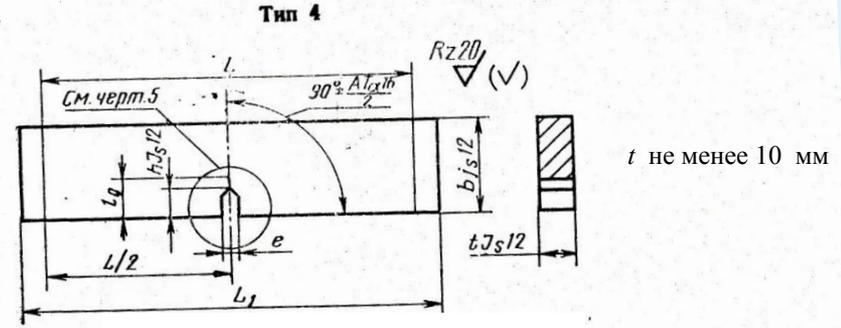
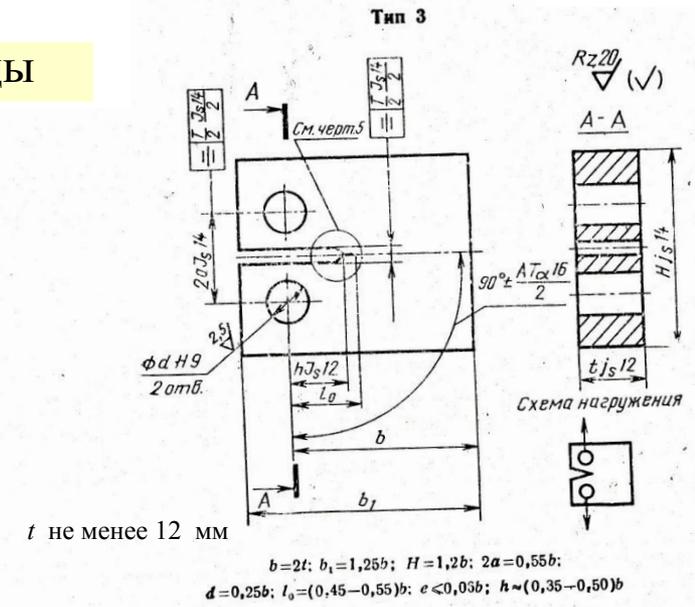
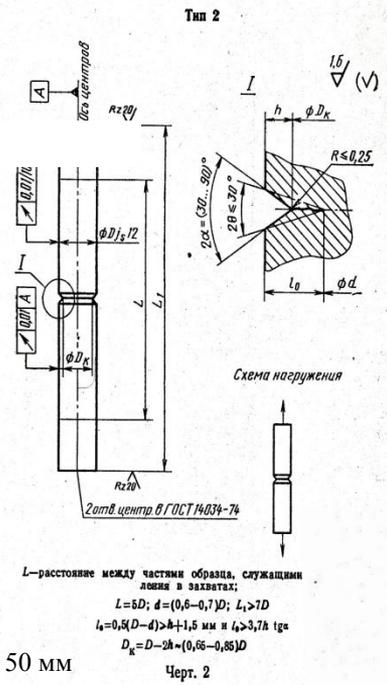
- при сравнении вариантов состава и структуры сплавов, технологических процессов;
- при обосновании способов контроля и выбора материалов машин и конструкций;
- при расчётах на прочность элементов конструкций с трещинами;
- при анализе причин аварий и разрушения конструкций.

Стандартные образцы



b не менее 50 мм

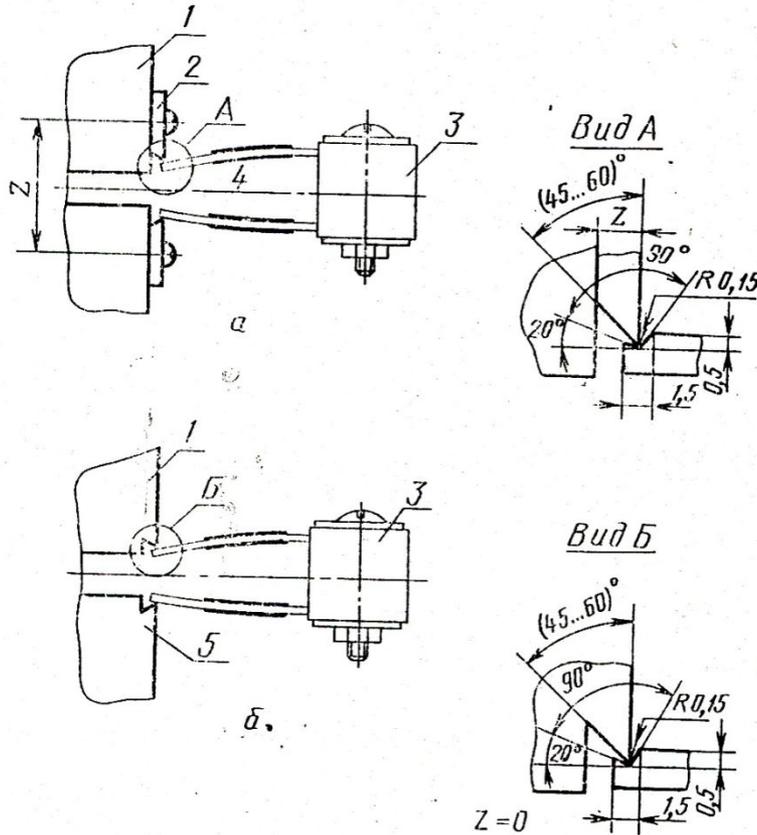
D не менее 50 мм



Критические J_c и J_{cI} определяют на образцах 3 и 4.

Испытание образцов

Образцы испытывают на разрывных машинах с записью диаграмм нагружения в координатах «нагрузка – смещение» ($P - v$) или «нагрузка – прогиб» ($P - f$).



1—образец; 2—накладные опорные призмы; 3—датчик смещения; 4—плоскость надреза; 5—призматические выступы

Черт. 6

Измерение смещений v и погибов f производится двухконсольным тензодатчиком.

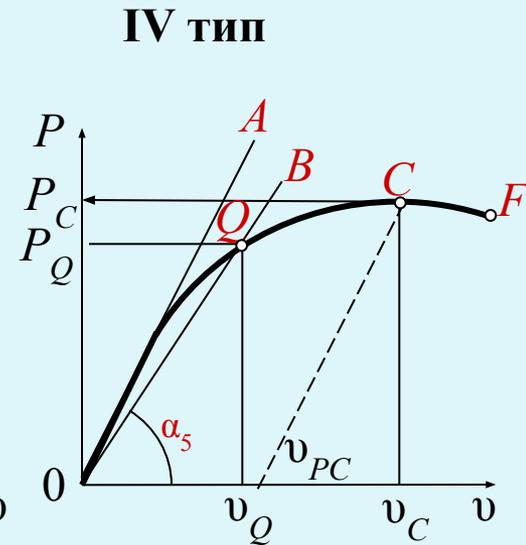
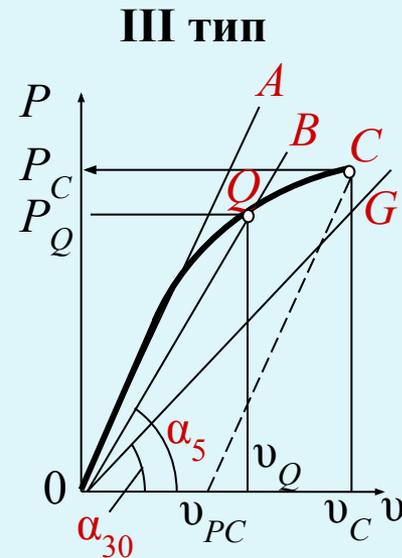
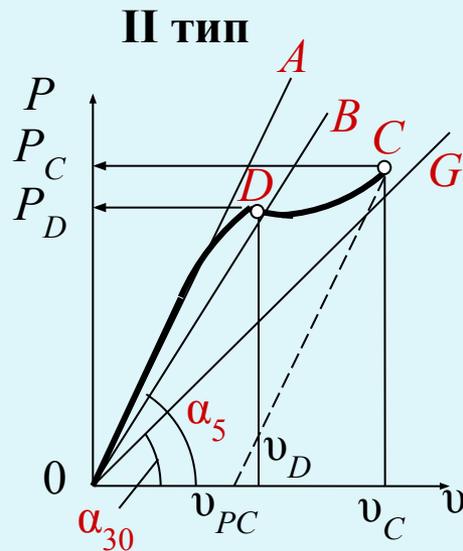
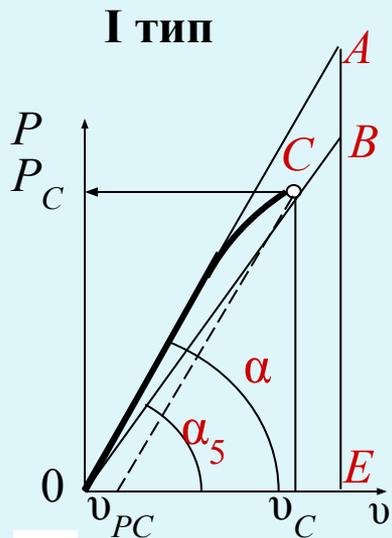
Погрешность датчиков не более $\pm 0,01$ мм. Разность показаний прямого и обратного хода рабочего диапазона диаграммы до 2%..

