

Направление подготовки бакалавров
«Прмышленное и гражданское строительство»

Строительные материалы



Лихачев Владислав Александрович, к.х.н.,
доцент



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Тема 5. Механические характеристики металлов

- 1.1. Контроль за качеством металла.**
- 1.2. Твёрдость металлов.**
- 1.3. Методы определения твёрдости.**
- 1.4. Прочность металлов. Диаграммы растяжения.**
- 1.5. Динамические испытания на ударную вязкость.**
- 1.6. Усталостные испытания.**



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Контроль качества металла

На любом предприятии, работающем с металлом возникает задача контроля качества металла. Обычно на *предприятиях* качество металла контролируется *несколько раз* и *можно выделить три основных вида контроля*:

- Входной;
- Междуперационный;
- Выходной (заключительный).

Во всех видах контроля качество металла может определяться за счет определения его механических характеристик, с помощью физических методов дефектоскопии или с помощью металлографического анализа.

Металлографический анализ – исследование макро- и микроструктуры металла.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Виды контроля металла

- **Контроль по механическим характеристикам** более быстрый, он позволяет определить качественный металл или нет, но не дает представления о том, почему металл плохой.
- **Металлографический анализ** более сложный и трудоемкий, но он позволяет ответить на вопрос, почему металл плохой.
- **Физические методы дефектоскопии** (ультразвуковой, магнитная порошковая дефектоскопия и др.) используются, в основном, для контроля уже созданных конструкций при их выпуске и в процессе эксплуатации.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Контроль качества металла

- Физические методы дефектоскопии контролируют только макродефекты в металле, которые могут появиться на стадиях изготовления или эксплуатации.
- В связи с этим качество металла на производстве прежде всего контролируется по механическим характеристикам, и только если он плохой прибегают к металлографическому анализу.
- Поэтому возникает задача познакомиться с основными механическими характеристиками металлов



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Механические характеристики металлов

• **Твёрдость** металла.

*Характеристика очень легко и быстро определяемая гостулируемыми методами. Характеристика достаточно **интегральная**, т.к. позволяет предсказывать прочность, пластичность и износостойкость металла.*

Прочность** металла. Зависит от условий эксплуатации и определяется целым рядом механических характеристик: **предел текучести, предел прочности, ударная вязкость, трещиностойкость, предел усталости и т.д.

Пластичность.

Это способность металла принимать под действием нагрузки новую форму, не разрушаясь. Описывается относительным удлинением и относительным сужением при разрыве.

Износостойкость.

Износостойкостью называется способность металла оказывать сопротивление изнашиванию. Описывается величиной, обратной скорости изнашивания.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Твёрдость металлов.

Твёрдость – свойство металла оказывать сопротивление пластической деформации при контактном взаимодействии.

*Существует несколько способов определения твердости металлов. Суть всех методов одна: **твёрдый наконечник** вдавливается в испытуемый материал определенной нагрузкой, а **твёрдость** определяется по **площади** или **глубине** отпечатка.*

*Таким образом характеризуя любой метод испытаний необходимо описать **форму, размеры и материал** наконечника, **величину** прикладываемой нагрузки, **способ** определения твердости **по глубине** или **площади** отпечатка, ее **обозначение и размерность**.*



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Твёрдость металлов.

Виды испытания на твёрдость металлов:

- Метод по Бринеллю (НВ);
- Метод по Роквеллу (HR);
- Метод по Виккерсу (HV);
- Испытания на микротвёрдость.



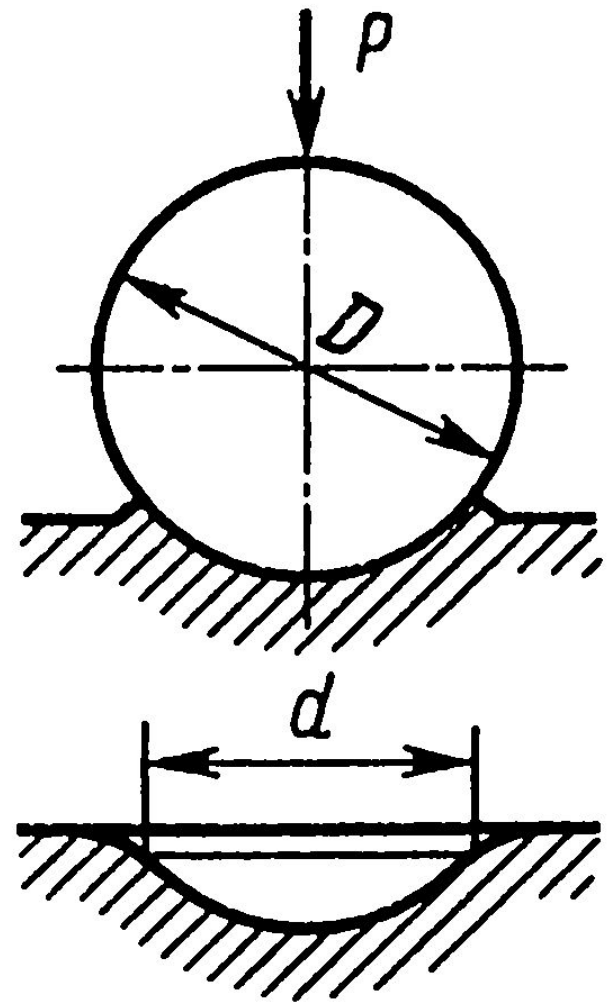
ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Испытания по Бринеллю.

Для оценки твёрдости цветных металлов и незакаленных сталей.

Наконечник – стальной закаленный шарик диаметром 10; 5; 2,5 мм.

