

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана



Д.т.н., профессор кафедры «Материаловедение»
Курганова Юлия Анатольевна

Курс

Материаловедение часть 2

Машиностроительны е материалы

экзамен

Бально-рейтинговая система

- 1 модуль до 25 баллов
- 2 модуль до 25 баллов
- 3 модуль до 20 баллов

- 4 модуль Экзамен до 30 баллов

Список литературы по машиностроительным материалам

- **Справочник по конструкционным материалам / Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В., Герасимов С.А. [и др.]; ред. Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. - 636 с.**
- **Журавлев В. Н., Николаева О. И. Машиностроительные стали: справочник / Журавлев В. Н., Николаева О. И. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1992. - 480 с.**
- **Машиностроительные материалы: краткий справочник / Раскатов В.М., Чуенков В.С., Бессонова Н.Ф., Вейс Д.А.; ред. Раскатова В.М. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1980. - 511 с.**
- Марочник сталей и сплавов. Под общ. ред. В.Г. Сорокина
- Марочник сталей и сплавов: http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov
- **Конструкционные материалы : справочник / Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н. А. и др.; под общ. ред. Арзамасов Б.Н. - М.: Машиностроение, 1990. - 687 с.**
- **Велищанский А.В. Выбор материала и термическая обработка деталей машин./ М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1988.**
- **Ульянин Е.А. Коррозионностойкие стали и сплавы: справочник / Ульянин Е.А. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1991. - 255 с.**
- **Масленков С.Б., Масленкова Е.А. Стали и сплавы для высоких температур: справочник: в 2 кн. / Масленков С.Б., Масленкова Е.А. - М.: Металлургия, 1991. Кн. 2. - 1991. - 387-830 с.**
- **Кишкин С.Т., Строганов Г.Б., Логунов А.В. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе. - М.: Машиностроение, 1987. - 116 с.**

- Промышленные алюминиевые сплавы: справочник / Альтман М.Б., Амбарцумян С.М., Ананьин С.Н. и др.; отв. ред. Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1984. - 526 с.
- Пастухова Ж.П., Рахштадт А.Г. Пружинные сплавы цветных металлов / Пастухова Ж.П., Рахштадт А.Г. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1983. - 362 с.
- Масленков С.Б. Жаропрочные стали и сплавы. Справочник / Масленков С.Б. - М.: Металлургия, - 1983. - 192 с.
- Геллер Ю.А. Инструментальные стали / Геллер Ю.А. - Издание пятое, переработанное и дополненное. – М.: Металлургия, 1983. - 525 с.
- Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы / Рахштадт А.Г. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1982. - 399 с.
- Позняк Л.А., Скрынченко Ю.М., Тишаев С.И. Штамповые стали / Позняк Л.А., Скрынченко Ю.М., Тишаев С.И. - М.: Металлургия, 1980. - 243 с
- Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы: М.: Металлургия, 1979. - 208 с.
- Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Мондольфо Л. Ф.; Пер. с англ. под ред. Ф.И. Квасова, Г.Б. Строганова, И.Н. Фридляндера. - М.: Металлургия, 1979. - 639 с.
- Магниеые сплавы. Ч. 1. Справочник. Металловедение магния и его сплавов. Области применения. - М.: Металлургия, 1978. - 231 с.

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ



НАЧАЛО

РЕДКОЛЛЕГИЯ

АВТОРАМ

ПОДП

ISSN 0026-0819

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал

Основан в июле 1955 г.

12 выпусков в год, 1/8 (60×90)

В журнале освещаются новейшие достижения в области металловедения, термической обработки металлов, порошковых, жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и сплавов, сплавов, уделяется наноматериалам и нанотехнологиям в области металловедения и термообработки.

Публикуются также обзорные статьи отечественных и зарубежных ученых по ключевым направлениям кафедр ведущих вузов страны, научными коллективами машиностроительных и металлургических вузов.

В журнале отводится большое место обмену опытом: выпускаются специальные номера посвященные обмену опытом на передовых предприятиях страны.

Дается подробная информация о конференциях, симпозиумах, семинарах, выставках, проводимых в области металловедения и термической обработки, а также информация о жизни и деятельности выдающихся ученых в области металловедения и термической обработки металлов.

Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения»



Уважаемые коллеги!

Вашему вниманию предлагается общероссийский научно-технический журнал «Вопросы материаловедения», освещающий актуальные проблемы материаловедения.

- Периодичность издания: 4 раза в год.
- ISSN 1994-6716
- Подписной индекс по каталогу Агентства "Роспечать" 29988

Материаловедение

Реферативный журнал — периодическое издание, в котором публикуются аннотации опубликованных научных работ в определённой научной области.

Периодическая печать

- «Материаловедение»
- «Материаловедение и термическая обработка материалов»
- "Технология металлов"
- «Заготовительные производства в машиностроении»
- "Ремонт. Восстановление. Модернизация»
- "Конструкции из композиционных материалов"

- **Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU** - это крупнейший российский информационно-аналитический..., содержащий рефераты и полные тексты более 19 млн научных статей и публикаций, в том числе электронные версии более 3900 российских научно-технических журналов, из которых более 2800 журналов в открытом доступе.
- **Ebsco Discovery Services (EDS)** – это возможность поиска по всему массиву информационных ресурсов университета. На сайте <http://library.bmstu.ru>, можно сделать заказ на получение книги в отделах библиотеки, открыть полнотекстовый документ, если это издание имеется в электронном виде в библиотеке или

Определяющая роль материалов в цивилизации



- Современная техника предъявляет новые требования к материалам.
- Одной из проблем, возникающих при создании таких конструкций, является Их квадратно-кубическая зависимость: прочность и жесткость повышается пропорционально квадрату линейных размеров, в то время как масса повышается пропорционально кубу линейных размеров.
- В связи с этим, для того чтобы сделать эти конструкции достаточно мобильными и эффективными, необходимо оптимальное конструирование, требующее нового, **лучшего**





Конструкционные материалы

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ

КОМПОЗИЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ

ЕЧОВ, А.А. БЕРЛИН, А.А. КУЛЬКОВ, В.Г. С
**ПОЛИМЕРНЫЕ
КОМПОЗИЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**
ПРОЧНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИ

ISSN 2073-2502
КОНСТРУКЦИИ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ **3**



УЖОНТ
М. Ю. Тимофеева, М. Ю. Доломатов
**Композиционные
материалы и их
применение в
промышленности**
Учебное пособие

Масштабы производства в мире в

год:

• Сталь – 800 млн. тонн

• Алюминий – 25 млн.
тонн

• Медь – 2 млн. тонн

• Титан – 1 млн. тонн

• Магний – 0,5 млн. тонн

Экспорт металлургической продукции из
России, \$млрд



Применение в машиностроении тех или иных материалов определяется:




- доступностью исходного сырья;
- трудоемкостью получения полуфабрикатов и изделий;
- многообразием возможностей изменения свойств.







Железорудный концентрат, экспорт


Масштаб 1 : 3 500 000

Добыча:




-  Железных руд
-  Медных руд
-  Флюсовых известняков

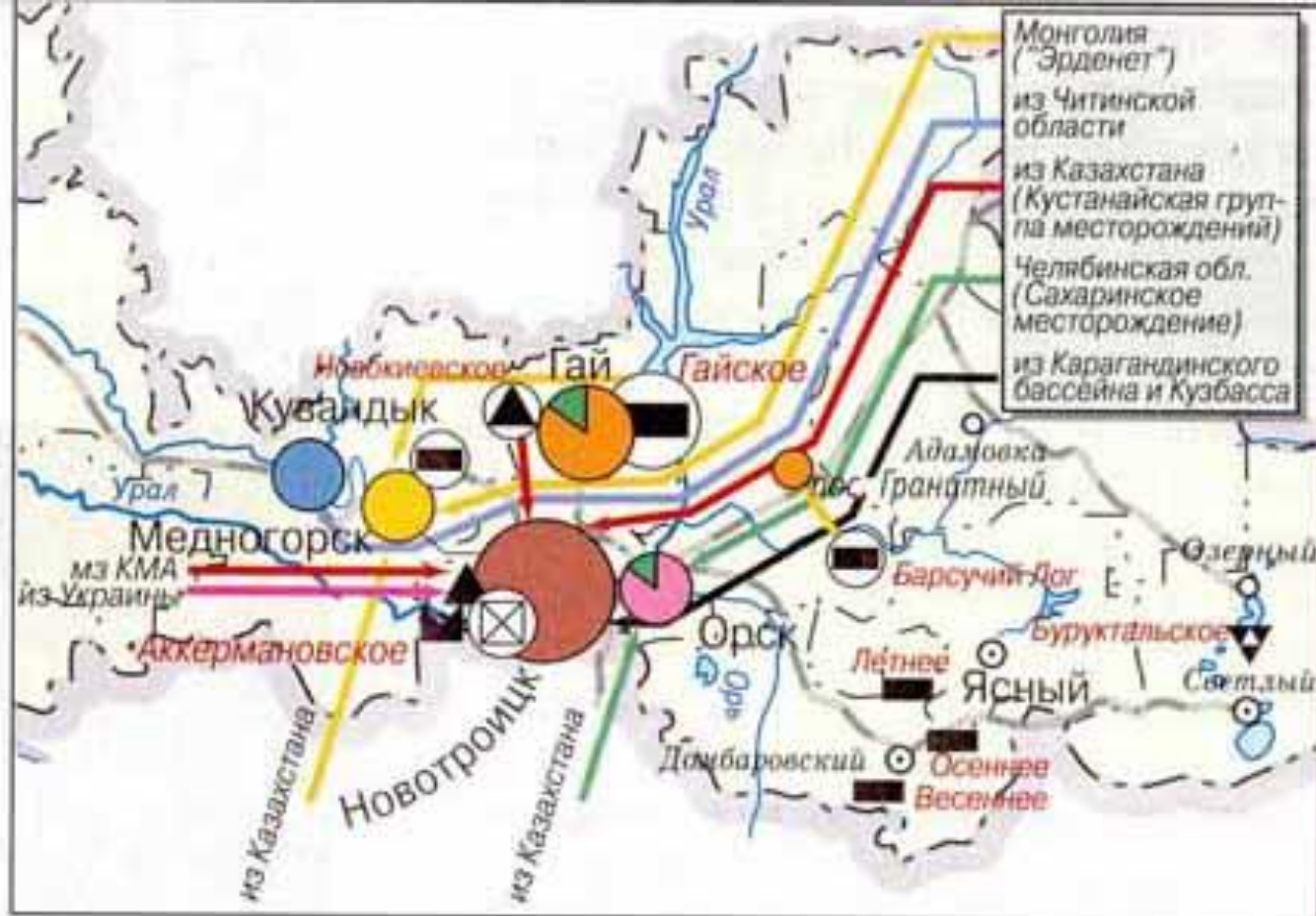
Перспективная сырьевая база

-  Марганцевые руды
-  Никелево-кобальтовые руды
-  Железные руды
-  Медные руды

-  Производство чугуна, стали, проката (черных металлов)
-  Производство медных концентратов
-  Производство черновой и рафинированной меди
-  Производство никеля и кобальта
-  Обработка цветных металлов
-  Производство криолита

Основные направления перевозок

-  Каменного угля
-  Железной руды
-  Марганцевой руды
-  Медных концентратов
-  Флюоритовых концентратов
-  Никелевых концентратов



Конструкционные материалы применяются для изготовления деталей машин, приборов, инженерных конструкций, подвергающихся механическим нагрузкам.