Скорость нагружения на линейном участке диаграммы $(0,5 \div 1,5) \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Масштаб по оси K диаграммы не менее 50:1, по оси v или f — не менее 25:1.

Тангенс угла наклона линейного участка диаграммы в пределах от 1 до 3.

Характерные типы диаграмм



В случае I типа после разрушения образца определяют длину усталостной трещины как среднее арифметическое трёх измерений на расстоянии $0,25t$, $0,5t$, $0,75t$ от внешней поверхности плоского образца.

Для цилиндрических образцов определяют максимальное и минимальное значение диаметра; если разность более 10%, отбраковывают.

В случае разрушения образцов По II, III или IV типу необходимы дополнительные несколько образцов с замером подрастания трещины при испытании.

Обработка результатов

Вычисление критических КИН

1. По значениям P_Q определяют **расчётное значение** K_Q по формулам для КИН:
- $K_Q = [P_Q / (tb^{1/2})] \cdot Y_1$ – для образцов типа 1 ;
 - $K_Q = [P_Q / D^{3/2}] \cdot (Y_2' + Y_2'')$ – для образцов типа 2 ;
 - $K_Q = [P_Q / (tb^{1/2})] \cdot Y_3$ – для образцов типа 3;
 - $K_Q = [P_Q L / (tb^{3/2})] \cdot Y_4$ – для образцов типа 4 .

Значения $Y_1, Y_2', Y_2'', Y_3, Y_4$ табулированы.

Допускается поправочные функции вычислять по формулам:

$$Y_1 = 0,2369 [1 + 6,627 (2l/b)]; \quad Y_2' = 4 [1 - 1,0179 (d/D)]; \quad Y_2'' = 3,1 (2s/d) \text{ при } 2s < 0,08 d;$$

s – расстояние между центром поперечного сечения и центром излома

$$Y_3 = -5,219 [1 - 5,739(l/b)]; \quad Y_4 = -1,555 [1 - 5,456(l/b)].$$

2. Вычисление **критического** K_{IC} по тем же формулам для K_Q по следующей схеме:

- по K_Q и σ_T рассчитывают критического значение толщины образца $t_{PK} = \beta_K (K_Q / \sigma_T)^2$,
 $\beta_K = 2,5$ для сталей, алюминиевых, титановых и магниевых сплавов, $\beta_K = 0,6$ для чугуна;
для цилиндрических образцов $D_{PK} = 2,3 (K_Q / \sigma_T)^2$, $d_{PK} = 1,6 2,3 (K_Q / \sigma_T)^2$.
- принимают $K_{IC} = K_Q$, если $P_C \leq 1,1 P_Q$ (или $P_C \leq 1,1 P_D$)
и если выполняется одно из двух неравенств:

1) $t_{PK}/t \leq 1$ и $\phi_C = [(t - t_C)/t] \cdot 100\% \leq 1,5\%$, где t_C – средняя толщина в зоне разрушения;

2) $v_C \leq 1,2 v_Q$ или $v_C \leq 1,2 v_D$; для цилиндрических $D_{PK}/D \leq 1$ и $d_{PK}/d \leq 1$.

Вычисление критических КИН

3. Значения **условного критического** КИН K^* при *исходной длине трещины* определяют по тем же формулам, заменяя в них P_Q на P_C .

4. **Критический** КИН K_{QT} при нагрузке P_Q и *длине трещины* l_T (с учётом поправки на пластическую деформацию в вершине трещины) определяют в зависимости от σ_{C0}/σ_T .

Значение σ_{C0} вычисляют по формулам:

- $\sigma_{C0} = P_Q / [(b - 2l) t]$ для образцов типа 1;
- $\sigma_{C0} = 4P_Q / (\pi d^2)$ для образцов типа 2;
- $\sigma_{C0} = P_Q [1 + 3(b + l)/(b - l)] / [(b - l) t]$ для образцов типа 3;
- $\sigma_{C0} = 6P_Q b / [(b - l^2) t]$ для образцов типа 4;

• Вычисляют значение K_Q по формулам для КИН, если $\sigma_{C0}/\sigma_T < 0,8$;

• Вычисляют по полученному K_Q значение расчётной длины (полудлины) трещины l_T :

1) $l_T = l + (K_Q / \sigma_T)^2 / (\gamma \pi)$ для плоских образцов, где $\gamma = 210 t^* + 1,8$ при $t^* = 1 \cdot 10^{-3} \dots 20 \cdot 10^{-3}$ и $\gamma = 6$ при $t^* > 20 \cdot 10^{-3}$ (t^* – безразмерное значение, численно равно толщине образца в м).

2) $d_T = d - (K_Q / \sigma_T)^2 / (3\pi)$ для цилиндрических образцов.

• Вычисляют значение K_{QT} по формулам КИН, заменяя l на l_T (или d на d_T).

5. **Критический** КИН K_C при *данной толщине* (или диаметре) образца рассчитывают по формулам КИН K_{QT} с заменой P_Q на P_C , если $\sigma_{C0}/\sigma_T < 0,8$.

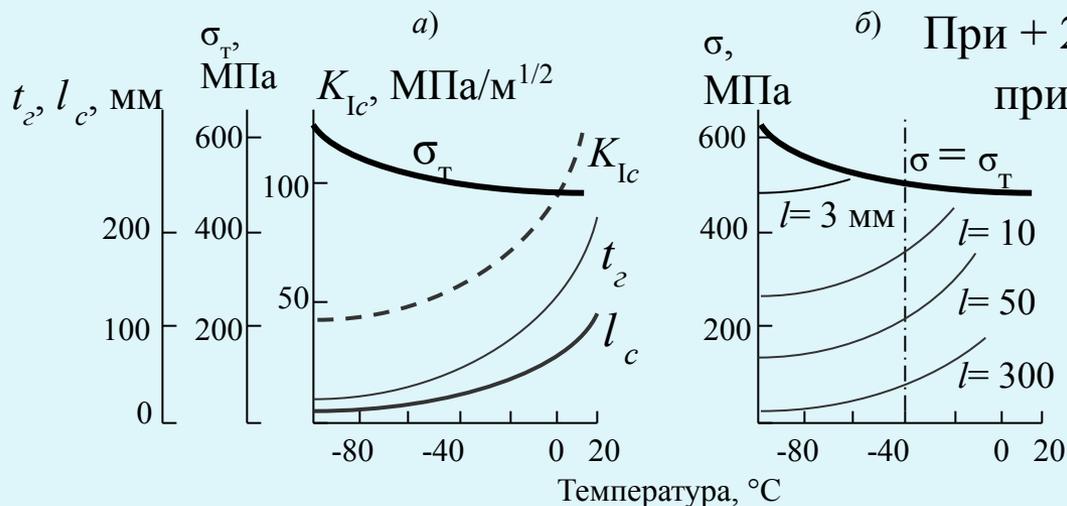
Вычисление критических КИН

| Критический КИН | Наименование КИН | Расчётное усилие | Расчётная длина трещины | Примечание |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| K_Q $K_{1C} = K_Q$ | Расчётный КИН Критический при предельном стеснении деформации | P_Q или P_D | l_0 | Условия корректности выполняются |
| K_{QT} | Критический для образца данной толщины | P_Q или P_D | l_T или d_T | Условия корректности не выполняются, |
| K_C | Критический для образца данной толщины при максимальной нагрузке | P_C | l_T или d_T | но $\sigma_{C0} / \sigma_T < 0,8$ |
| * K_C | Критический условный для образца данной толщины | P_C | l_0 | |

Влияние температуры на критический КИН K_{Ic}

Пример. Сталь 20ГНМ, $\sigma_T = 500$ МПа при 20°
С.