*Нагрузка 187,5 – 3000 кгс.
Нагрузка задаётся с помощью прибора ТШ-2 (Бринелль)*



Если F (P) в Н, то

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2F (P)}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$



Определение твердости по Бринеллю

1. Диаметр шарика выбирается исходя из толщины детали.
2. Величина нагрузки исходя из диаметра шарика и предполагаемой твердости материала.
3. **Стандартные испытания** твердости отожженных сталей проводятся шариком 10 мм, при нагрузке $P=3000$ кг, и времени наложения нагрузки 15 сек
4. Диаметр полученного отпечатка определяется с помощью небольшого микроскопа МПБ-2, прикладываемого к прибору Бринелля.
5. Обозначение твердости по Бринеллю:
159 НВ 5/1000/20 твердость по Бринеллю в 159 кгс/мм², испытания шариком 5мм при нагрузке 1000кг, время испытаний 20 сек



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Достоинства и недостатки испытаний по Бринеллю

Достоинства: заводской метод испытания непосредственно на деталях; точность измерения не зависит от посторонних веществ на поверхности (например, масла) и шероховатости.

Недостатки: ограниченность применения (до 420НВ), велик отпечаток (портится деталь), нельзя измерять твердость тонких листовых материалов.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Испытания по Роквеллу

Наконечник – алмазный конус с углом при вершине 120° , или стальной закаленный шарик диаметром 1,58 мм;

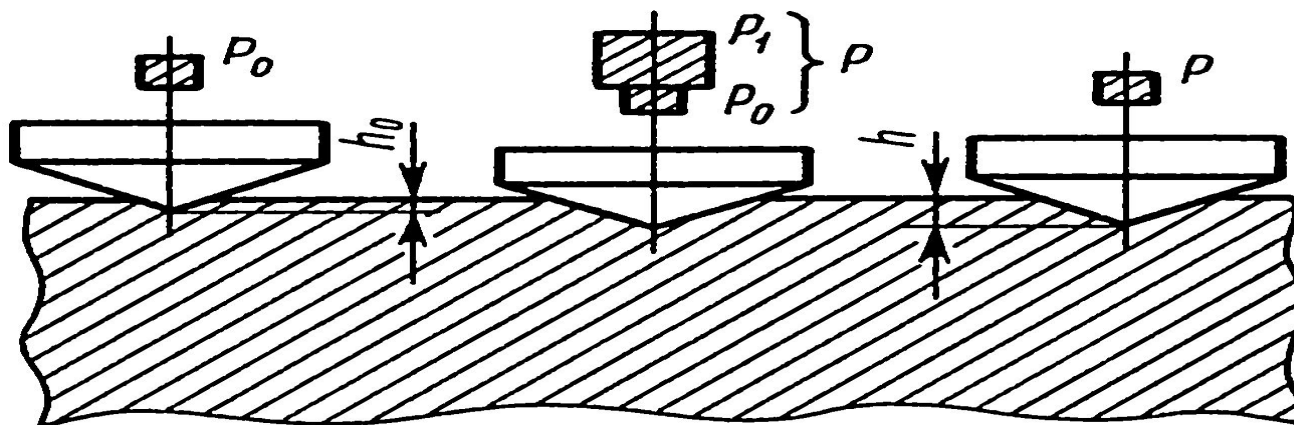
Испытания по трем шкалам:

***HRC** – алмазный конус, нагрузка 150 кгс;*

***HRA** – алмазный конус, нагрузка 60 кгс;*

***HRB** – стальной закаленный шарик, нагрузка 100 кгс;*

Нагрузка задаётся с помощью прибора ТК-2. И накладывается в два приема: вначале предварительная 10 кг, затем окончательная.





ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Испытания по Роквеллу

- Глубина отпечатка контролируется с помощью стрелочного механизма часового типа. Твердость по шкале С определяется по формуле:
- **HRC = 100-L**, где $L = (h-h_0)/0,002\text{мм}$
и выражается в условных единицах (55HRC – закаленная сталь, 32HRC – отожженная сталь)
- **HRC** – наиболее употребляемая шкала используется для всех материалов, наконечник алмазный конус.
- **HRA** - шкала для твердых и хрупких материалов, наконечник алмазный конус;
- **HRB** – шкала для мягких материалов, наконечник стальной закаленный шарик.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Достоинства и недостатки испытаний по Роквеллу

- *Достоинства: самый быстрый и цеховой метод испытаний; не зависит от шероховатости; отпечаток небольшой меньше портится деталь, пригоден для испытаний любых по твердости материалов.*
- *Недостатки: Нельзя проводить испытания тонких материалов, твердость определяется в условных единицах.*



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Испытания по Виккерсу

Наконечник – алмазная пирамидка с квадратным основанием и углом при вершине 136°

Нагрузка **1 – 120 кгс**. Нагрузка задается с помощью рычажного механизма ТП-2.

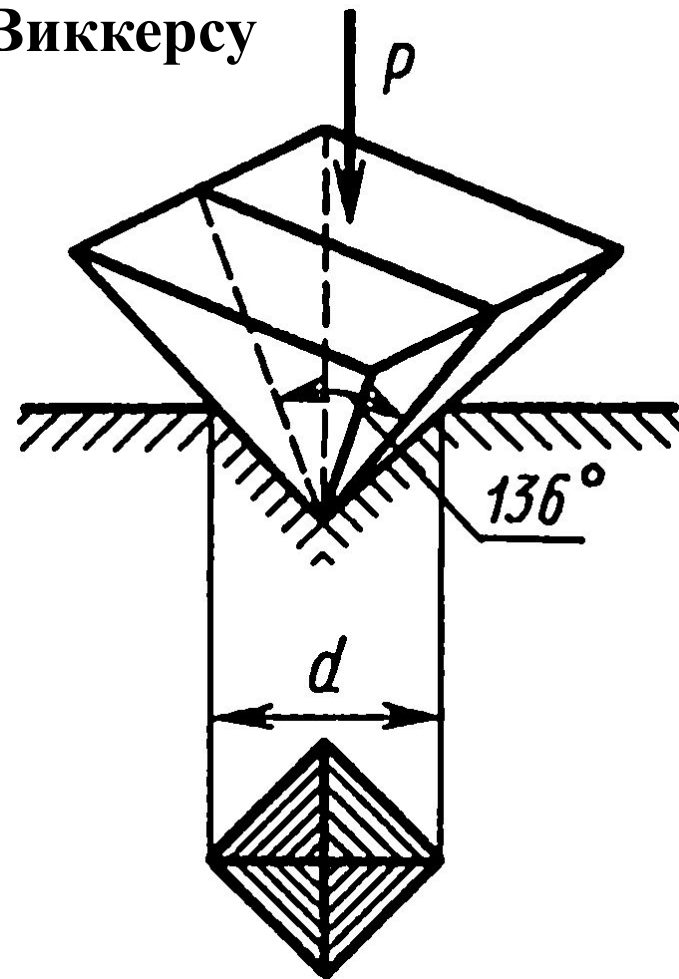
Диаметр диагоналей отпечатка измеряется с помощью встроенного в прибор микроскопа.