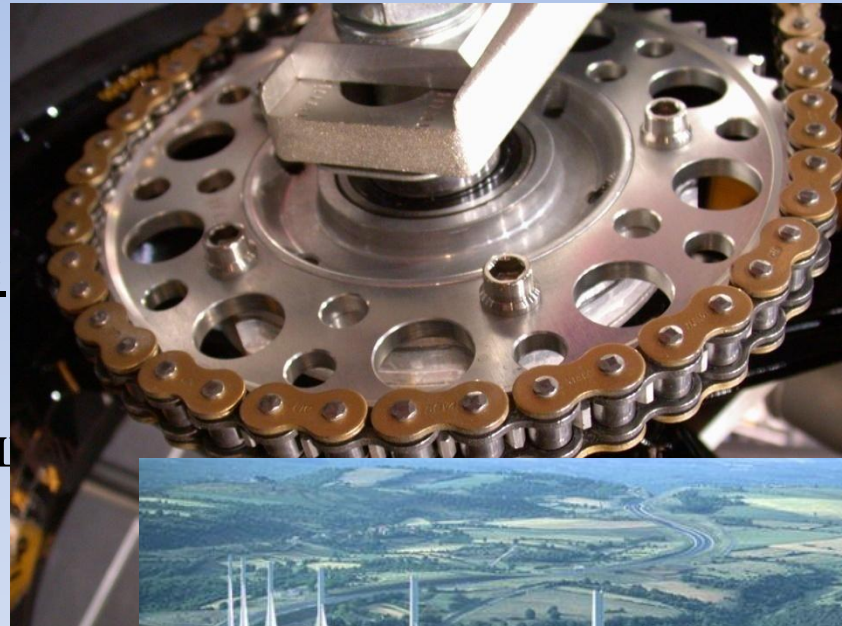
Конструкционные материалы:

- **Машиностроительные**
(для изготовления деталей маш

- **Строительные**

(для сооружений)

Детали машин характеризуются значительным разнообразием форм, размеров, условий эксплуатации.



Станкостроение

Судостроение

Химическое

Автомобилестроение

Авиастроение

Электротехническое

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Приборостроение

Энергетическое

Электронное

Тракторостроение

Металлургическое

Сельскохозяйственное



категория, выражающая характеристику материала, которая обуславливает его различие или общность с другими материалами и обнаруживается в его отношении к ним

Свойства

Структура

совокупность связей между частями объекта

Состав



Подбор заменителей

- <http://www.manual-steel.ru/>
- Марочник сталей и сплавов

- <http://metallicheckiy-portal.ru/>
*Центральный металлический портал
РФ*

- <http://poliformdetal.com/stal>
- Производство и машиностроение

Во многих случаях задача состоит в том, чтобы выбрать подходящий материал из многих тысяч, имеющихся. Существует несколько критериев, на основании которых следует сделать окончательный выбор. Прежде всего, необходимо четко охарактеризовать условия применения изделия, поскольку именно они определяют необходимые свойства материала. Лишь в очень редких случаях существует материал, который в максимальной степени или идеально отвечает предъявляемым требованиям. **Поэтому приходится пренебрегать одними характеристиками материала по сравнению с другими более важными.**

Классический пример — это требования по прочности и пластичности. Обычно материал, обладающий очень высокой прочностью, оказывается недостаточно пластичным. Во всех таких случаях необходимо прийти к разумному компромиссу между двумя или большим количеством

- Далее, необходимо основывать выбор на том, насколько могут снижаться свойства материала в процессе эксплуатации изделия. Например, весьма заметное снижение прочности может быть результатом действия повышенных температур или коррозии в окружающей среде. И, наконец, решающий аргумент может быть связан с **экономическими соображениями**. Какова будет стоимость конечного изделия? Можно найти материал, который идеально подходил бы по своим свойствам всем предъявляемым требованиям, но был бы чрезмерно дорог. Следует учесть, что в стоимость конечного продукта входят не только стоимость материала, но и затраты в процессе формования готового изделия.

Выбор материала

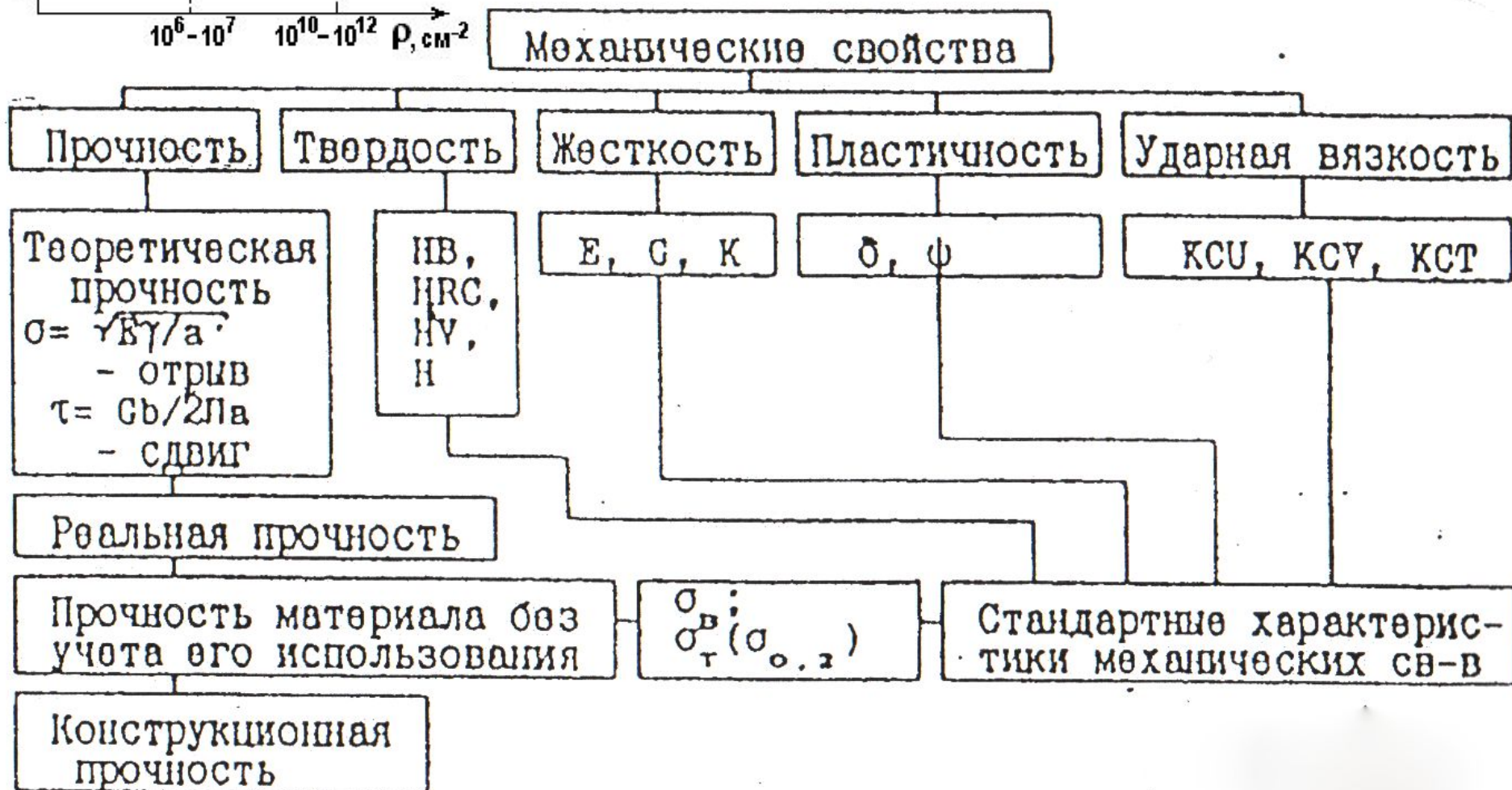
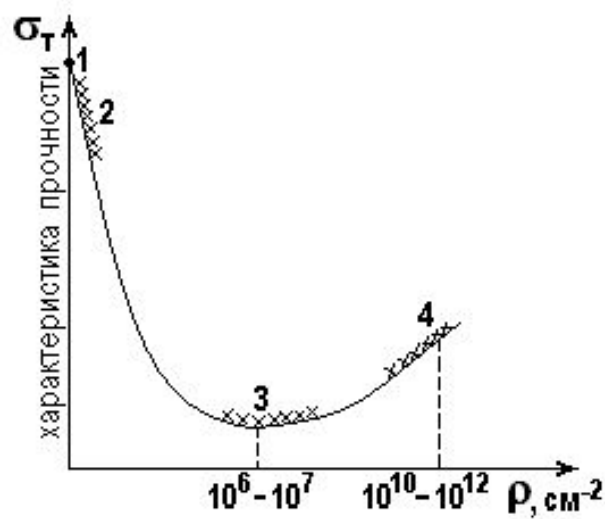
- При выборе материала требуется всестороннее **рассмотрение условий** его работы и **ранжирование факторов**, воздействующих на материал по степени их влияния на эксплуатационную надежность.
- Следующий этап выбора материала - **процесс определения комплекса необходимых свойств**, обеспечивающих долговечную работу конструкции в заданных условиях эксплуатации

Классификация свойств материала

Свойство – признак, определяющий количественные и качественные особенности

- **Физические** характеризуют поведение материала в магнитных, электрических, тепловых полях, а также под воздействием потоков частиц высокой энергии или радиации.
(электропроводность, теплопроводность, коэффициент термического расширения);
- **Химические** характеризуют поведение под воздействием агрессивных сред.
(коррозионная стойкость, окислительная стойкость, каталитические свойства);
- **Механические** характеризуют способность материала сопротивляться деформации и разрушению или оценивают возможность разрушения.
(прочность);
- **Технологические** определяют пригодность материала для изготовления деталей требуемого качества с минимальными трудозатратами.
(обрабатываемость, свариваемость);
- **Эксплуатационные** характеризуют способность материала выполнять функциональное назначение, обеспечивать работоспособность и силовые, скоростные и другие технико-эксплуатационные параметры (износостойкость).