На рис а даны зависимости $\sigma_T(t^\circ\text{C})$ и $K_{Ic}(t^\circ\text{C})$.



б) При $+20^\circ\text{C}$ $t_r = 225$ мм; $K_{Ic} = 150$ МПа \cdot м $^{1/2}$;
при -100°C $K_{Ic} = 42$ МПа \cdot м $^{1/2}$ и $t_r = 17$ мм.

По формуле $K_I = \sigma \sqrt{\pi(l + r_T)}$
находят разрушающее напряжение σ
при данной длине трещины l и $t^\circ\text{C}$.

Расчётные значения даны на рис. б.

Сравним значения разрушающего напряжения σ при рабочей температуре -40°C ,

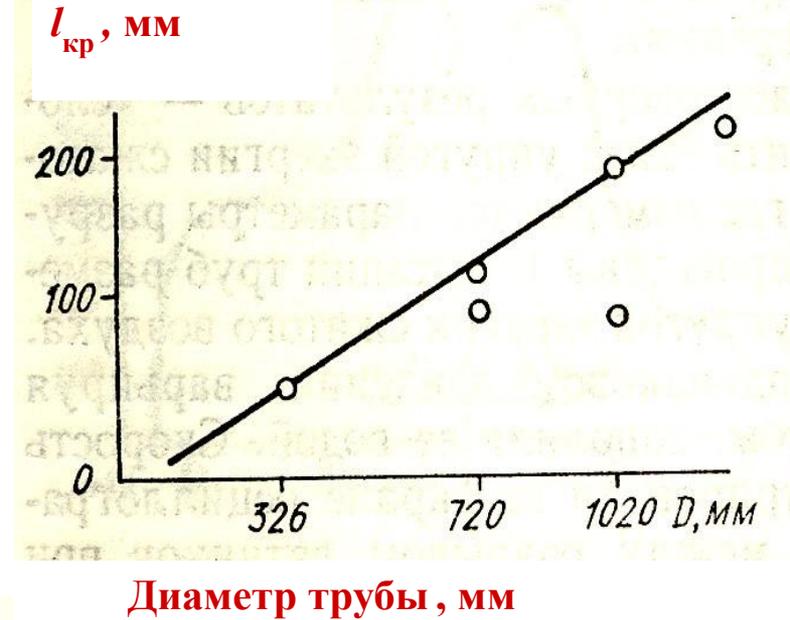
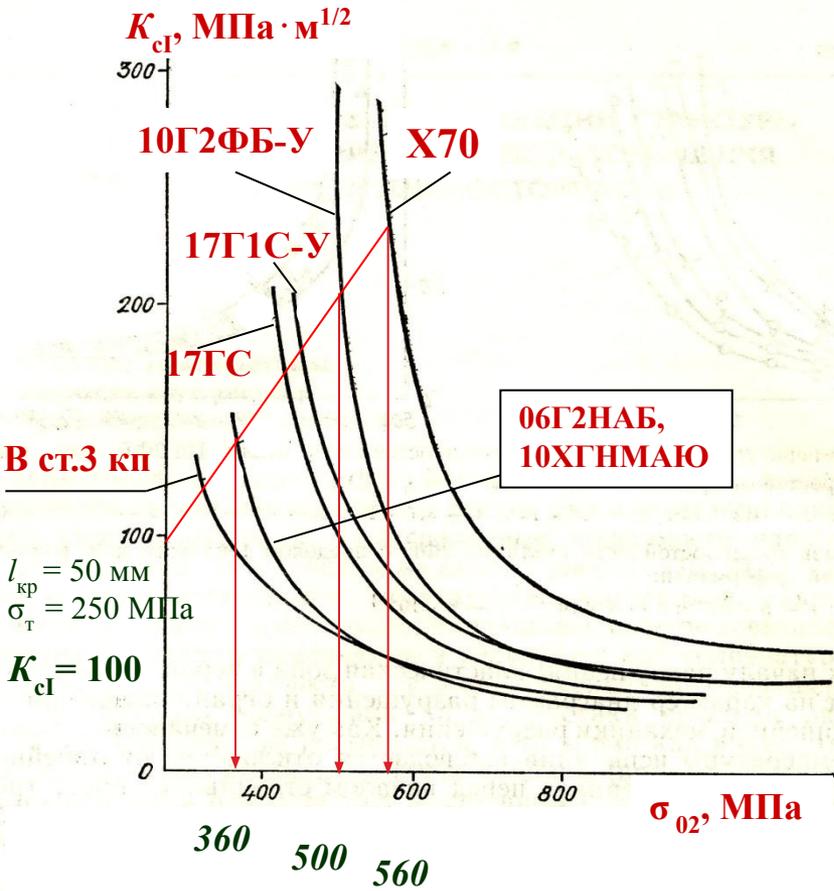
- при $l = 3$ мм хрупкого разрушения нет; $K_{Ic} = 55$ МПа \cdot м $^{1/2}$ и $\sigma_T = 520$ МПа
- при $l = 10$ мм хрупкое разрушение имеет место $\sigma = 0,6 \sigma_T$;
- при $l = 50$ мм хрупкое разрушение имеет место $\sigma = 0,28 \sigma_T = 140$ МПа $<$ $[\sigma] = 250$ МПа (!)

Допускаемые значения характеристик принимают одним из двух способов:

- по условию $s_K = K_{Ic} / K_I \geq [s_K]$ определяют допускаемое значение длины трещины данного материала $[l] = (K_{Ic} / [s_K])^2 : (\pi \sigma^2)$; в условиях эксплуатации должно быть $l \leq [l]$;
- по условию $s_l = l_c / [l] \geq [s_l]$, где $[l]$ – конструктивно допустимая длина трещины, определяют требуемое значение критической длины трещины материала $[l_c] = [l] \cdot [s_l]$ и требуемое значение $[K_{Ic}] = \sigma \sqrt{\pi [l_c]}$; материал выбирают по условию $K_{Ic} \geq [K_{Ic}]$.

Пример. Разрушение шкворня подъёмных кранов.

Механические характеристики трубных сталей



При $l_{кр} = 50 \text{ мм}$, $[s_k] = \text{idem}$
 $K_{cl} / \sigma_{02} = \text{idem}$

Применение КИН K_{Ic} при определении причины аварии

Пример.

Цилиндр мультипликатора гидравлического молота разрушился при ковке заготовки.

Возможные причины: - отказ системы аварийного сброса давления;
- или недостаточная прочность цилиндра.

Сбор информации.

- материал цилиндра сталь 30ХНМ; по справочным данным $\sigma_T \geq 600$ МПа, $K_{Ic} = 90$ МПа \cdot м^{1/2};
- диаметр цилиндра $d = 600$ мм, $D = 720$ мм, толщина стенки $t = 60$ мм; $p = 400$ атм.
- разрыв произошёл вдоль образующей цилиндра; в изломе отчётливо видна исходная трещина глубиной $l = 30$ мм и длиной 150 мм со следами остановок на поверхности исходной трещины.

Расчёт.

- при $K_{Ic} = 1,26 \sigma_T \sqrt{\pi l} = 90$ МПа \cdot м^{1/2} разрушающее напряжение $\sigma_c = 233$ МПа;
- расчётное давление при разрыве цилиндра $p_c = \sigma_c (D^2 - d^2) / (D^2 + d^2) = 47$ МПа = 412 атм;
- эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 2p D^2 / (D^2 - d^2) = 307$ МПа.
- запас статической прочности $s = \sigma_T / \sigma_{\text{ЭКВ}} = 600/307 = 1,95 \approx [s]$;
- значение p_c всего на 3% превышает максимальное давление мультипликатора.

Вывод.

Вероятно, разрушение произошло в результате удара по заготовке, температура которой несколько ниже минимальной температурыковки.

Прочность цилиндра по условию $s_l = l_c / [l] \approx 1,06 \ll [s_l] = 5$

недостаточна.