Стандартные испытания $P = 30$ кгс,

$\tau = 15$ сек.

$$HV = 1,854P/d^2 \text{ кгс/мм}^2$$

Обозначение: **450 HV10/40**



$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

Н/мм²



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Достоинства и недостатки испытаний по Виккерсу

- **Достоинства метода:**
- используется для оценки любых по твердости материалов;
- может быть использован для оценки твердости листовых материалов.
- **Недостатки:** лабораторный метод, испытания проводятся на образцах с специально подготовленной поверхностью.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Испытания на микротвердость

В основе испытаний на микротвердость лежит метод Виккерса, отличие заключается в величине прикладываемой нагрузки P , которая составляет от 5 г до 200 г, соответственно отпечаток после вдавливания пирамидки получается очень маленький и для определения диагоналей отпечатка используется металлографический микроскоп с увеличением $\times 300$.

Испытания проводятся на приборе **ПМТ-3**
по ГОСТ 9450-73



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Испытания на микротвердость

- Метод может быть использован для определения твердости самых тонких покрытий, толщиной в несколько микрон (гальванических, химических, диффузионных)
- А также для определения твердости отдельных фаз и структурных составляющих сплавов.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Прочность металлов

- Прочность одна из **главных** характеристик металла, которая часто определяется при контроле качества металла.
- У металла, в отличие от других строительных материалов никогда не определяется **прочность на сжатие**.
- Понятие прочности металла очень **широкое** понятие, прочность зависит от условий нагружения металла (статическая нагрузка, ударная, переменная) поэтому прочность характеризуется не одной, а целым рядом механических характеристик.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

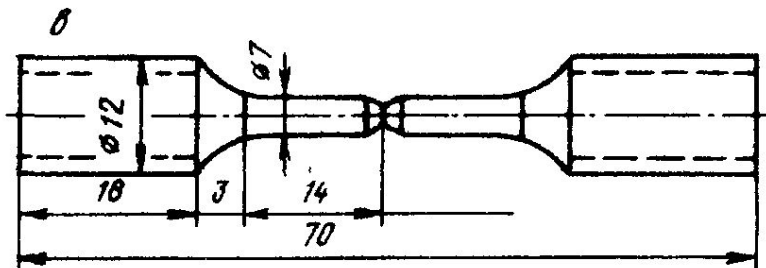
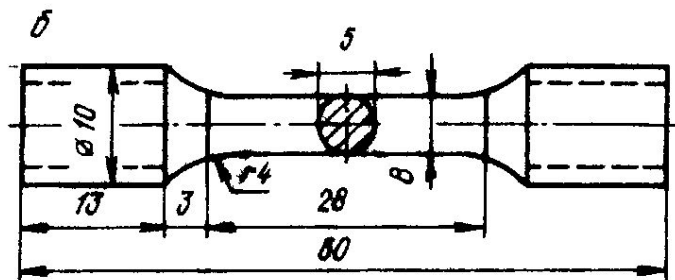
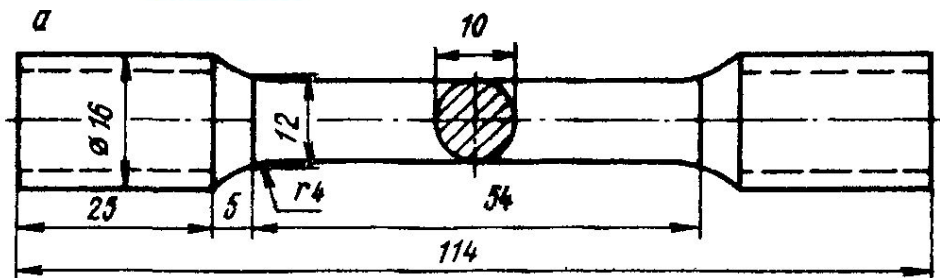
Статическая прочность металла

- Прочность металла в условиях статических или медленно меняющихся нагрузок растяжения, оценивается с помощью следующих механических характеристик:
- σ_T – предела текучести;
- $\sigma_{0,2}$ – условного предела текучести;
- σ_B - предела прочности.
- Размерность этих характеристик кгс/мм², МПа (н/м²)



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Образцы для испытаний на разрыв