Классификация механических свойств



- Механические свойства характеризуют способность материала сопротивляться **деформации и разрушению**



Механические свойства

Прочность

Твердость

Жесткость

Пластичность

Ударная вязкость

Теоретическая прочность

$$\sigma = \sqrt{E\gamma/a}$$

- отрыв

$$\tau = Gb/2La$$

- сдвиг

НВ,
HRC,
HV,
H

E, G, K

δ , ψ

KCU, KCV, KCT

Реальная прочность

Прочность материала без учета его использования

Конструкционная прочность

$$\sigma_B; \sigma_T (\sigma_{0.2})$$

Стандартные характеристики механических св-в

Критерий жесткости характеризует сопротивление материала упругой деформации, является определенным для длинномерных деталей: валы, штоки, ходовые винты.

Значительная упругая деформация в таких изделиях приводит к потере формы и нарушению нормальной работы. Определяется по модулю нормальной упругости, а при наличии действительных касательных напряжений по модулю сдвига.

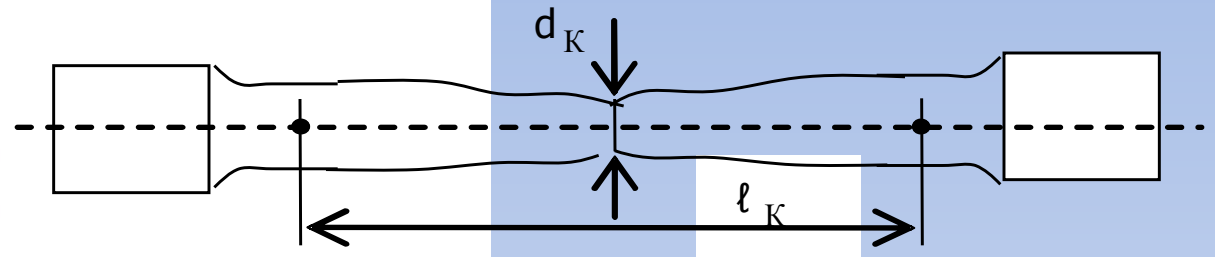
Примерами низко модульных материалов могут выступать:

Mg – $0,45 \times 10^{-5}$ МПа; Al – 0,71 МПа; Ti – 1,12 МПа;
Cu – 1,15 МПа

К металлам с модулем упругости выше Fe относятся:

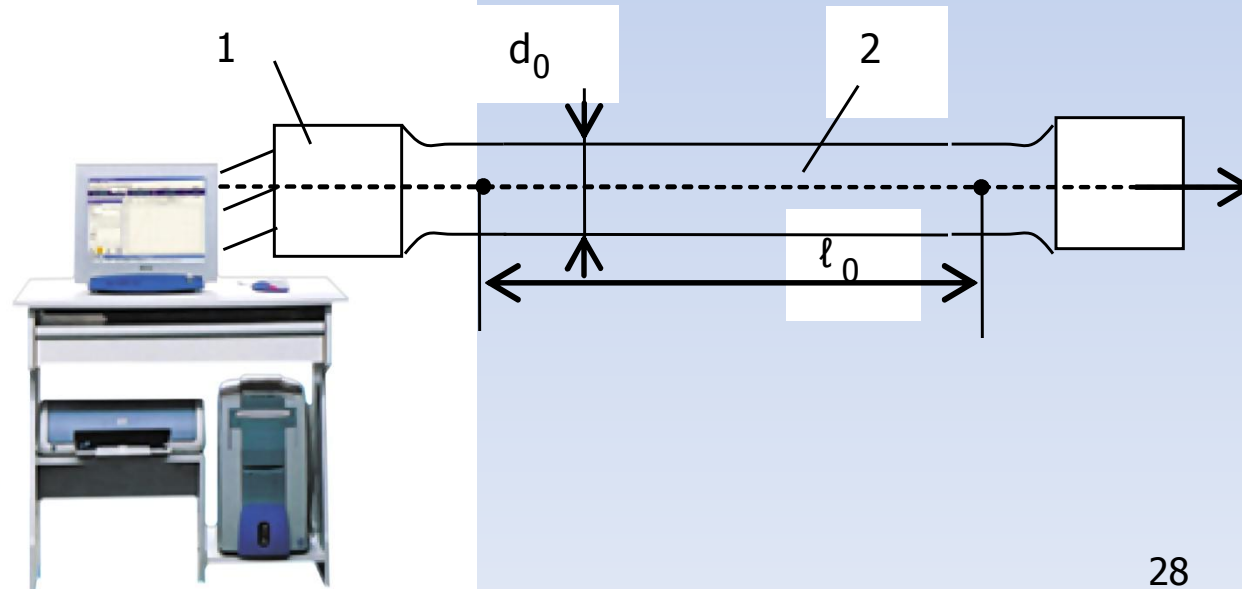
W – 4,1 МПа; Керамика Al_2O_3 – 4×10^5 МПа; Алмаз – 9,6 МПа.

Прочность – способность материала сопротивляться деформациям и разрушению.



после испытаний

до испытаний



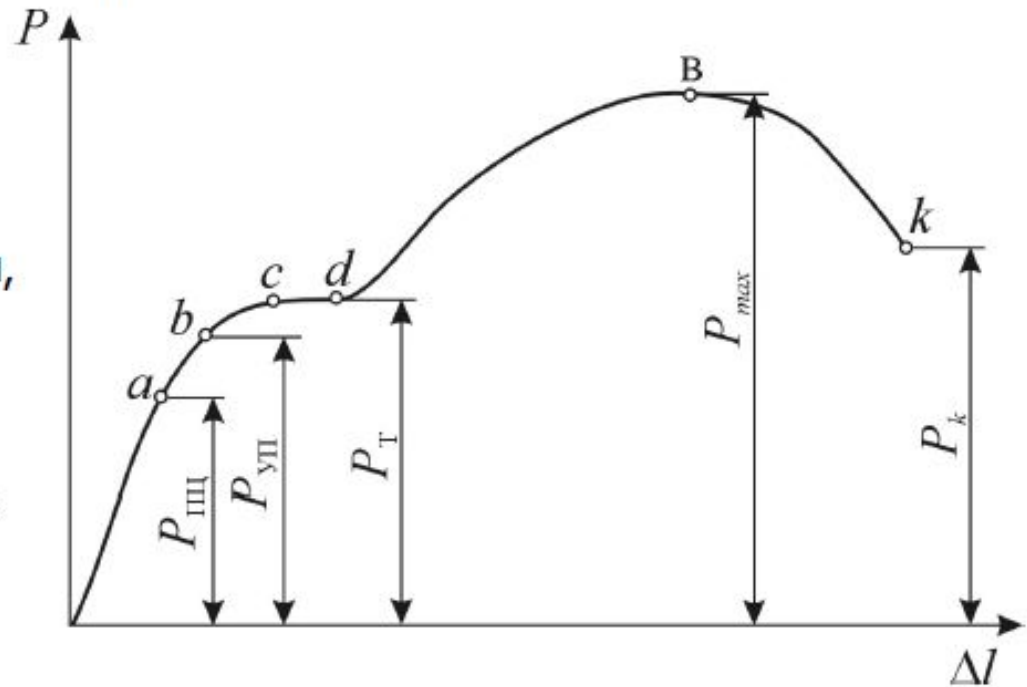
Предварительные замеры образца и вычисления

- d_0 – начальный диаметр рабочей части образца, мм
- l_0 – начальная расчетная длина образца, мм
- $F_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$ - начальная площадь сечения рабочей части образца, мм²

Определение основных механических свойств по диаграмме растяжения

Напряжение $\sigma = P/F_0$, где P – нагрузка, Н; F_0 – начальная площадь поперечного сечения, м².

Деформация $\epsilon = \Delta l / l_0$, где Δl – удлинение образца, l_0 – базовая длина образца.



Предел пропорциональности ($\sigma_{пц}$) – максимальное напряжение, до которого сохраняется линейная зависимость между деформацией и напряжением.

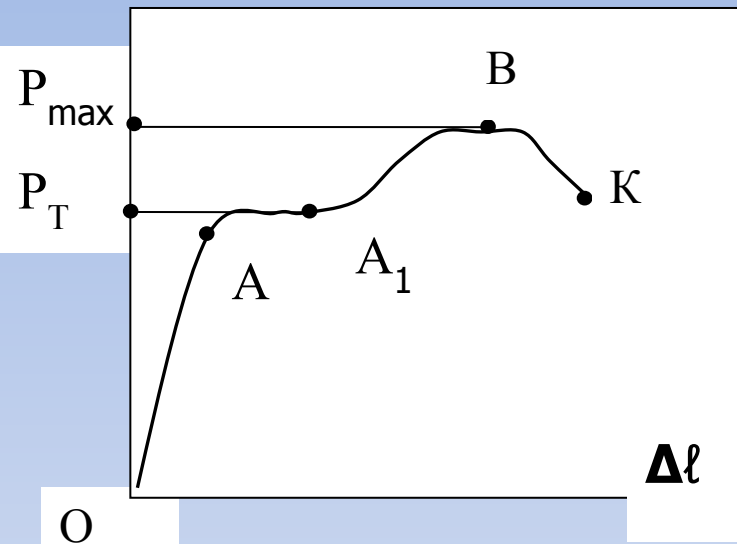
$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0}$$

Линейная зависимость между деформацией и напряжением называется законом Гука: $\sigma = \epsilon \cdot E$, где E – модуль упругости (модуль Юнга).