Вычисление раскрытия трещины δ_C

Значение δ_C вычисляют для точки C диаграмм всех типов по формулам:

$$\delta_C = \frac{K_C^{*2}(1 - \mu^2)}{2\sigma_T E} + \nu_{PC} \quad \text{для образцов типов 1 и 2;}$$

$$\delta_C = \frac{K_C^{*2}(1 - \mu^2)}{2\sigma_T E} + \nu_{PC} \cdot \frac{(b - l)}{3z + 1,75b + 2l} \quad \text{для образцов типа 3;}$$

$$\delta_C = \frac{K_C^{*2}(1 - \mu^2)}{2\sigma_T E} + \nu_{PC} \cdot \frac{0,4(b - l)}{0,4b + 0,6l + z} \quad \text{для образцов типа 4;}$$

z — расстояние между торцевой поверхностью образца и кромками накладных опорных призм
(практически равно толщине накладных опорных призм).

Значения K_C^* , δ_C и ν_{PC} заносят в протокол испытания.

Модели нелинейной механики разрушения

3. Инвариантный интеграл

Интеграл по контуру Γ_1 называют J – интегралом.

В общем случае пластического деформирования вблизи вершины $J_1 = |J_2|$, если оба контура Γ_1 и Γ_2 проходят в упругой области деформирования.

Следовательно, по изменению J – интеграла можно определить энергию, расходуемую на пластическую деформацию и разрушение при распространении трещины.

Критерий разрушения формулируется следующим образом:

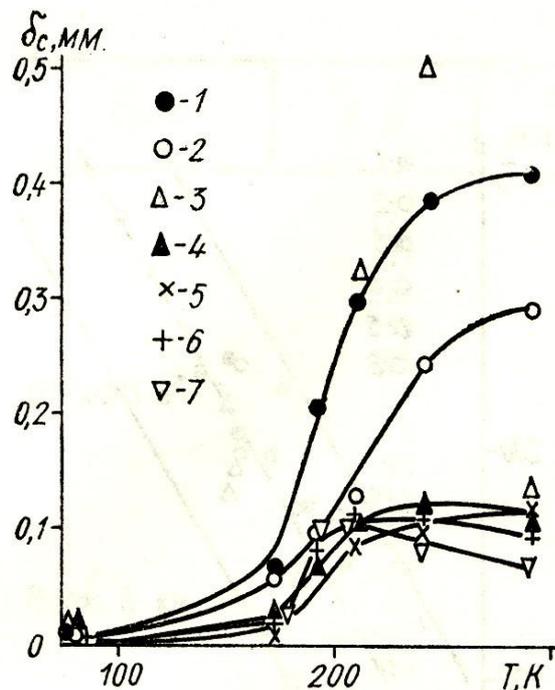
трещина распространяется, если J достигнет критического значения, т.е. $J = J_c$.

Использование критерия $J = J_c$ возможно только при наличии экспериментально определённых значениях J_c или J_{Ic} , т.к. они зависят от условий нагружения и образца.

1. В случае хрупкого разрушения ($\sigma_c \leq 0,8\sigma_T$) $J_{Ic} = G_{Ic}$; для ПДС $(1 - \mu^2)K_{Ic} = E J_{Ic}$, что эквивалентно критерию Ирвина.
2. Для тонкой пластической зоны δ_c – модели предельное значение $J_c = \sigma_0 \delta_c$.
3. При пластической деформации по объёму образца J – интеграл не характеризует поток энергии в вершине трещины. Однако критерий разрушения в виде $J = J_c$ сохранили.
4. Расчётное значение J определяют по формуле Дж. Райса: $J = - \delta U / \delta l$,

где δU – вариация потенциальной энергии системы сил (поверхностных и упругого деформирования) при увеличении трещины на δl .

Температурная зависимость критических параметров разрушения трубных сталей перлитного класса



Температурные зависимости критического раскрытия трещины δ_c для исследуемых сталей:

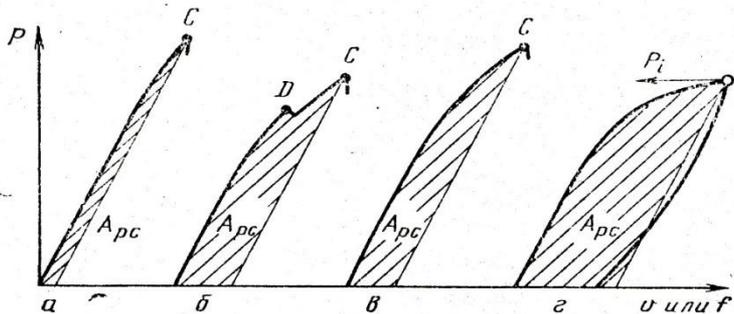
1 — X70; 2 — 10Г2ФБ; 3 — 10Г2ФБ-У;
4 — 17Г1С-У; 5 — 17ГС; 6 — 06Г2НАБ;
7 — 10ХНМАЮ

Вычисление критических значений J_C – интеграла

На диаграмме « $P-v$ » (или « $P-f$ ») выделяют «пластическую часть», заключённую между линией диаграммы от т. O до т. C и прямой, проведённой параллельно линейному участку диаграммы до пересечения с осью v (или f).

Вычисляют работу A_{PC} , соответствующую «пластической» части диаграммы.

Схема выделения пластической части по диаграммам « $P-v$ » или « $P-f$ »



а—диаграмма I типа; б—диаграмма II типа; в—диаграмма III типа; г—при разгрузке образца; о — точка разгрузки образца

Значения J_C – интеграла вычисляют по формуле

$$J_C = \frac{K_C^{*2} (1 - \mu^2)}{E} + \frac{A_{PC}}{(b-l)t} \cdot \frac{\chi}{k},$$

где l – исходное значение длины трещины;

$$\chi = 2 + 0,522 (b-l)/b;$$

$$k = 1 + r_V / [l + 0,1(b-l)]; r_V = 0,25 b + z$$

– для образцов типа 3;

$$\chi = 2; k = 1 \text{ – для образцов типа 4.}$$

1. Если подрост трещины для разрушенного образца $\Delta l \leq 0,3$ мм при $t \leq 30$ мм или $\Delta l \leq 0,01t$ при $t > 30$ мм, то определяют по диаграмме значение A_{PC} и вычисляют J_C

2. При испытании серии образцов при различных $v_i \leq 0,9 v_{PC}$ определяют

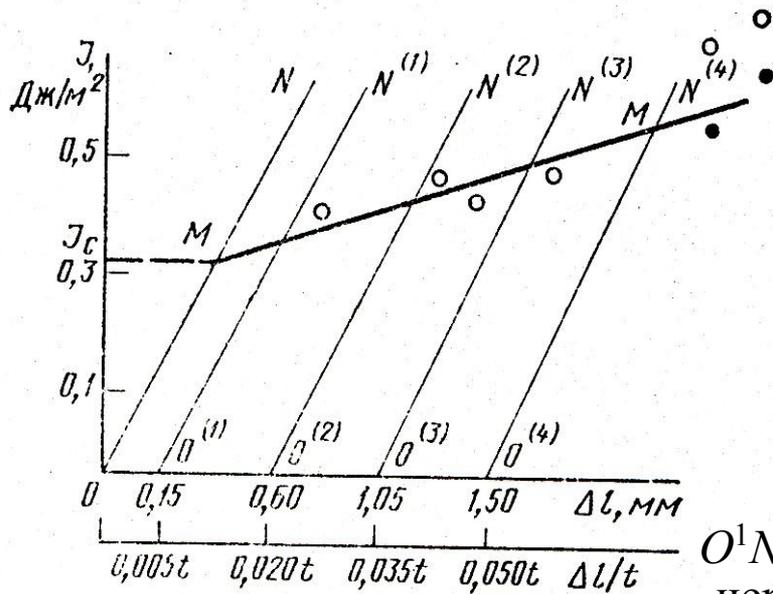
– Δl_i для каждого образца при данном значении v_i ;

– значение работы A_{P_i} (рис. г) для каждого образца при данном значении v_i ;

– значение J_i для каждого образца при данном значении Δl_i ;

(при расчёте по формуле для J_C заменяют J_C на J_i , A_{PC} на A_{P_i} и P_C на P_i).

Вычисление критических значений J_C – интеграла



● – скорректированные значения J_i

В координатах « $J - \Delta l$ » (или « $J - \Delta l/t$ »)

1) строят прямую ON , вычисленную по формуле

$$J = (\sigma_T + \sigma_B) \Delta l \text{ при } t \leq 30 \text{ мм,}$$

$$J = (\sigma_T + \sigma_B) \Delta l / t \text{ при } t > 30 \text{ мм;}$$

2) проводят через стандартные точки Δl (или $\Delta l/t$) остальные прямые $O^i N^i$ (см. рис.);

3) наносят на схему парные точки $J_i - \Delta l_i$.