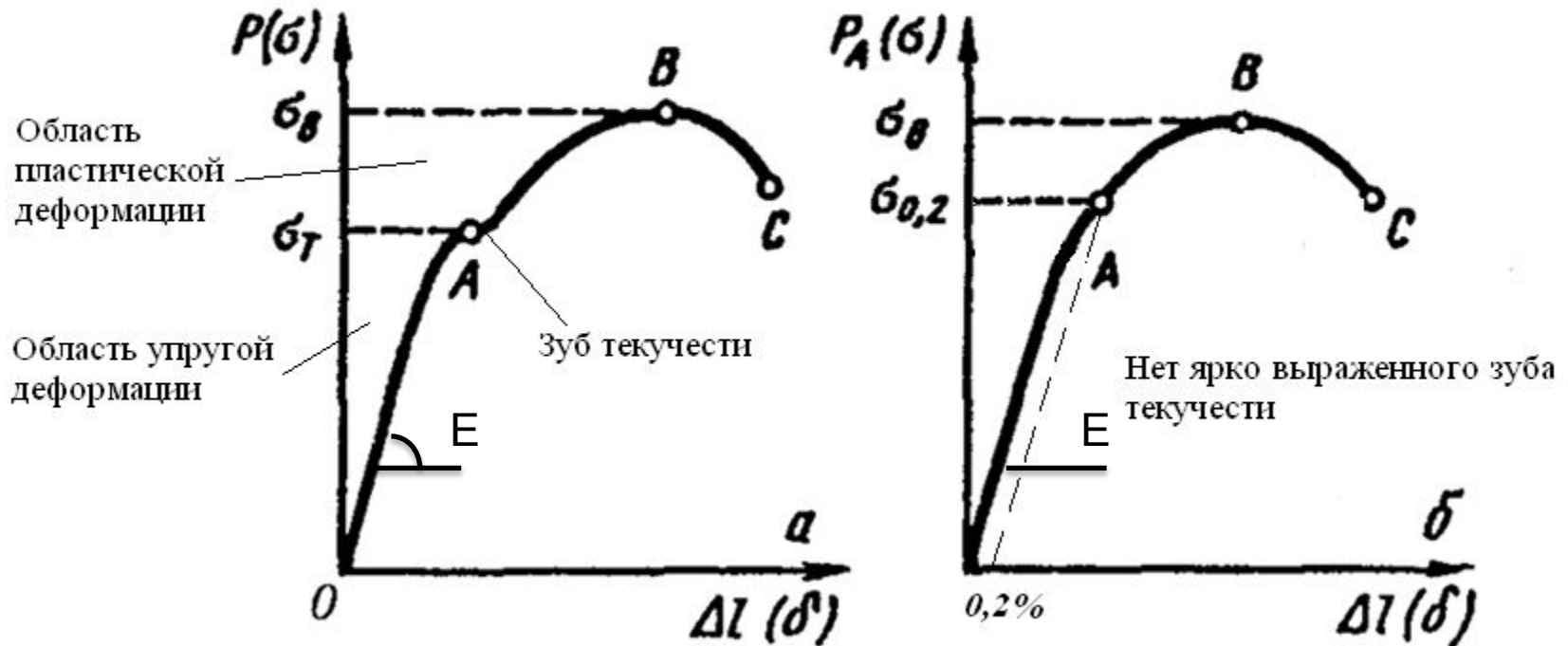
- В испытаниях на статическую прочность используются стандартные образцы круглого или прямоугольного сечения.
- На чертеже приведены примеры таких образцов, различной длины и сечений.
- Образцы закладываются в специальную разрывную машину, которая постепенно увеличивает разрывную нагрузку, фиксирует при этом длину образца и снимает кривую растяжения.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Испытания на прочность при статических нагрузках

- Кривая растяжения позволяет узнать все три основных характеристики статической прочности: σ_T , $\sigma_{0,2}$, σ_B .
- Причем диаграмма(кривая) растяжения может быть двух видов.





ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Испытания на статическую прочность

Кривая первого вида состоит из четырех участков:

- **Упругой деформации** (участок OA). На этом участке металл растягивается упруго, т.е. при снятии нагрузки он возвращается к исходной длине.
- **Участок перехода** от упругой деформации к пластической (зуб текучести).
- **Равномерной пластической деформации** (участок AB), на этом участке при снятии нагрузки в металле остается остаточное удлинение.
- **Сосредоточенной пластической деформации** металла в области образующейся шейки (участок BC).

Т.е. на кривой первого вида упругая деформация от пластической четко разграничиваются зубом текучести.

- Наименьшее напряжение, при котором происходит переход от упругой деформации к пластической (т.е. образец деформируется без заметного увеличения нагрузки), называется **пределом текучести** σ_T . Это и есть первая характеристика статической прочности.

Это главная характеристика, необходимая строителям при расчете металлических конструкций. Размерность кгс/мм², н/мм², МПа.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Условный предел текучести

На кривых второго типа нет четкого перехода от области упругой к области пластической деформации. В этом случае вводят понятие **условного** предела текучести ($\sigma_{0,2}$).

$\sigma_{0,2}$ – *условный предел текучести* – нагрузка, которая оставляет остаточное удлинение 0,2% от первоначальной длины образца.

Для его определения $\sigma_{0,2}$ на кривой растяжения на оси абсцисс откладывают остаточное удлинение равное 0,2% от первоначальной длины образца и проводят линию параллельную области упругой деформации. Пересечение этой линии с кривой растяжения дает значение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Предел прочности

- Кривая растяжения позволяет определить еще одну характеристику статической прочности металла: **предел прочности**, который обозначается σ_B
- Напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению, называется *пределом прочности σ_B или временным сопротивлением разрыву*.
- При этом напряжении металл начинает интенсивно удлиняться в области шейки и через некоторое время рвется.
- Эта характеристика прочности нужна при обработке металла.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Механические характеристики статической прочности

Таким образом:

- Размерность пределов текучести σ_T , $\sigma_{0,2}$ и предела прочности, σ_B одинаковая: кгс/мм², н/мм², или МПа.
- Пределы текучести σ_T , $\sigma_{0,2}$ нужно знать для определения эксплуатационной нагрузки на металл.
- Предел прочности σ_B необходим при определении нагрузок при обработке металла, например, при обработке давлением.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Модуль упругости (E)