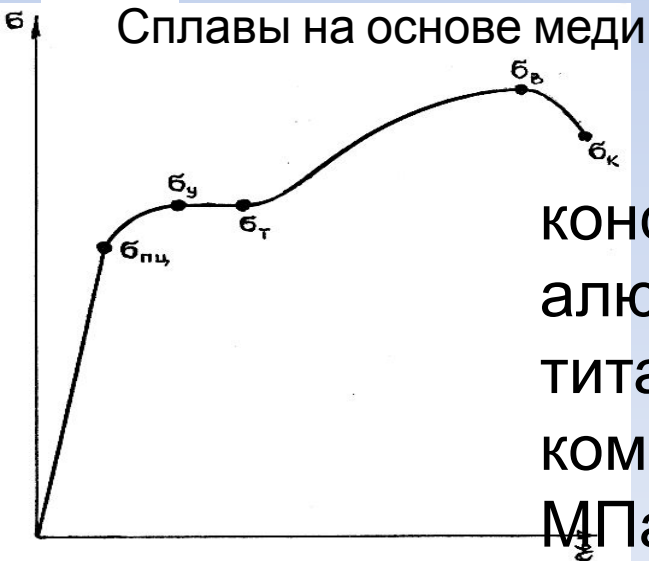
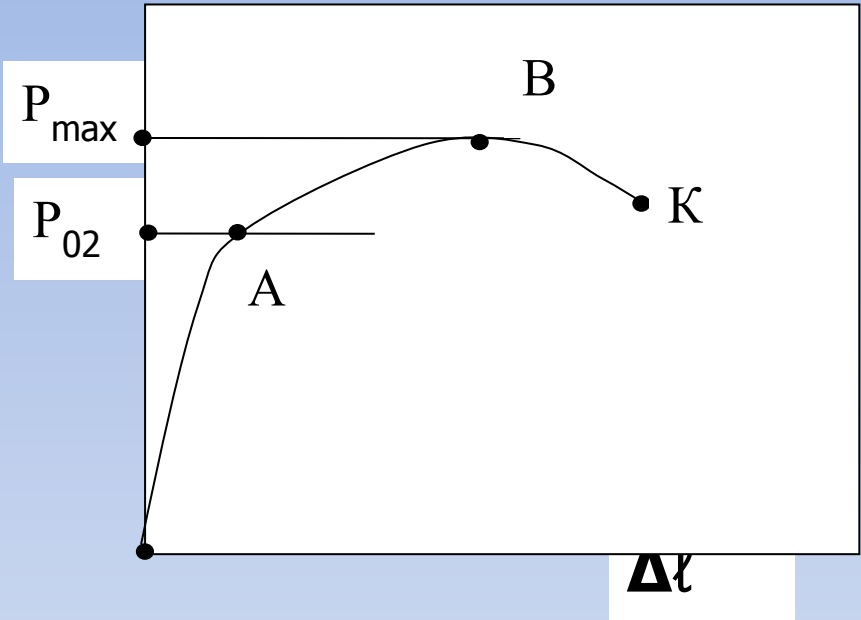
Диаграммы растяжения

P

■ малоуглеродистая сталь



■ среднеуглеродистая сталь



конструкционные стали - 600...3000 МПа
алюминиевые сплавы - 200...900 МПа
титановые сплавы - 600...1600 МПа
композиционные материалы - 300...20000 МПа.

Свойства металла, определяемые при растяжении

- **Прочность** – способность материала сопротивляться нагрузке
- **Пластичность** – способность материала деформироваться, не разрушаясь
- **Вязкость** – работа, которую нужно затратить, чтобы разрушить материал

Количественные характеристики прочности

- **Предел текучести физический**

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0};$$

где P_T – усилие на образце, соответствующее площадке текучести

- **Предел текучести условный**

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0};$$

где $P_{0,2}$ – усилие на образце, соответствующее условной текучести
($\Delta\ell = 0,002\ell_0$)

Механические свойства

Прочность

Твердость

Жесткость

Пластичность

Ударная вязкость

Теоретическая прочность
 $\sigma = \sqrt{E\gamma/a}$
- отрыв
 $\tau = Gb/2La$
- сдвиг

HB,
HRC,
HV,
H

E, G, K

δ , ψ

KCU, KCV, KCT

Реальная прочность

Прочность материала без учета его использования

Конструкционная прочность

σ_B ;
 σ_T ($\sigma_{0.2}$)

Стандартные характеристики механических св-в

Количественные характеристики пластических свойств

Относительное удлинение после разрыва

$$\delta = \frac{L_k - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

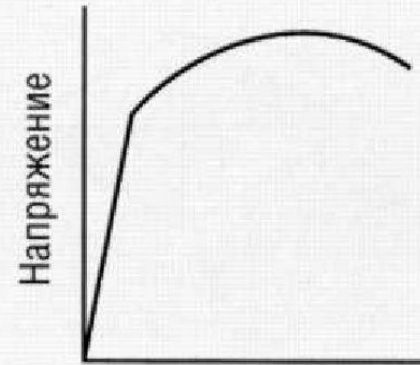
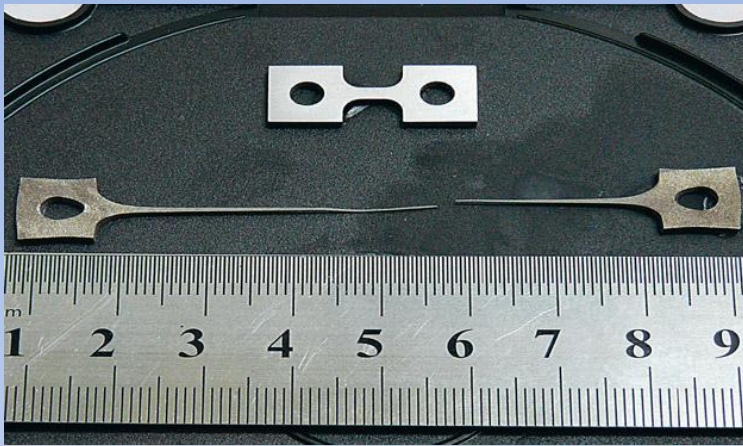
Относительное сужение после разрыва

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%$$

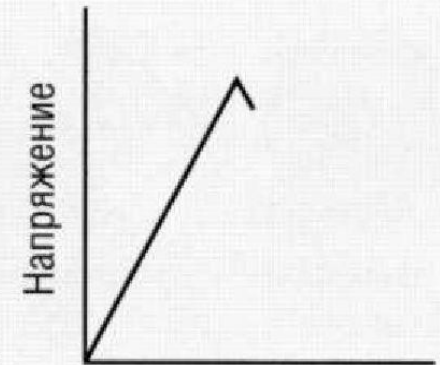
■ Ψ – локальная характеристика пластичности

Механические свойства углеродистой качественной конструкционной стали в нормализованном состоянии (ГОСТ 1050-88)

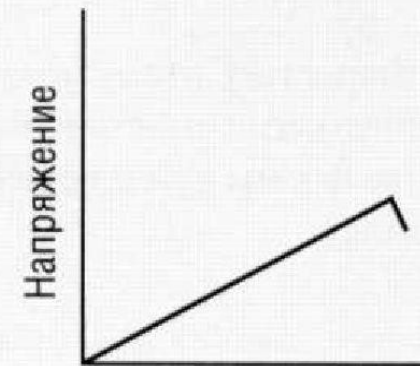
Марка стали	Предел текучести	Предел прочности	Относительное удлинение		Относительно е сужение
	МПа (кгс/мм ²)		%		
			δ_5	δ_{10}	ψ
	не менее				
10	206	334	31	26	55
15	225	373	27	23	55
20	245	412	25	21	55
25	275	451	23	19	50
30	294	491	21	17	50
35	314	530	20	16	45
40	334	569	19	15	45
45	353	598	16	13	40
50	373	628	14	11	40
55	383	647	13	10	35
60	402	677	12	9	35
65	412	697	10	8	30
70	422	716	9	7	30



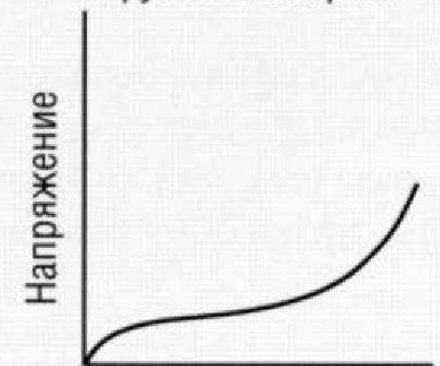
Деформация
Пластичный металл



Деформация
Хрупкий материал



Деформация
Жесткий пластик



Деформация
Эластомер



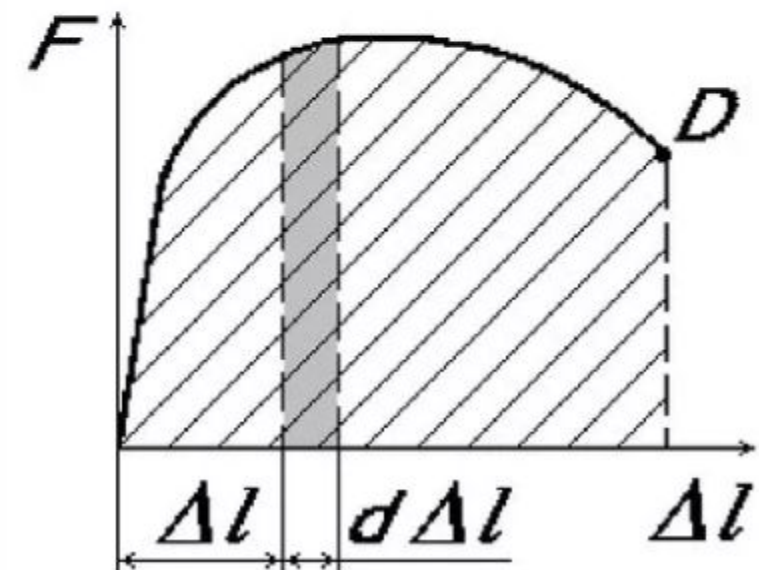
Остаточная деформация – 900-1000 %

Проявление эффекта
сверхпластичности титана в
объемном наноструктурном
состоянии

$a = \frac{A}{V_0}$ - удельная работа деформации
(статическая вязкость материала);