Ограничения

1. Если не менее 4-х точек оказались в интервале $O^1 N^1 - O^4 N^4$ и в каждом интервале не менее одной точки, через эти точки проводят прямую MM и определяют J_C .

2. Если не более 2-х точек находятся правее линии $O^4 N^4$ и не менее точек в разных интервалах левее линии $O^4 N^4$, то для точек правее линии $O^4 N^4$ вводят коррекцию

$$J_i = \frac{K_i^{*2} (1 - \mu^2)}{E} + \frac{A_{P_i}}{S(b-l) + \chi \Delta F} \cdot \frac{\chi}{k}, \text{ где } K_i^* \text{ условный КИН при } P_i \text{ и } l_i;$$

S и ΔF – соответственно, длина контура и площадь статически подресшей трещины:

$$S = 4 [(\Delta l_3 - \Delta l)^2 + (t/4)^2]^{1/2} \text{ и } \Delta F = \Delta l t,$$

Δl_3 – подрост усталостной трещины в срединном сечении образца, Δl – средний прирост.

3. Принимают $J_C = J_{1C}$, если $t_{PJ} / t \geq 1$, где $t_{PJ} = \beta_J J_C / (\sigma_T + \sigma_B)$;

$\beta_J = 200$ при $\sigma_T / \sigma_B < 0,6$ и $\beta_J = -375(\sigma_T / \sigma_B) + 425$ при $\sigma_T / \sigma_B \geq 0,6$.

Допускается расчёт

$$J_{1C} = K_{1C}^2 (1 - \mu^2) / E$$

Параметры температурных зависимостей ХТС

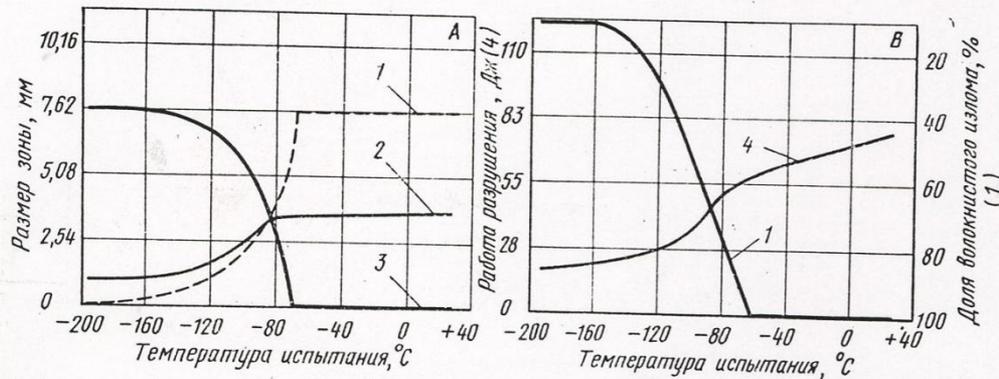
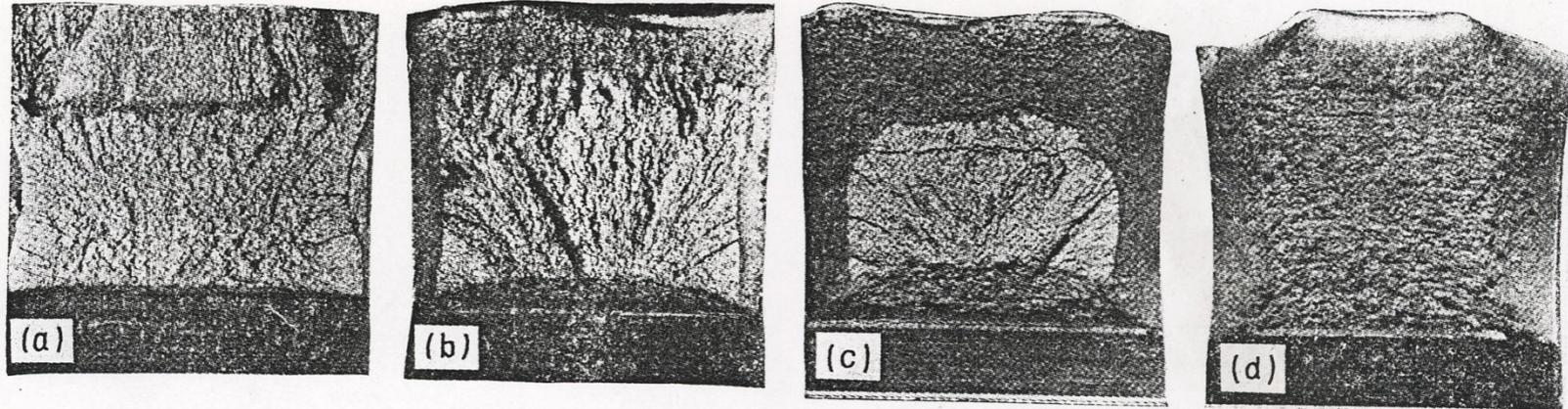
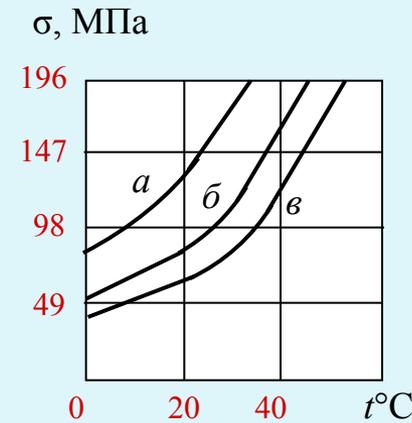
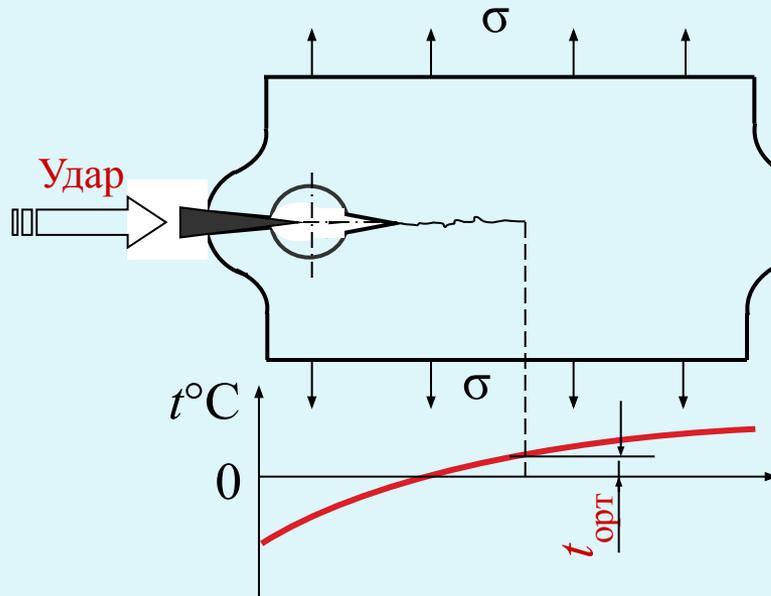


Рис. 41. Влияние температуры испытания на вид излома и ударную вязкость стали 4340 [4]. На фрактограммах (увеличение $\times 4,4$), расположенных сверху, показаны изломы ударных образцов Шарпи сечением 10×10 мм, вырезанных из прутков сечением 14×14 мм и обработанных по режиму: закалка в масле с 871°C , отпуск при 554°C , 1,5 ч, охлаждение в масле и отпуск при 299°C , 3 ч, охлаждение на воздухе. Образцы были испытаны при 40 (d), при -80 (c), при -120 (b) и при -196°C (a). Линейные измерения были сделаны параллельно надрезу для зон среза (зон боковых скосов), перпендикулярно надрезу для волокнистой зоны (от очага разрушения в надрезу до начала радиальных рубцов) и перпендикулярно надрезу для зоны радиальных рубцов (от конца волокнистой зоны до зоны среза); в результате проведенных измерений получены три кривые на графике А. Кривая зависимости доли волокнистой составляющей в изломе от температуры на графике В была построена по визуальной оценке. Сравнение этой кривой с кривой зависимости ударной вязкости от температуры на графике В показывает, что температура вязко-хрупкого перехода, определенная по виду излома, совпадает с аналогичной температурой, определенной по ударной вязкости: 1 — волокнистая зона; 2 — зона боковых скосов; 3 — зона с радиальными рубцами; 4 — работа разрушения