- Кривые растяжения позволяют также узнать еще одну механическую характеристику металла: модуль упругости.
- Модуль упругости обозначается буквой **E** и выражается в кгс/мм², МПа;
- На кривой растяжения модуль упругости E определяется по **тангенсу угла** наклона кривой растяжения в области упругой деформации.
- **E** характеризует способность металла к упругой деформации. Второе название модуля упругости - **жесткость** металла. При большом тангенсе угла наклона в области упругой деформации металл жесткий и мало склонен к упругой деформации.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Пластичность металлов

- С помощью кривых растяжения определяются также характеристики **пластичности металлов**
- **Пластичность металла** – это способность его к деформации:
- Пластичность характеризуется: относительным удлинением - δ
- $\delta = \frac{L_{\text{кон}} - L_{\text{нач}}}{L_{\text{нач}}} 100\%$;

где, $L_{\text{нач}}$ – начальная длина образца до испытаний;

$L_{\text{кон}}$ – конечная длина образца при разрыве;

$L_{\text{кон}} = L_{\text{нач}} + \Delta l$ (из кривой растяжения); $\delta = \frac{\Delta l}{L_{\text{нач}}} 100\%$;

- Относительное сужение - Ψ
- $\Psi = \frac{F_{\text{нач}} - F_{\text{кон}}}{F_{\text{нач}}} 100\%$;

где, $F_{\text{нач}}$ - начальное сечение образца;

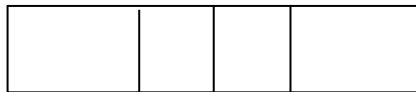
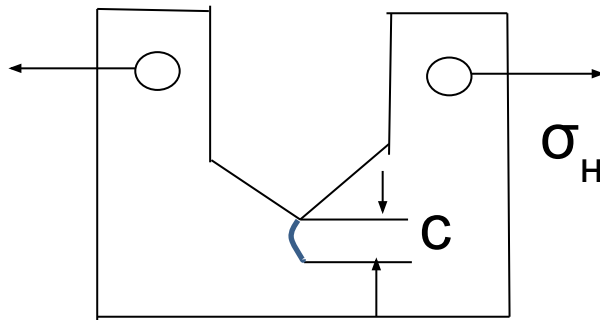
$F_{\text{кон}}$ – сечение образца в области шейки после разрыва



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Трещиностойкость Коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины.

Трещиностойкость характеризует прочность металла при наличии на нем дефекта (трещины)



Испытания проводятся на образцах с трещиной

$$K_{1c} = Y \sigma_n \sqrt{\pi c} \text{ кг/мм}^2 \text{ м}^{1/2}$$

Y – коэффициент, учитывающий форму и размеры образца для испытаний

σ_n – нагрузка, вызывающая, разрыв образца, кг/мм^2

c – длина дефекта (трещины), м.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Прочность металла в условиях динамической (ударной) нагрузки

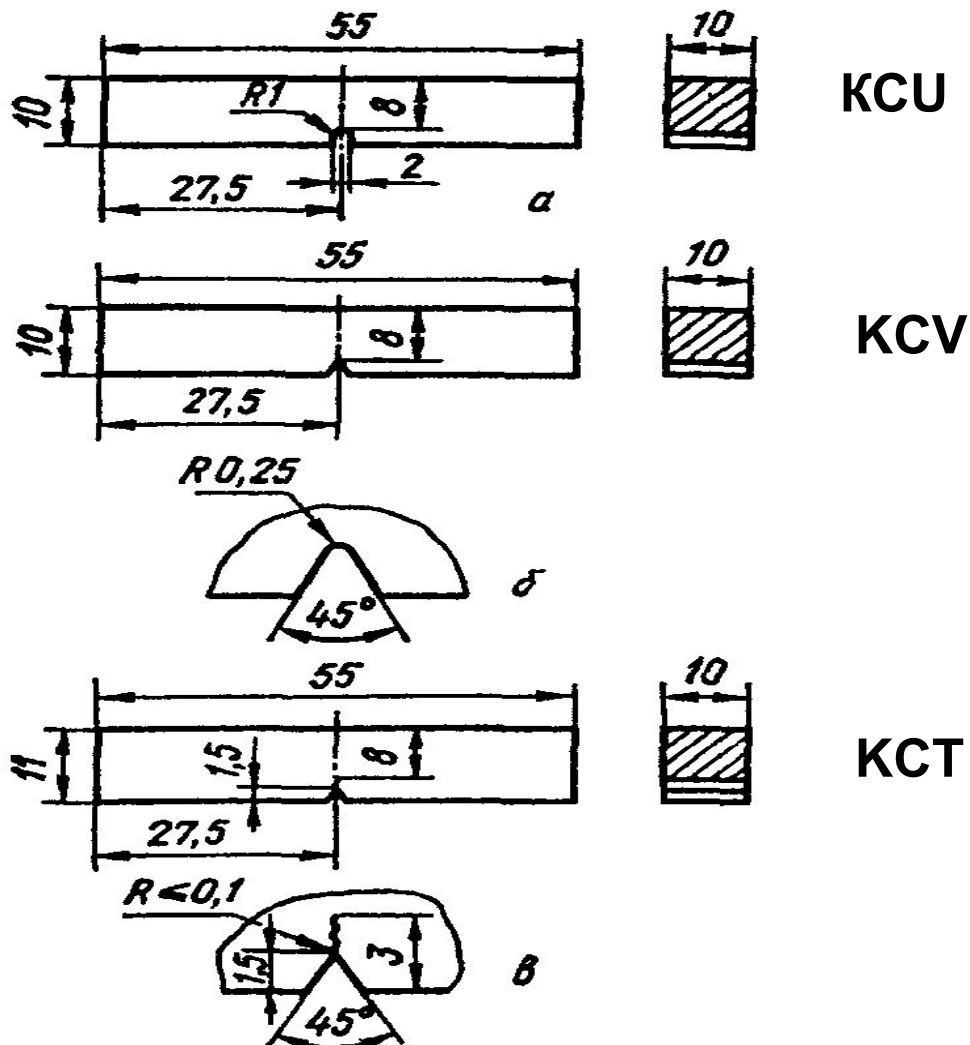
- Прочность металлов в условиях динамических нагрузок характеризуется ударной вязкостью, которая определяется работой (Дж/м^2), затраченной на разрушение образца при ударе.
- Ударная вязкость обозначается тремя буквами **КСU**, **КСV**, **КСТ**, где КС – обозначение ударной вязкости, U, V, T указывают на вид образца использованного при испытаниях.
- При низкой ударной вязкости часто говорят, что материал очень хрупкий.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Образцы для испытаний на ударную вязкость имеют одинаковые размеры и отличаются только видом концентратора напряжений, по которому образцы ломаются.