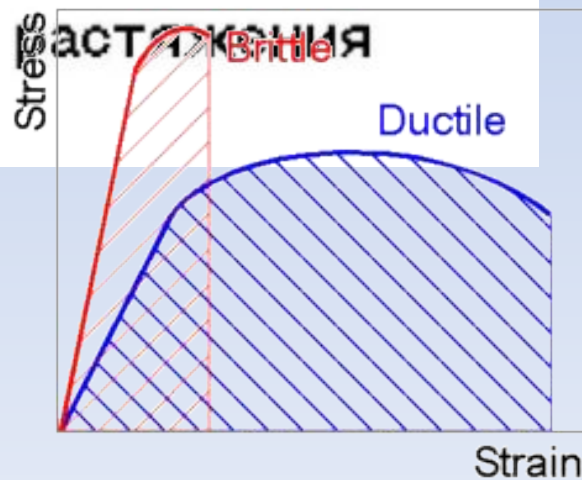
A - работа, затраченная на разрушение образца

$V_0 = S_0 l_0$ - начальный объем расчетной части
образца.



$$A = \int_0^{\Delta l} F d\Delta l$$

- пропорциональна площади диаграммы растяжения



Механические свойства

Прочность

Твердость

Жесткость

Пластичность

Ударная вязкость

Теоретическая прочность
 $\sigma = \sqrt{E\gamma/a}$
- отрыв
 $\tau = Gb/2La$
- сдвиг

HB,
HRC,
HV,
H

E, G, K

δ , ψ

KCU, KCV, KCT

Реальная прочность

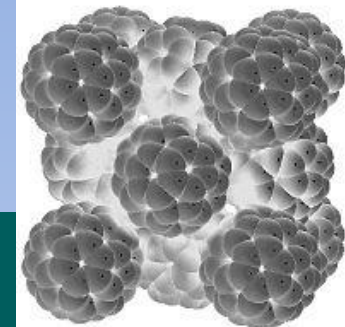
Прочность материала без учета его использования

Конструкционная прочность

σ_B ;
 σ_T ($\sigma_{0.2}$)

Стандартные характеристики механических св-в

Твердость характеризует сопротивление металла местной (локальной) пластической деформации



Шкала твердости Мооса

Тальк  Царапается ногтем	Твердость 1	Ортоклаз  Царапается напильником	Твердость 6
Гипс  Царапается ногтем	Твердость 2	Кварц  Поддается обработке	Твердость 7
Кальцит  Царапается ножом	Твердость 3	Топаз  Царапает стекло	Твердость 8
Флюорит  Царапается ножом	Твердость 4	Корунд  Царапает стекло	Твердость 9
Апатит  Царапается ножом	Твердость 5	Алмаз  Режет стекло	Твердость 10

Максимальная твердость фуллерита – 300 Гпа – в 2 раза больше алмаза. За счет способности атомов выстраивать длинные цепи в разных направлениях: Прочность, упругость не уступает титану. Не окисляется до 1300 (алмаз – 900) и имеет высокую устойчивость к

Методы измерения твердости материалов

Вдавливание индентора

Динамические

Царапание

По Бринеллю

По Роквеллу

По Виккерсу

По Шору

*Измерение микротвердости
по ГОСТ 9450-76*

*Измерение пластической
твердости по ГОСТ 18835-73*

*По отскакиванию ударного
бойка от образца*

*С помощью ультразвуковых
колебаний*

*По колебаниям маятника,
опирающегося на образец*

*По минералогической шкале
твердости*

*По 15-ти балльной шкале
М.М. Хрущова*

*Измерение микротвердости
по ГОСТ 21318-75*

*Размер отпечатка, оставшегося
на образце*

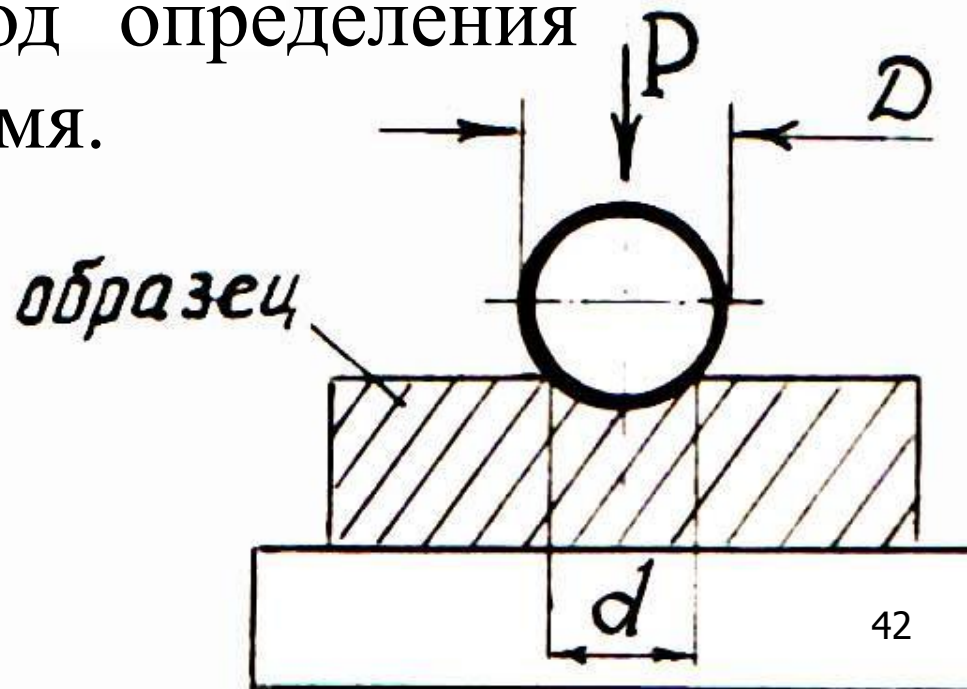
*Затухание колебаний,
генерируемых в
измерительной системе*

*Наличие на образце
следа от взаимодействия
с эталоном*

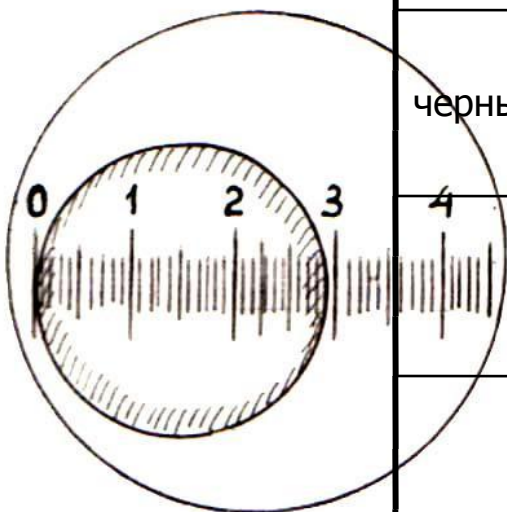
Критерии оценки твердости

Метод Бринелля

Бринелль (Brinell) Юхан Август (21.11.1849, Брингентофта, - 17.06.1925, Стокгольм), шведский инженер, автор работ по металлургии стали. Предложил (1900) статический метод определения твердости, носящий его имя.



Выбор диаметра шарика D и нагрузки P в зависимости от природы металла (НВ) и толщины образца (δ)



Металлы	НВ	δ , мм	D , мм	$P=kD^2$	P , кгс
черные	140-450	6-3	10	$30D^2$	3000
		4-2	5		750
		2	2,5		187,5
		6	10		1000
		6-3	5		250
		3	2,5		62,5
		6-3	10		3000
		4-2	5		750
		2	2,5		187,5
черные	≤ 140	9-3	10	$10D^2$	1000
Цветные	≥ 130	6-3	5	$30D^2$	250
		2-3	2,5		62,5
Цветные	35-130	6	10	$10D^2$	250
цветные	8-35	6-3	5	$2,5D^2$	62,5
		3	2,5		15,6

Метод Виккерса

Индентор - алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине 136° .

$P = 50 \dots 1000 \text{ Н}$

Твердость по Виккерсу:

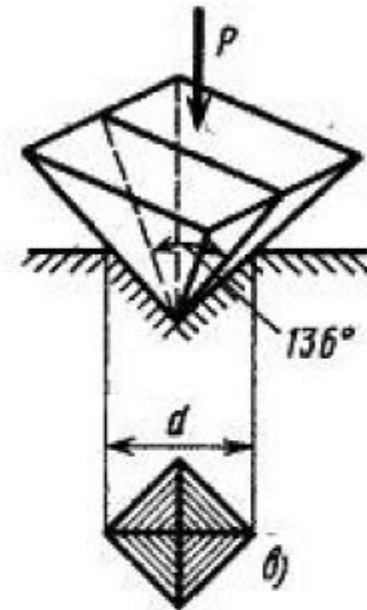
$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2 \cdot P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \cdot \frac{P}{d^2}$$

Диагональ отпечатка измеряется при помощи микроскопа

Измерение микротвердости

$P = 5 \dots 500 \text{ г}$

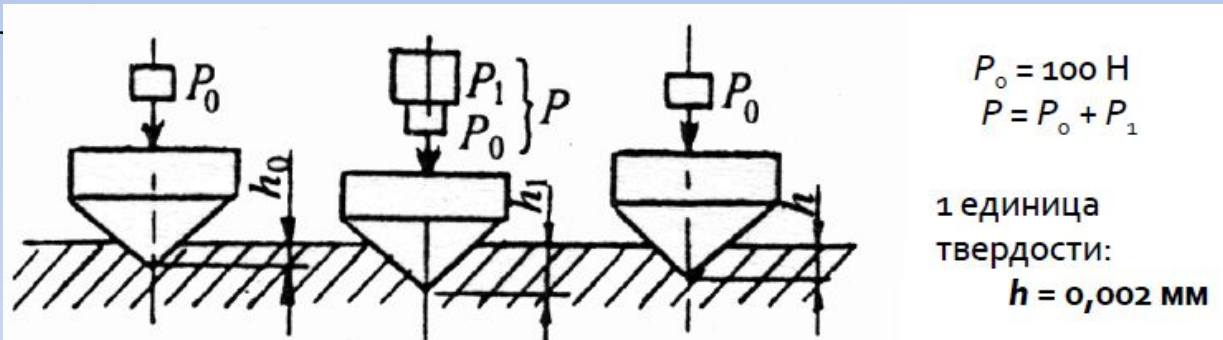
Микротвердость отдельных фаз, включений, структурных составляющих



Метод по Роквеллу

Твердомер Роквелла, машина для определения относительной глубины проникновения, был изобретен уроженцами шт. Коннектикут Хью М. Роквеллом (1890-1957) и Стэнли П. Роквеллом (1886-1940).