Параметры температурных зависимостей ХТС

Испытание с остановкой трещины отрыва по Робертсону



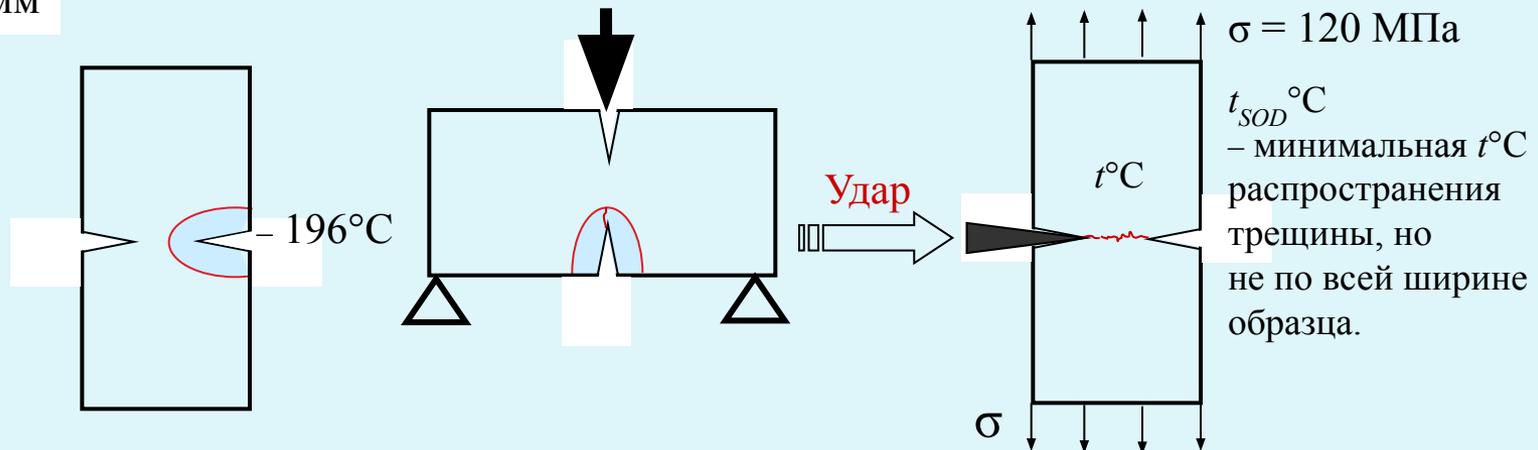
Зависимость « $t_{орт} - \sigma$ »
для толстолистовой стали ($\sigma_T = 216$ МПа)

- a* – толщиной 50 мм;
- б* – толщиной 100 мм;
- в* – толщиной 200 мм.

Испытание с остановкой трещины отрыва по ESSO

$B = 406 \dots 1829$ мм

$L = 915 \dots 1829$ мм



Общенаучные методы

исследования

Подходы к объекту, используемые в

исследованиях

Мыслительно-логические методы исследования

Аналоговый используется чаще всего на начальном этапе исследования при отсутствии

или крайне малой информации об объекте В качестве аналога

принимается

Редукционистский (*аддитивный*) используется, если есть достаточные основания объект, близкий по характеристикам

полагать, исследуемому

Комплексный ориентирован на то, что сводится к сумме свойств составляющих его элементов.

Системный предполагает исследование объекта как в совокупности всех его составляющих.

Принципы системного подхода

1. **Целостность** (*холизм*) объекта.

2. **Иерархическое**, функционально-структурное строение объекта:

- определение функциональное назначение каждой составляющей объекта;
- обусловленность процесса функционирования объекта не столько

свойствами

его отдельных частей, сколько свойствами самой структуры объекта, т.е

взаимодействием частей строения;

3. **Совместимость** частей объекта, как способность части соответствовать своему

Ситуационный предполагает рассмотрение функционирование объекта в положении и функциональному статусу в составе объекта зависимости от

Диалектической ориентирует на исследование влияние разнонаправленных изменений среды (условий функционирования) с учётом внутренних противоречий самого объекта

Принципы диалектического
подхода:

1. Движение и развитие.
2. Объективность.
3. Учет противоречивости; предписывает вскрывать противоречия как движущую силу всяких изменений
4. Проверимость практикой.
5. Относительность: предписывает выяснять границы, в пределах которых действительны свойства объекта
6. Взаимодействие частей объекта

Исторический акцентирует внимание на тенденции развития, преобразование объекта

Логический (структурный) в противовес и дополнение к историческому акцентирует внимание исследователя не на строго фактологической стороне развития

объекта исследования, а на логичности этого

Механистический ориентирует на исключительно причинно-следственные связи в развитии

Фрагментарный направляет исследование не столько на поиск теоретических оснований генезиса, сколько на случайности некоторых факторов его

объяснений изучаемого явления, сколько извлечением из результатов исследования

Нормативный (прескриптивный) ориентирует исследователя на сравнение действительности с предписанным нормативными документами порядком пользования вещью. наибольших выгод для пользователя.

Мыслительно-логические методы

исследования

Абстрагирование — выделение существенных, по мнению исследователя, определяющих свойства, связи и отношения объекта исследования.

1. Суждения — утверждения о связях и отношениях между образами, возникающими

при воспоминании или конструировании исследуемых объектов.

2. Понятие — мыслительный объект, отражающий существенные и необходимые (неотъемлемые) признаки предмета (явления); результат обобщения суждений.

3. Гипотеза — подлежащая обоснованию система понятий и суждений о существенных связях и отношениях, определяющих существование и развитие исследуемого объекта.

Результат — теоретическая модель; нет оснований считать, что дальнейшее развитие этой модели соответствует некоторой области действительности,

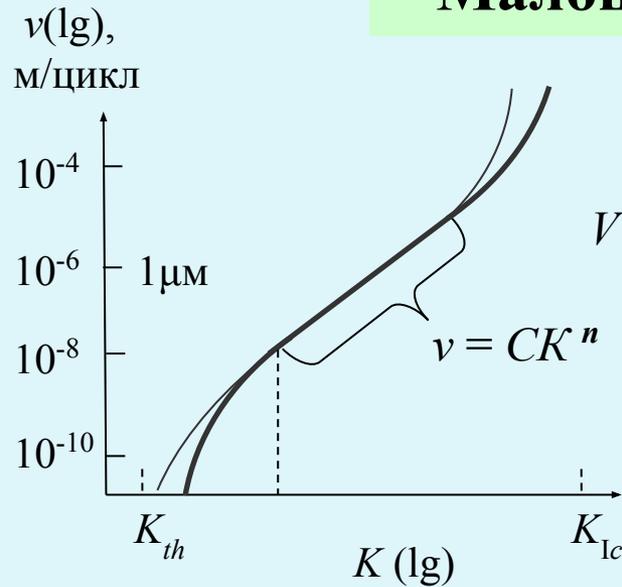
реальным объектам.
Формализация — отображение объекта или явления в знаковой форме какого-то искусственного языка (математики, химии и др.) с целью исследования реальных объектов и их свойств через формальное исследование соответствующих знаков.

Классификация — разделение некоторого множества объектов на группы (классы) в соответствии с общностью и различием (общим и специфическим) свойств, связей и отношений.

Обобщение (индуцирование) — обоснование на новом уровне знания более широкого по объему нового понятия, отражающего общность свойств нескольких групп объектов.

Обобщение возможно, если выявлено **свойство**, позволяющее сгруппировать

Малоцикловая усталость металлов

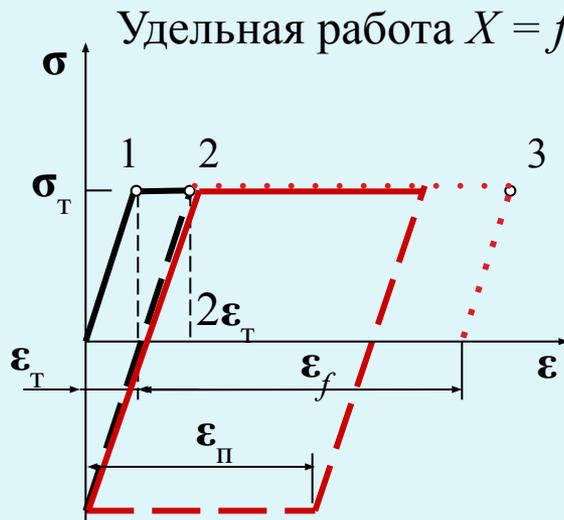


Скорость роста трещины (прирост на цикл) на несколько порядков меньше размеров зерна металла.