Виды образцов при испытаниях на ударную вязкость





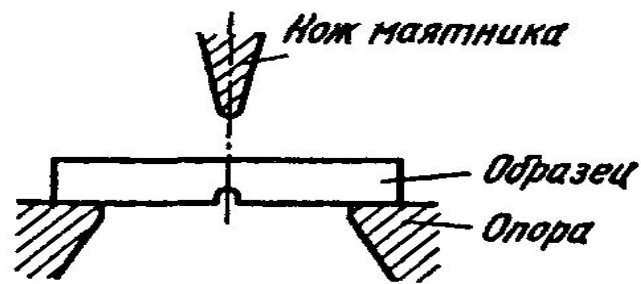
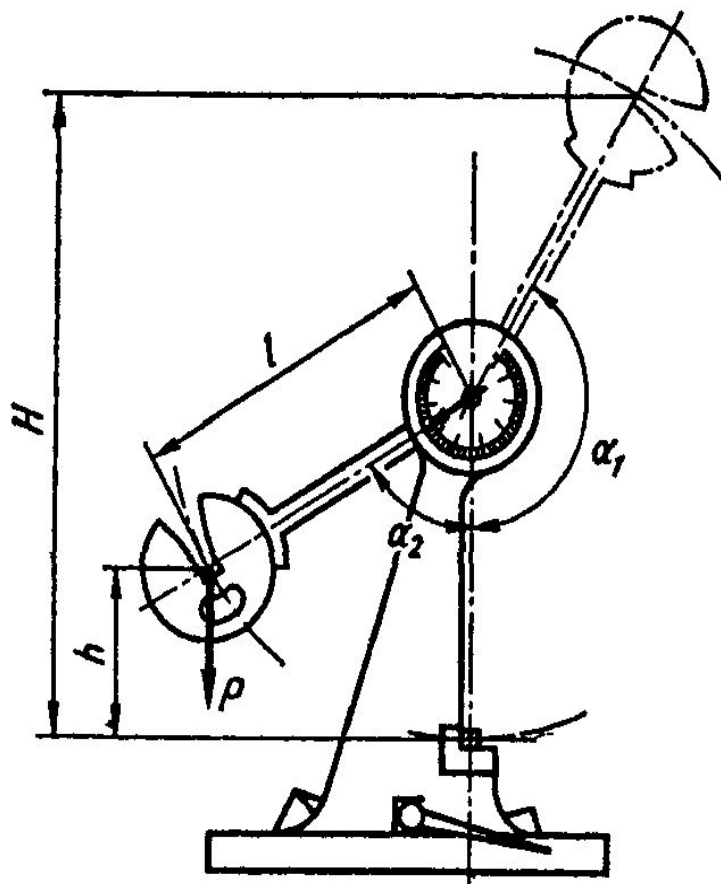
ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Динамические испытания на ударную вязкость

Метод основан на разрушении образца с надрезом одним ударом маятничкового копра.

Испытания проводятся по ГОСТ 9454-78

На маятничковом копре.





ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Прочность металла при динамических (переменных) нагрузках.

- Помимо статических и ударных нагрузок металл часто работает под воздействием динамических (переменных) нагрузок. Во всех движущихся частях любых механизма металл подвергается динамической нагрузке.
- Переменные нагрузки характеризуются амплитудой нагрузки и циклом нагрузки, и различаются на знакопеременные и знакопостоянные, и симметричные и асимметричные.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