Изобретен в 1900 г



Шкала	Индентор	Нагрузка P_1 , Н
HRA	Алмазный конус с углом при вершине 120°	500
HRB	Стальной шарик $\varnothing 1,588 \text{ мм}$	900
HRC	Алмазный конус с углом при вершине 120°	1400

Эмпирические формулы для оценки предела прочности металлов по твердости НВ

- $k=0,34$ - Сталь НВ 120-175
- $k=0,35$ - Сталь НВ 175-450
- Отожженные $k= 0,55$ - Медные сплавы НВ 65
- Наклепанные $k= 0,40$ – Медные сплавы НВ 60
- $k=(0,33 - 0,36)$ - Алюминиевые сплавы НВ 20-45

Механические свойства

Прочность

Твердость

Жесткость

Пластичность

Ударная вязкость

Теоретическая прочность
 $\sigma = \sqrt{E\gamma/a}$
- отрыв
 $\tau = Gb/2La$
- сдвиг

HB,
HRC,
HV,
H

E, G, K

δ , ψ

KCU, KCV, KCT

Реальная прочность

Прочность материала без учета его использования

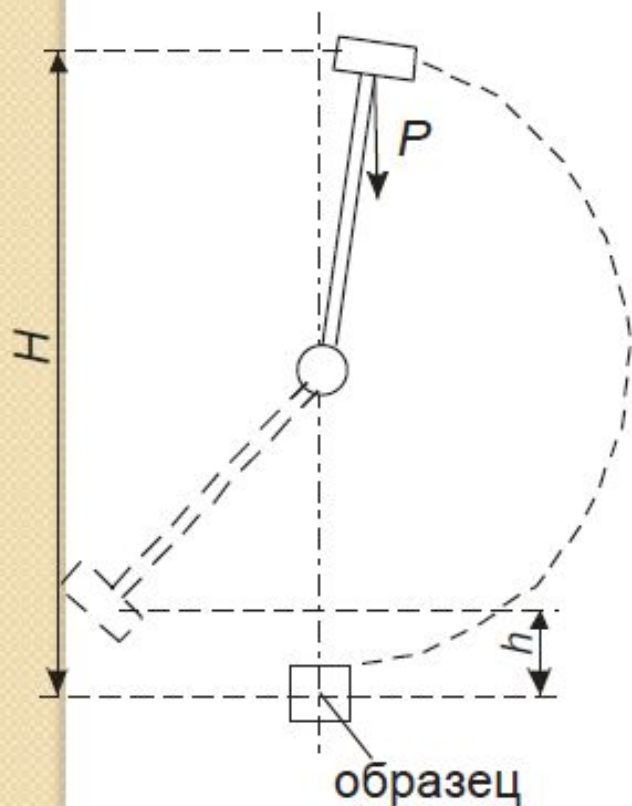
Конструкционная прочность

σ_B ;
 σ_T ($\sigma_{0.2}$)

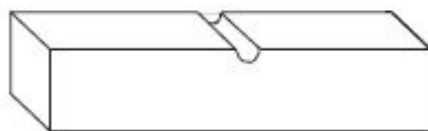
Стандартные характеристики механических св-в

Вязкость – способность материала поглощать механическую энергию внешних сил за счет пластической деформации

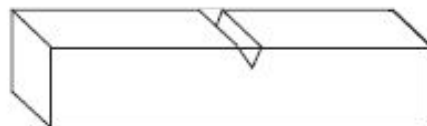
Копёр для испытания на удар



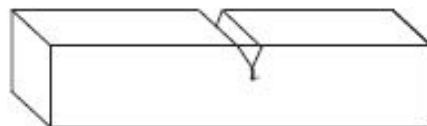
Образцы для испытания на удар



1) С U-образным вырезом



2) С V-образным вырезом



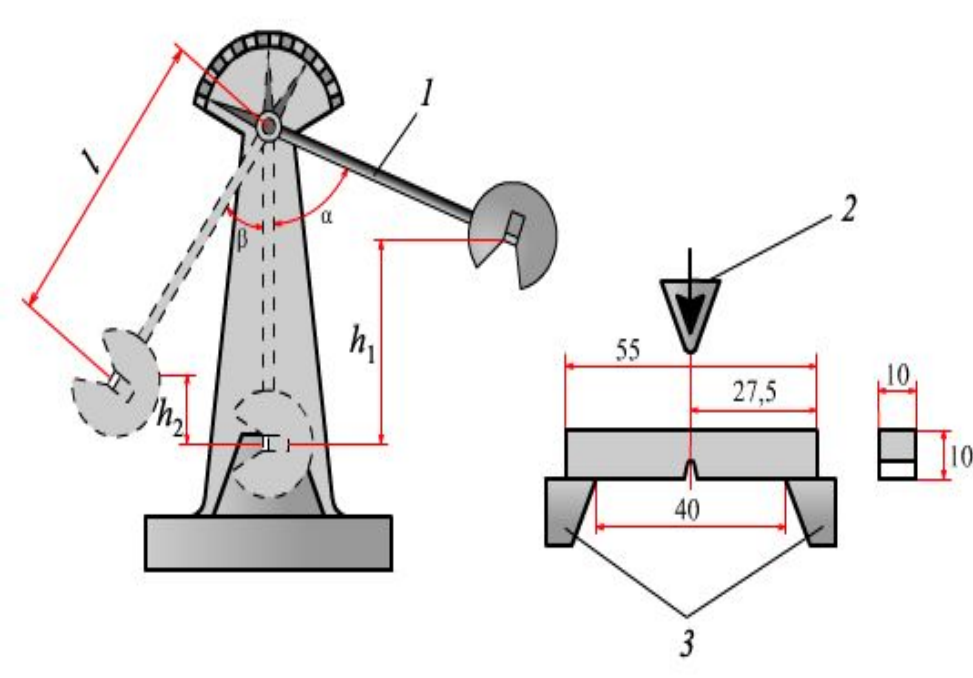
3) С V-образным вырезом и трещиной

Работа разрушения образца:

$$A = P(H - h)$$

Ударная вязкость: $a_H = A/F_0$

Обозначения: КСУ (1), КСВ (2), КСТ (3)



Параметром КСУ оценивают пригодность материала для эксплуатации. В этом случае характеризуются одновременно 2 окручивающих фактора: надрез и ударная нагрузка.

$$КСУ = КС_3 + КС_p,$$

где $КС_3$ – энергия зарождения трещины, которая тем меньше чем острее надрез;

$КС_p$ – энергия распространения трещины; если $КС_p = 0$, то материал хрупок.

Механические свойства характеризуют способность материала сопротивляться деформации и **разрушению**

Разрушение материалов

Разрушение – процесс кинетический. Зависит от времени, нагрузки, температуры, структуры

Теория разрушения С.Н.Журкова:

- разрыв химической связи
- образование субмикротрещин (нанометры)
- рост концентрации субмикротрещин
- образование магистральной трещины

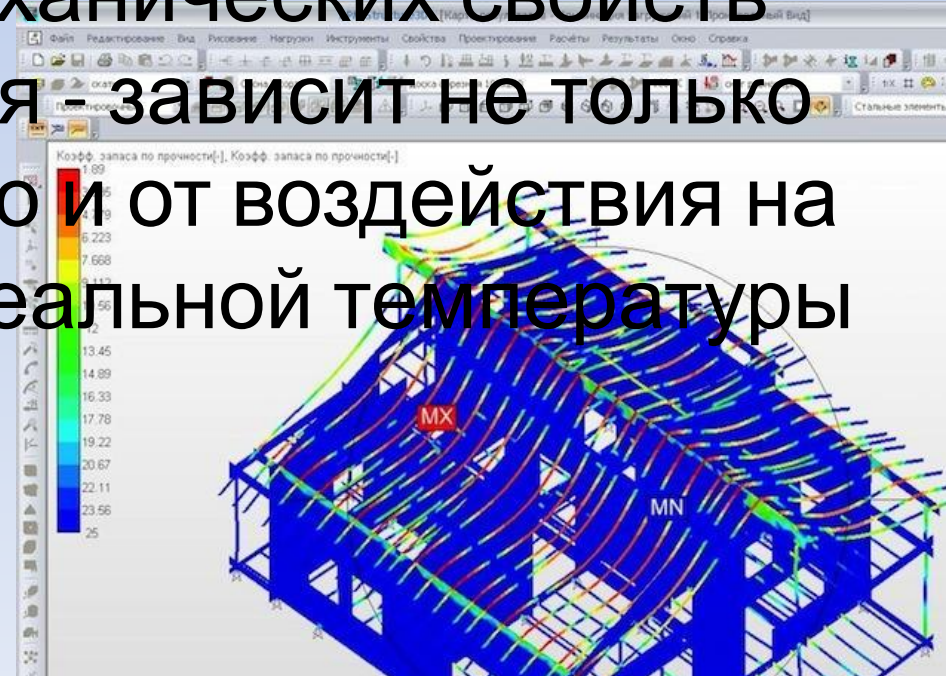
Хрупкое разрушение - плоскость разрушения перпендикулярна нормальным напряжениям

Вязкое разрушение происходит путем сдвига под действием касательных напряжений

Конструкционная прочность

- комплексный показатель, включающий группу механических свойств, определяющих работоспособность изделия.

требуемое значение механических свойств для конкретного изделия - зависит не только от силовых факторов, но и от воздействия на него рабочей среды и реальной температуры эксплуатации.



Факторы, значительно влияющие на

конструкционную прочность

- * Масштабный (чем больше габариты детали, тем меньше прочность). С увеличением объема возрастает вероятность появления различного рода дефектов металлического и технологического характера.
- * Температурный. Отдельные атомы при повышенных температурах могут приобретать кинетическую энергию, многократно превосходящую среднюю, что приводит к возрастанию растягивающих усилий и снижению прочности.

*Структурно-фазовый фактор – при изменении структурно-фазового состава материала в нем изменяется степень одновременного участия связей всех атомов сопротивлению действию внешних сил.