$V = CK^n$ – уравнение Пэриса – Эрдогана, где n – показатель степени, $2 \leq n \leq 8$.

Уравнение $v = CK^n$ не удовлетворяет правилу размерностей.

Уравнение $v = CK^n \Rightarrow v = \frac{K^2}{EX}$, где X – характеристика материала, $[X] = \text{Н/м}^2 = \text{Дж/м}^3$. При $n = 2$ величина $X = idem$, не зависит от K .



Удельная работа $X = f(\sigma, \epsilon)$.

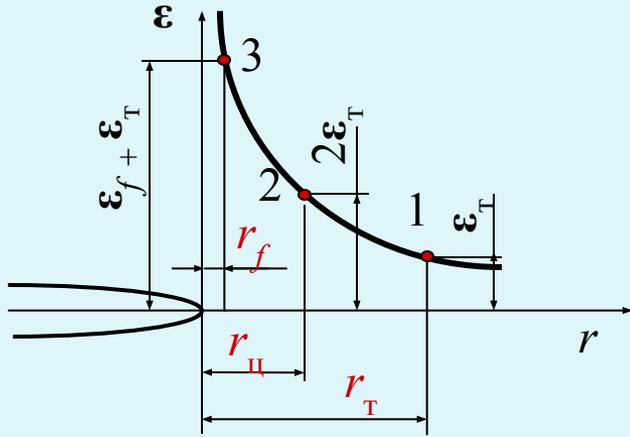
ϵ_f – пластическая деформация микрообъёма в вершине трещины в последнем для него цикле нагружения;
 X_f – работа разрушения микрообъёма в вершине трещины в последнем для него цикле нагружения;

Упрощённо можно принять $X_f = \sigma_T \epsilon_f$.

Инвариантом разрушения может быть X_f или ϵ_f .

Предпочтительнее $\epsilon_f = idem$, т.к. ϵ_f – безразмерная величина.

Малоцикловая усталость металлов



r_f – расстояние от вершины трещины до микрообъёма, в котором образовалась субмикротрещины;

r_f равен шагу трещины малоциклового разрушения на линейном участке диаграммы МЦР.

$$r_T = (K/\sigma_T)^2 / (2\pi) \text{ или } r_T = (K/\sigma_T)^2 / (6\pi);$$

r_T – радиус зоны пластической деформации в вершине;

ε – деформация материала вблизи вершины трещины.

Примем, что $\varepsilon = \varepsilon_T (r_T/r)^{1/q}$, где q – любое число, одинаковое для подобных процессов; тогда деформация $\varepsilon_{\text{Ц}} = 2\varepsilon_T = \varepsilon_T (r_T/r_{\text{Ц}})^{1/q} \Rightarrow r_{\text{Ц}} = r_T/2^q$.

Для упругого материала $q = 2$ и $r_{\text{Ц}} = 0,25r_T$; для идеально пластичного $q = 1$ и $r_{\text{Ц}} = 0,5r_T$.

$$\text{Значение } r_f = r_T (\varepsilon_T/\varepsilon_f)^q = [(K/\sigma_T)^2 / (6\pi)] \cdot (\varepsilon_T/\varepsilon_f)^q.$$

Тогда для подобия процессов необходимо при $\varepsilon_f = \text{idem}$ выполнять условие испытания

$$K/\sigma_T = \text{idem}.$$

Это условие выполнимо только при испытании **геометрически подобных образцов** и равном для разных материалов отношении σ/σ_T .

Доказательство — установление некоторого суждения, посредством его вывода из других суждений, истинность которых полагается ранее установленной и независимой от данного доказательства.

Доказательство посредством подтверждения фактами и практической деятельностью (12)

Дедукция (дедуктивное умозаключение) — выведением свойств составных частей исследуемого объекта из общих закономерностей, свойственных целому

Индукция (индуктивное умозаключение) — выведением свойств исследуемого объекта

Анализ — мысленное расчленение исследуемого объекта на составные части для изучения каждой из них и выявления значения каждой части в существовании и функционировании всего объекта.

Основа анализа — абстракция.

Синтез — представлению исследуемого объекта как целого, хоть и состоящего из условно выделенных составных частей.

Основа синтеза — системное сведение частей к целому.

Интеллектуальное (абстрактное) моделирование — метод познания, опирающийся на символные модели и абстрагирование.

Мыслительный эксперимент — исследование поведения объекта на основе его модели и принятие решения о соответствии полученных таким образом следствий известным данным о поведении реальных объектов.

Вычислительный эксперимента — один из способов реализации мыслительного эксперимента.

В процессе доказательства **три фазы:**

Тезис — суждение, истинность которого устанавливается в процессе доказательства

(т. е. априорный результат

доказательства).

Аргументы — суждения, из которых выводится тезис.

Демонстрация — логическая форма связи двух названных фаз,

Виды доказательства:

от определения — обуславливающая необходимость выведения одного из другого тезиса из аргументов (как их следствия).

практическому опыту;

— **от обратного** — доказательством истинности (корректности) первоначального суждения является абсурдность противоположного суждения

— **на основе анализа соответствия свойств и структуры** исследуемого объекта ;

— **на основе классификации факторов**, позволяющей выявить свойства объекта исследования и причины его специфического

поведения;

— **аксиоматическое** — на основе несколько бесспорных, понятных и разделяемых всеми

положений (аксиом), исходя из которых строится

доказательство;

— **фактологическое** — на основе систематизации фактов;

— **концептуальное** — по выдвинутой рабочей гипотезе;

— **экспериментальное** — по результатам экспериментирования;

— **по концентрации фактов** — по накоплению убедительных фактических характеристик тезиса; модальности (вероятное выдается за действительное /

Терминальные

ценности

| | 2004 | 2017 |
|--------------------|------|------|
| Здоровье | 10 | 5,94 |
| Любовь | 7,4 | 7,18 |
| Бизнес | 2,5 | 3,59 |
| Матер. Обесп. | 6,5 | 7 |
| Друзья | 7,8 | 5,88 |
| Общ. признание | 4,1 | 3,59 |
| Семья | 6,6 | 6,35 |
| Самостоятел. | 5,6 | 5,76 |
| Собственнос | 1,9 | 5,59 |
| ть | 5 | 4,71 |
| Доп. Образов. | 4,4 | 5,18 |
| Интер. Работа | 4,7 | 5,24 |



Недостающие

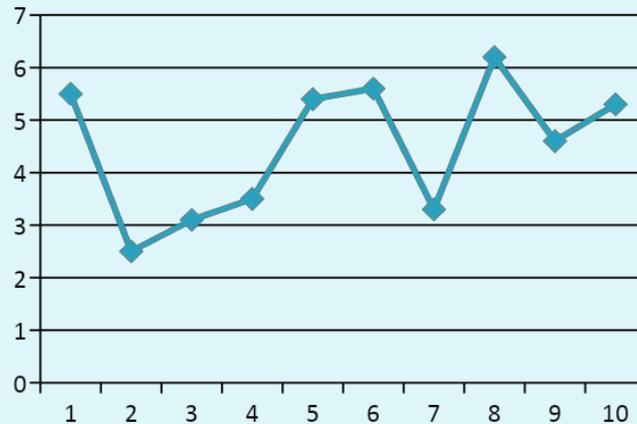
качества

| | 2004 | 2017 |
|----------------------------|------|-------|
| самодисциплина | 11,4 | 13,41 |
| добросовестн | 10,4 | 12,47 |
| воспитанность | 8,5 | 11,06 |
| целеустремлённость | 14,2 | 11,41 |
| убеждён в | 10,2 | 6,18 |
| полезности. | 8,6 | 8,88 |
| общительность | 7,8 | 9,65 |
| прогноз последствий | 12,5 | 8,88 |
| воля | 10,4 | 10,83 |
| эффективность | 10,2 | 9,82 |
| работоспособность | 7,8 | 12,12 |
| решительность | 11 | 12,29 |
| самостоятельность. | 8,7 | 10,41 |
| логическое мышление | 10,5 | 5,53 |
| ответственность | 6,8 | 10,59 |
| твёрд. мнения | 6,6 | 7,29 |
| быстр. | 8 | 7,94 |
| переориентация. | 9,3 | 7,24 |
| системное мышление | 11 | 7,44 |
| честность | | |
| чувство достоин | | |
| выдержка | | |