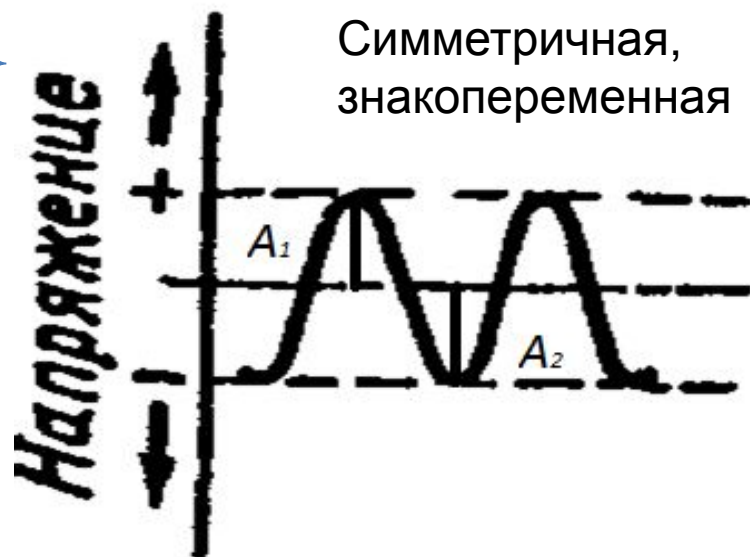
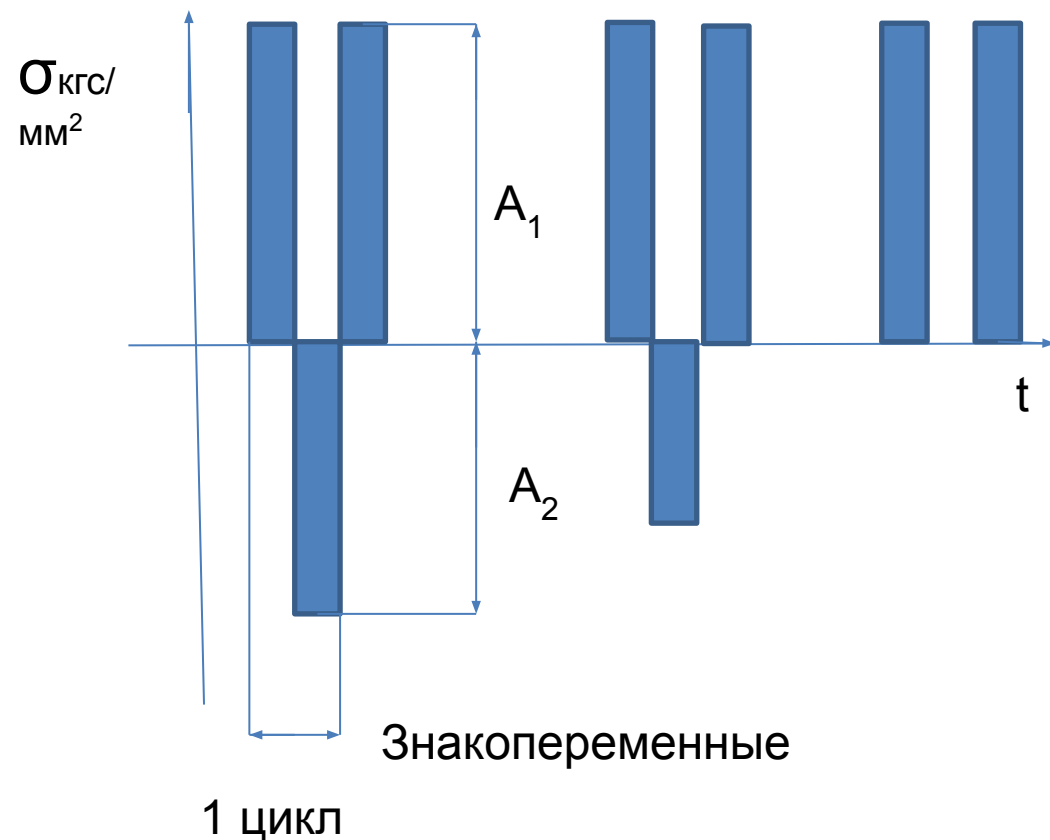
Виды переменных нагрузок

Симметричная
нагрузка $A_1 = A_2$

Ассиметричные
нагрузки $A_1 \neq A_2$

Знакопостоянная

Симметричная,
знакопеременная





ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Усталость и выносливость металла

- Поведение металла при наложении переменных динамических нагрузок описывается с помощью терминов: **усталость** металла, **выносливость** металла.
- *Усталость - процесс постепенного накопления повреждений в металле под действием переменных напряжений, приводящих к образованию и развитию усталостных трещин.*
- **Выносливость** – способность металла сопротивляться переменным нагрузкам.
- Т.е. усталость и выносливость понятия противоположные.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Прочность металла при наложении переменных нагрузок

- Оценивается с помощью **предела усталости** или **предела выносливости**:
- σ_R - при асимметричной нагрузке;
- σ_{-1} - при симметричной нагрузке;

Предел выносливости(усталости) определяется из кривой усталости металла, для снятия которой необходимо иметь не менее 10 образцов.



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Усталостные испытания.

Кривая усталости снимается следующим образом:

На 1-ый образец накладывается переменная нагрузка с высокой амплитудой, близкой к пределу прочности металла и определяется количество циклов переменной нагрузки, которое выдержит образец до разрыва.

На 2-ом образце амплитуда нагрузки снижается и образец, соответственно, выдержит большее количество циклов и т.д.

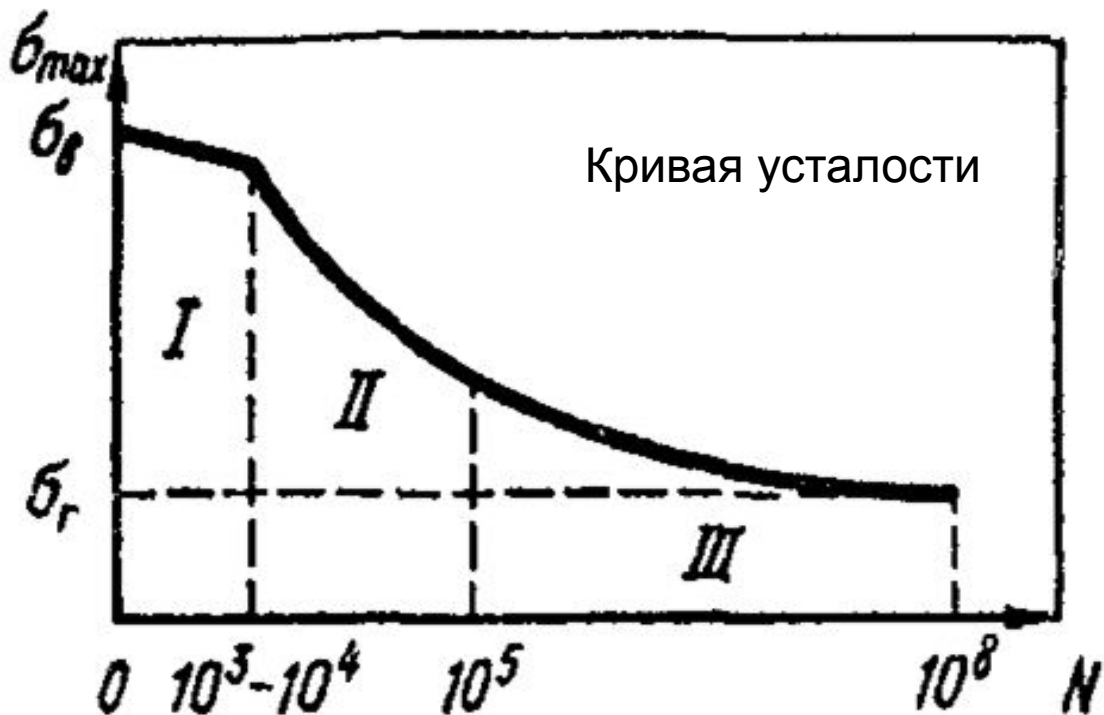
При испытании не менее 10 образцов получается кривая усталости, которая часто выходит на предел.