Инструментальные

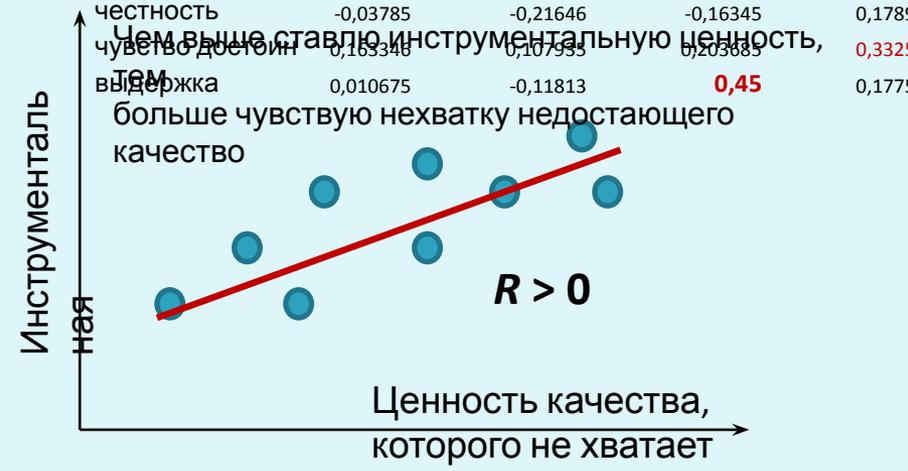
ценности

| | 2004 | 2017 |
|---------------------|------|------|
| Эффект. в | 5,5 | 4,12 |
| делах | 2,5 | 4,71 |
| Понять других | 3,1 | 4,18 |
| Исполнит. | 3,5 | 5,18 |
| Воспитанность | 5,4 | 4,47 |
| Твёрд.воля | 5,6 | 4,24 |
| Ответственн. | 3,3 | 5,18 |
| Рац. Решения | 6,2 | 3,88 |
| Профессиона | 4,6 | 4 |
| л | 5,3 | 4,65 |
| Честность | | |
| Действ. самост. | | |



Качества, недостающие в настоящее время

| Качество | коэфф. корреляции | эффективнос | понять других исполнителей | воспитанн | Инструментальные ценности | ответствен. | рац. решения | профессионал | Честн. |
|------------------------------------------------|-------------------|-------------|----------------------------|-----------|---------------------------|-------------|--------------|--------------|----------|
| самодисциплина | | | | | | | | | |
| п. добросовест. | -0,1303 | -0,21718 | 0,016471 | -0,22348 | 0,333489 | 0,436265 | 0,23684 | -0,34184 | -0,25497 |
| с. воспитанн | -0,0319 | 0,225735 | -0,2556 | 0,179935 | -0,278 | 0,049555 | 0,161032 | 0,144003 | 0,050719 |
| целестр. Убеж. в пол. | 0,0769 | 0,103881 | -0,23209 | 0,62 | -0,14515 | -0,43 | -0,09684 | -0,30949 | 0,63 |
| общител | 0,099229 | 0,274409 | 0,337362 | -0,39826 | -0,35751 | 0,138381 | 0,199596 | 0,06129 | -0,21349 |
| прогноз послед. воля | -0,28396 | 0,017555 | 0,043315 | 0,04621 | 0,374606 | -0,11485 | 0,55 | -0,45183 | 0,162288 |
| эффектив работосп | 0,14757 | 0,44 | 0,311957 | 0,005046 | -0,40509 | -0,04006 | -0,0947 | 0,291181 | -0,28875 |
| решительн | -0,11751 | 0,28943 | -0,13913 | -0,05419 | -0,44 | 0,27358 | 0,023087 | -0,14986 | -0,14619 |
| самостоят. лог. | 0,108041 | -0,11191 | 0,095192 | -0,16105 | 0,381931 | 0,26846 | -0,34348 | -0,03255 | -0,21442 |
| мышлен | -0,07082 | 0,196312 | -0,25396 | -0,25396 | -0,22419 | -0,45 | 0,044499 | 0,132051 | 0,183946 |
| ответств. твёрд. | 0,090871 | -0,07368 | -0,42038 | 0,127584 | -0,25212 | -0,03564 | -0,1566 | 0,54 | 0,45 |
| мнен | 0,48 | -0,51 | -0,28044 | -0,35817 | 0,22819 | 0,188245 | -0,22364 | 0,48 | -0,20614 |
| быстр. | -0,37799 | -0,43344 | -0,29748 | -0,14786 | 0,58 | 0,084738 | 0,214624 | -0,06707 | -0,05313 |
| переор. | 0,004722 | -0,15925 | -0,50 | -0,38738 | 0,120767 | 0,165558 | 0,397056 | 0,110511 | -0,09882 |
| сист.мышл | 0,27732 | -0,20809 | 0,398252 | -0,38568 | 0,180734 | 0,398834 | -0,45 | 0,286402 | -0,30633 |
| честность | -0,16528 | 0,192462 | 0,253133 | 0,317657 | 0,22678 | -0,25485 | 0,093204 | -0,57 | -0,03748 |
| чувство достоин | -0,30444 | 0,148266 | 0,390405 | 0,014184 | 0,032939 | -0,11212 | 0,21315 | -0,05424 | 0,014014 |
| выдержка | 0,082689 | 0,119746 | 0,206141 | 0,175807 | -0,29362 | -0,11212 | -0,02664 | 0,043188 | 0,282617 |
| больше чувствую нехватку недостающего качества | -0,03785 | -0,21646 | -0,16345 | 0,178944 | -0,29924 | -0,32296 | -0,07059 | 0,091512 | 0,523457 |
| чувство достойн | 0,163348 | 0,107953 | 0,203683 | 0,332512 | 0,056037 | -0,24866 | -0,44801 | -0,07427 | 0,21349 |
| поддержка | 0,010675 | -0,11813 | 0,45 | 0,177578 | 0,130351 | -0,20632 | -0,14084 | -0,30595 | -0,12897 |



Понятие науки (А.Н.

1. Наука – это сфера человеческой деятельности ((**часть культуры**)), направленная на **выработку и систематизацию новых знаний** о природе, обществе, мышлении и познании окружающего мира.

((**характеризующихся объективностью, воспроизводимостью, доказательностью, точностью**))

2. Наука – это результат такой деятельности – **система полученных научных знаний**

3. Наука – это одна из **форм общественного сознания, социальный институт**; представляет собой систему взаимосвязей между научными организациями и членами научного сообщества, а также включает системы научной информации, норм и ценностей науки и т.п.

Задачи науки:

1. Сбор, описание, анализ, обобщение и объяснение фактов;
2. Выявление законов движения природы, общества, мышления и познания;
3. Систематизация знаний;
4. Объяснение сущности явлений и процессов;
5. Прогнозирование событий, явлений и процессов;
6. Определение направлений и форм практического использования полученных знаний

Классификация наук в Российской Федерации дана перечнем **ВАК**

научных направлений, по которым осуществляется подготовка специалистов

высших научных квалификаций

Понятие методологии (А.Н.

– совокупность методов, применяемых в какой-либо сфере деятельности (науке, политике и т.д.);

– учение о научном методе познания.

Уровни методологии:

1. **Всеобщая методология** – универсальная, включающая в себя философские и общенаучные методы познания.

2. **Частная методология** – общая для группы родственных наук, которую образуют философские, общенаучные и частные методы познания.

3. **Методология научных исследований конкретной науки** включает философские, общенаучные, частные и специальные методы. **У каждой науки своя методология.**

Методика – это совокупность методов, способов и приемов познания.

Методы познания:

1. **Всеобщие** (философские), применяемые во всех науках и на всех этапах познания;

2. **Общенаучные**, применяемые в гуманитарных, естественных и технических науках

3. **Частные** – применяемые в родственных науках;

4. **Специальные** – применяемые в конкретной науке, области научного познания.

Под **техникой исследования** понимают совокупность специальных приемов для использования того или иного метода.

Под **процедурой исследования** понимают определенную последовательность действий, способ организации