Вид такой кривой изображен на следующем слайде



ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кривая усталости



σ_B – предел прочности металла.
 σ_R (σ_r) – предел выносливости при асимметричной нагрузке

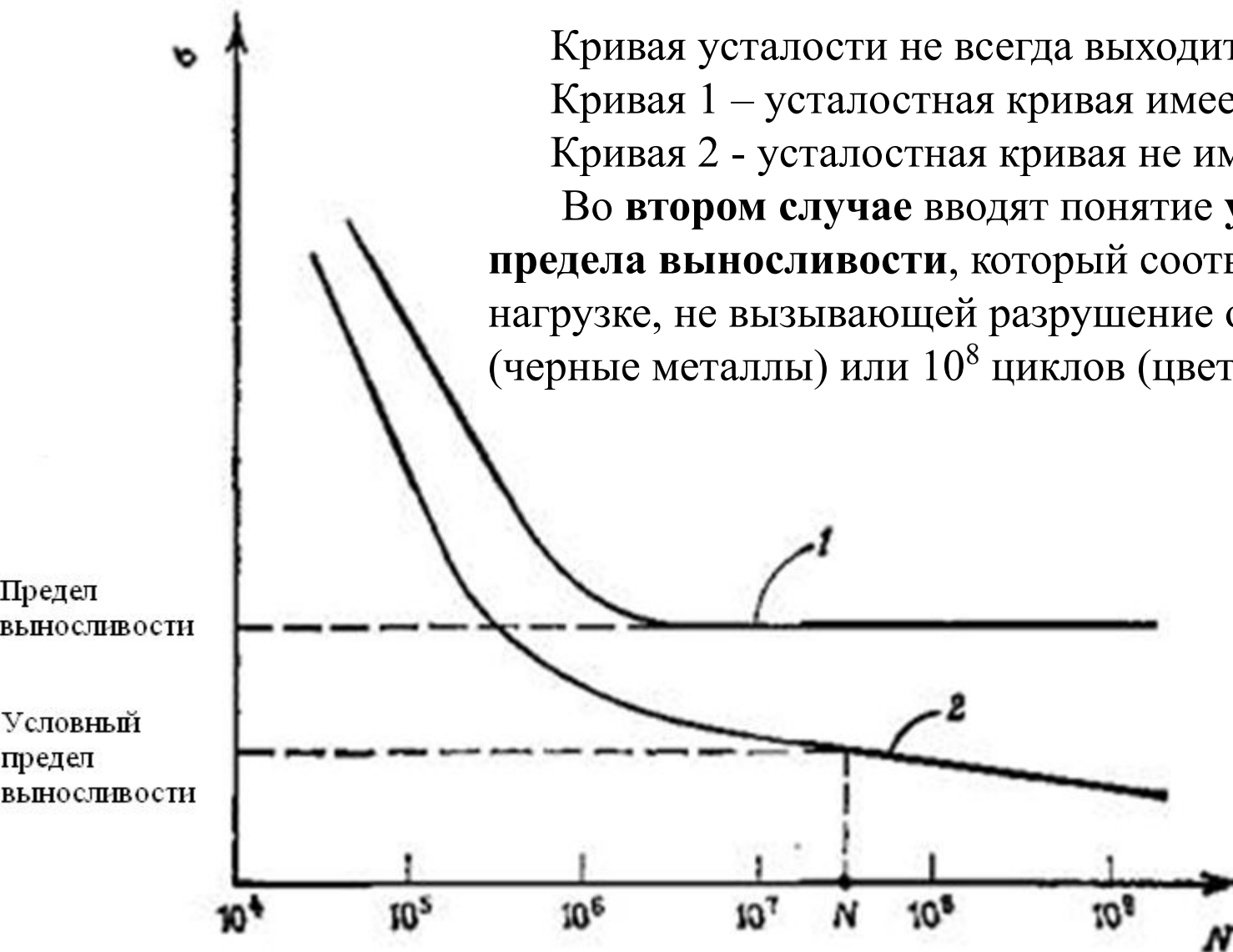
Амплитуда нагрузки при которой металл не разрывается при любом количестве циклов называется пределом выносливости (усталости) и обозначается σ_R при симметричной нагрузке и σ_r при асимметричной нагрузке.



Кривые усталости

Кривая усталости не всегда выходит на предел:
Кривая 1 – усталостная кривая имеет предел.
Кривая 2 – усталостная кривая не имеет предела.

Во втором случае вводят понятие **условного предела выносливости**, который соответствует нагрузке, не вызывающей разрушение образца до 10^7 (черные металлы) или 10^8 циклов (цветные металлы).





ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Износостойкость

- Важное свойство для всех материалов, особенно изоляционных;
- Теплопроводность - свойство материала передавать тепло через свою толщину от одной поверхности к другой;

$$\lambda = \frac{Q a}{\tau S \Delta t}, \text{ Вт/м}\cdot\text{°С},$$

где, Q - количества тепла, Дж;

- a - толщина слоя, м;
- τ - время, с;
- S - площадь, м²;
- Δt - разность температур, °С