*Скоростной фактор – при увеличении скорости деформации возрастает сопротивление пластической деформации. Это связано с увеличением плотности дислокаций и скорости их скольжения, что приводит к увеличению сил трения в кристаллической решетке.

- При статической нагрузке в качестве критериев прочности в практике используют стандартные характеристики (σ_B - временное сопротивление разрыву, σ_T - предел текучести, $\sigma_{0,2}$ - предел текучести условный). При работе большинства машиностроительных материалов пластическая деформация недопустима, следовательно, в качестве основной расчетной характеристики используют условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$).
-

Чем выше
прочность, тем
меньше

пластичность

- ----- хрупкость



www.fotodom.ru Z004-1133 Anzenberger
Сломанная ветка.

- Допустимое рабочее напряжение определяется по формуле:

- $\sigma_{\text{раб}} = \sigma_{0,2} / n,$

- где n - коэффициент запаса (1,2...)

Для малопластичных материалов ($\delta < 5\%$)

принимают $\sigma_{0,2} = \sigma_B$

- При нагреве материала энергия связи ослабевает и напряжения значительно снижаются, в результате чего снижаются показатели прочности.
- Для разных материалов:

Металл	Температура, °С		
	рекристаллизации (теоретическая при $\alpha = 0,4$)	рекристаллиза- ционного отжига	горячей обработки давлением
Железо	450	600—700	1300—800
Сталь	450	600—700	1300 (1100)—800
Медь	270	450—500	800—600
Латунь	250	400—500	750—600
Алюминий	50	250—350	460—350
Молибден	900	1400—1600	1400—2000

При рабочих температурах (0,3 Тпл) используют показатели жаропрочности

- Жаропрочность - свойство материала противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах в течение определенного времени.

При нагреве разрушающие напряжения зависят не только от температуры, но и от времени действия нагрузки; ***чем выше температура и продолжительность действия нагрузки, тем ниже напряжения, необходимые для разрушения.*** С учетом фактора времени прочность при высоких температурах называют ***длительной прочностью.***

Предел длительной прочности

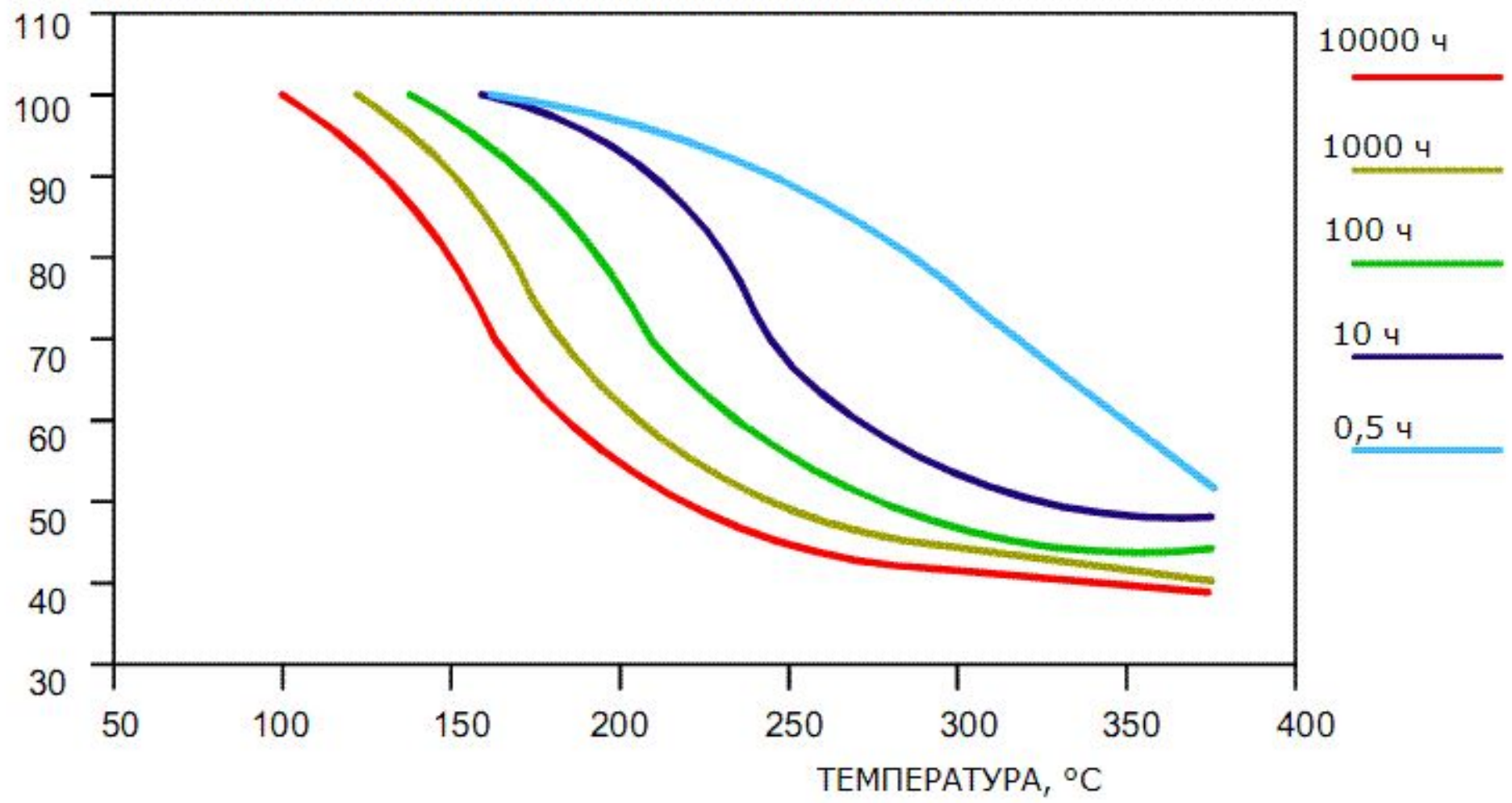
- – напряжение, которое при постоянной температуре t доводит металл до полного разрушения за заданный промежуток времени

База испытания назначается исходя из срока службы детали, и колеблется от нескольких часов до нескольких лет.

Металлы, применяемые в авиационных двигателях и конструкциях, подвергаются обычно кратковременным испытаниям на базе порядка 100—200 ч.

Предел длительной прочности на базе 100 ч

% ОТ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

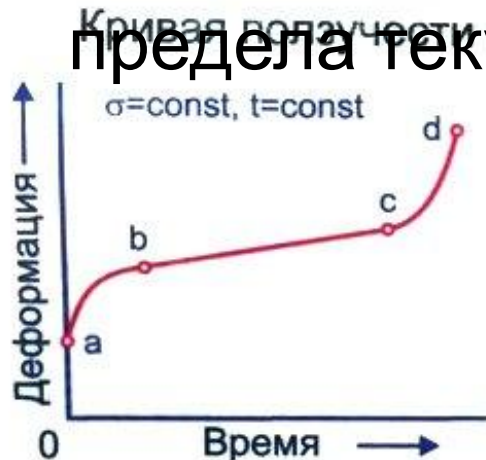


- При повышенных температурах заметно ослабляются силы межатомного взаимодействия, что служит причиной снижения характеристик прочности, облегчения пластической деформации и возможном проявлении ***ползучести***.
- Предел ползучести – наибольшее напряжение, под действием которого при температуре t за время τ остаточная деформация не превышает допустимое значение .
- Испытания на ползучесть проводят, как правило, при $t=(0,4-0,7) t_{пл}$.

Ползучесть

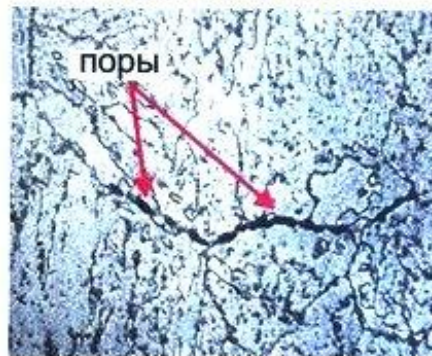
– процесс медленного и непрерывного нарастания остаточной деформации при постоянной температуре и постоянном напряжении, меньшем

предела текучести.



- 0a** - деформация в момент приложения нагрузки;
- ab** - стадия *неустановившейся ползучести*;
- bc** - стадия *установившейся ползучести*;
- cd** - стадия *ускоренной ползучести*.

Повреждаемость стали 15X1M1Ф при ползучести



x800

Разрушение при ползучести начинается с появления пор или клиновидных трещин на границах зерен. Они растут и объединяются, образуя макротрещины.

Скорость ползучести:

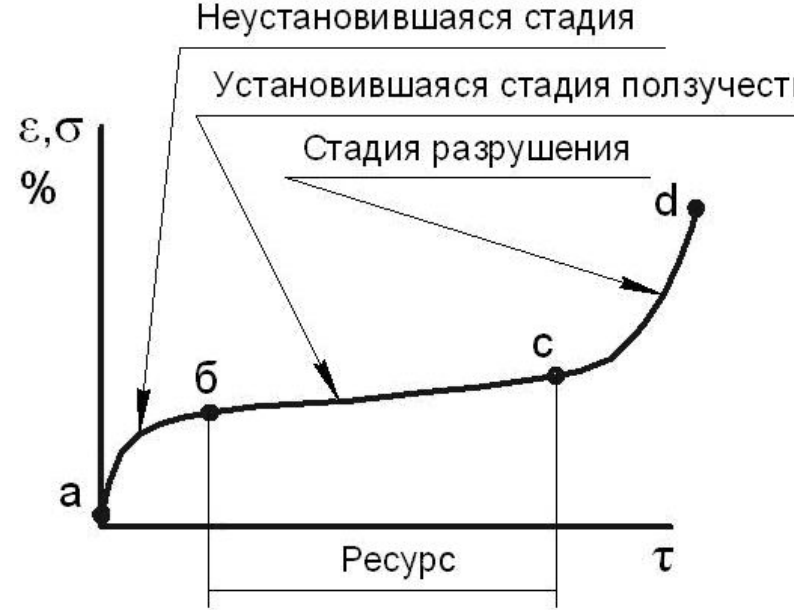
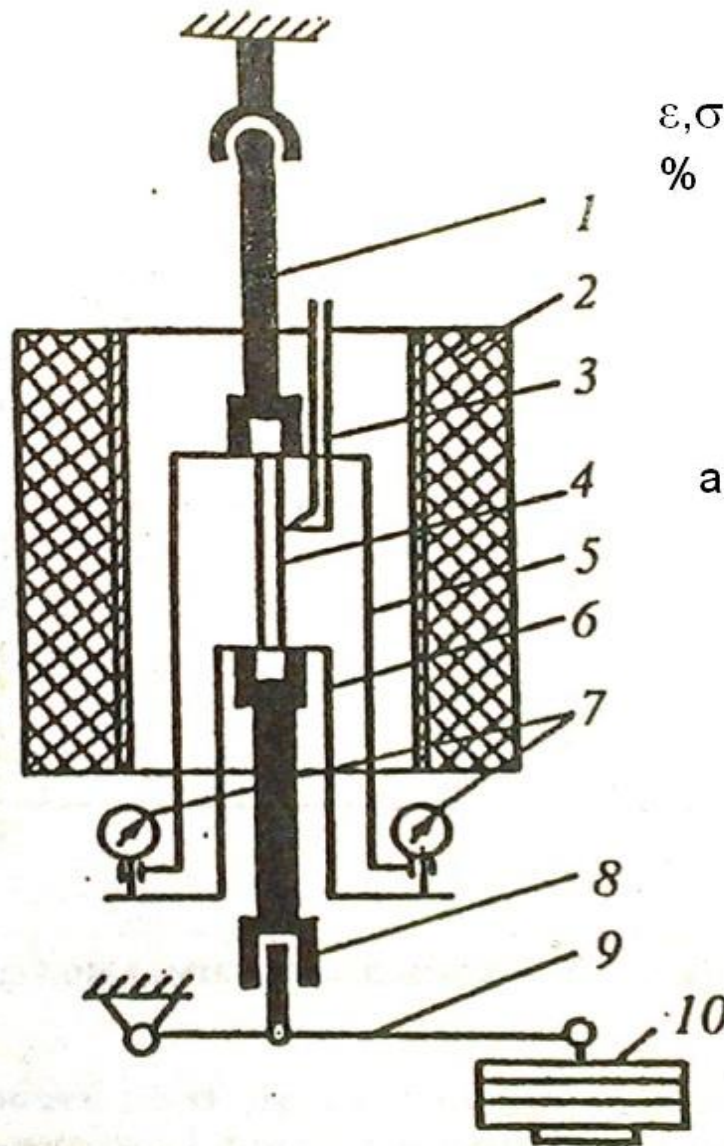
$$V_{\text{пол}} = \frac{d\varepsilon}{d\tau} = \text{tg}\alpha$$

ε

τ

α

- деформация (ось ординат);
- время (ось абсцисс);
- угол наклона кривой
- Традиционно для определения ползучести строят *кривые ползучести*



Кривая ползучести

Схема установки для испытания на ползучесть растяжением:

1 – верхний захват; 2 – электропечь; 3 – термопреобразователь; 4 – образец; 5 – наружная шина; 6 – внутренняя шина; 7 – индикатор часового типа; 8 – нижний захват; 9 – грузовой рычаг; 10 – грузы

Таблица при высоких

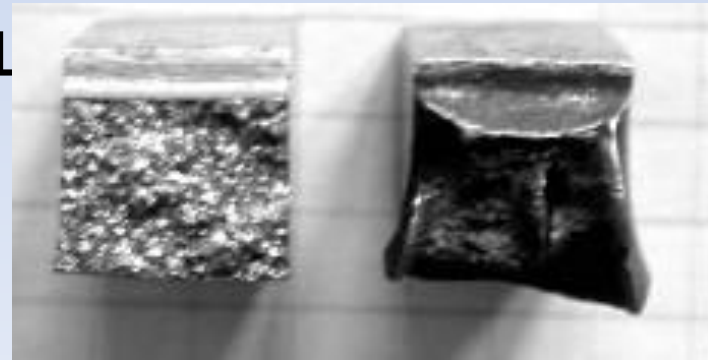
Механические свойства сталей в зависимости от температуры нагрева

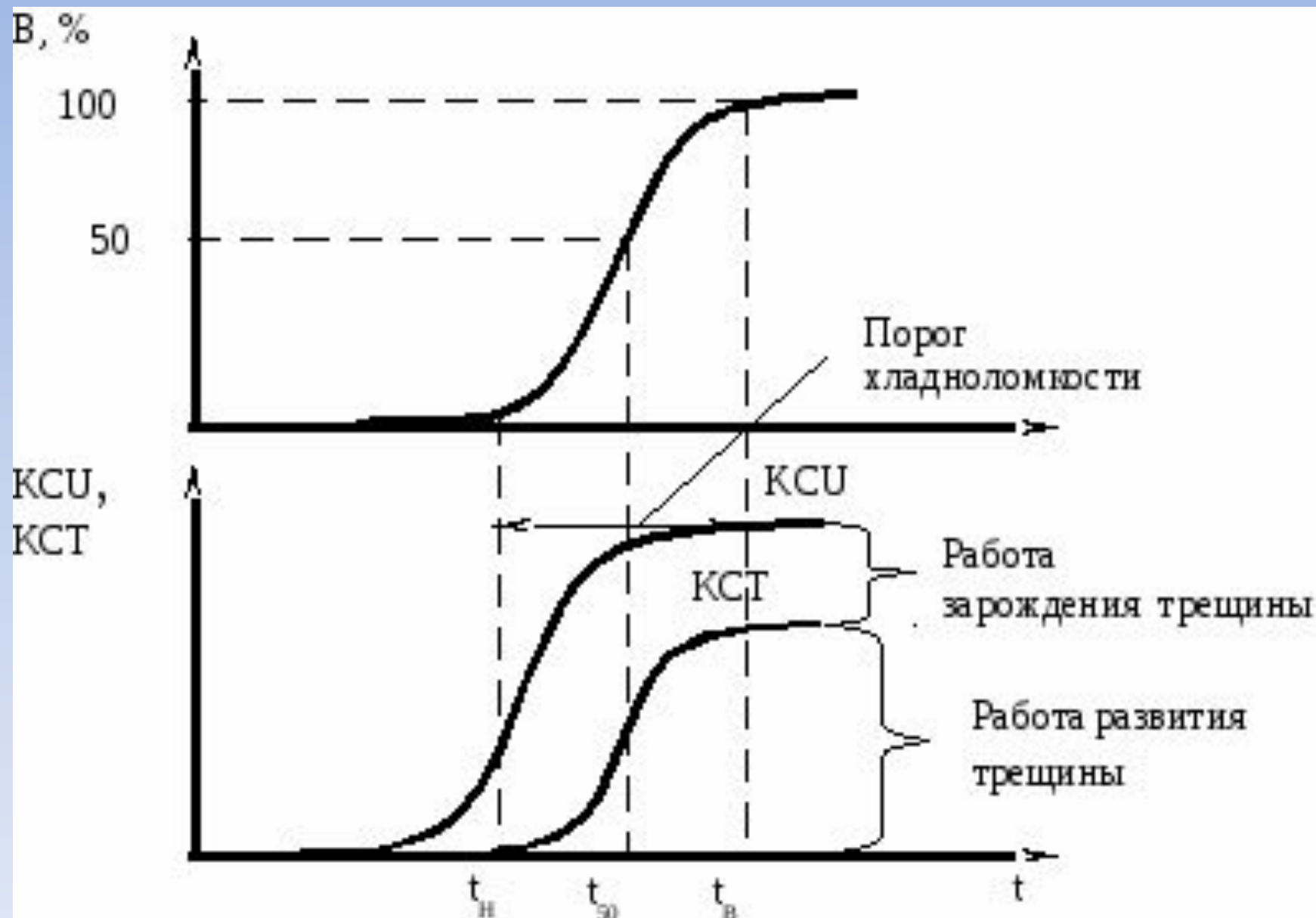
Марка стали	Термо-обработка	Температура испытания, °С	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²	δ_5 , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
Сталь 40	Нормализация, 850 °С; отпуск, 650 °С	20	363	657	24	50	59
		200	275	588	20	51	88
		300	363	637	25	47	88
		500	226	343	27	68	59
		600	128	177	27	52	88
Сталь 16ГНМА	Нормализация, 930 °С; отпуск, 660 °С, 8 – 12 ч	20	349	519	24	66	108
		350	326	501	20	62,3	133
		400	326	477	19	60	126
		500	275	388	17	77	78
		600	249	283	17	86	98
30ХГСА	Закалка, 880 °С (масло); отпуск, 560 °С	20	941	1049	13	56	52
		250	834	1000	13	47	126
		300	814	951	10	50	124
		400	785	902	16	69	94
		500	647	687	21	83	73
08Х18Н10Т	Закалка, 1050 – 1100 °С (вода)	20	275	610	41	63	245
		300	200	450	31	65	–
		400	175	440	31	65	313
		500	175	440	29	65	363
		600	175	390	25	61	353
25Х1М1Ф	Закалка, 950 °С (масло); отпуск, 670 – 690 °С	20	657	780	198	57	83
		500	430	525	15	55	176
		565	402	441	21	78	176
		580	373	402	24	79	170
		600	328	338	20	88	191

Хладноломкость — склонность металла к переходу в хрупкое состояние с понижением температуры.

Порог хладноломкости — температурный интервал изменения характера разрушения

- Влияние снижения температуры на склонность материала к хрупкому разрушению оценивают по порогу хладноломкости (t_{50}). Это температура, при которой в изломе образца имеется 50% волокнистой составляющей





Чем ниже порог хладноломкости, тем менее чувствителен металл к концентраторам напряжений (резкие переходы, отверстия, риски), к скорости деформации

Действие охрупчивающих факторов:

- Концентраторы напряжений (дефекты);
- Характер нагрузки;
- Температура.

Хладноломкими являются железо, вольфрам, цинк и некоторые другие металлы

- **Хладноломкость материалов оценивается температурой, при которой ударная вязкость должна быть не менее 0,3 МДж/м².**
- *Из физических свойств* - тепловое расширение, теплопроводность и теплоёмкость (чем меньше теплоёмкость и больше теплопроводность, тем легче захлаживается криогенное оборудование и быстрее выходит на рабочий режим).
- *Совместимость с окружающей средой* – взаимодействие материала с кислородом и водородом. В контакте с кислородом возможно воспламенение материалов (титана, алюминия и их сплавов). Водород растворяется во многих металлах и вызывает

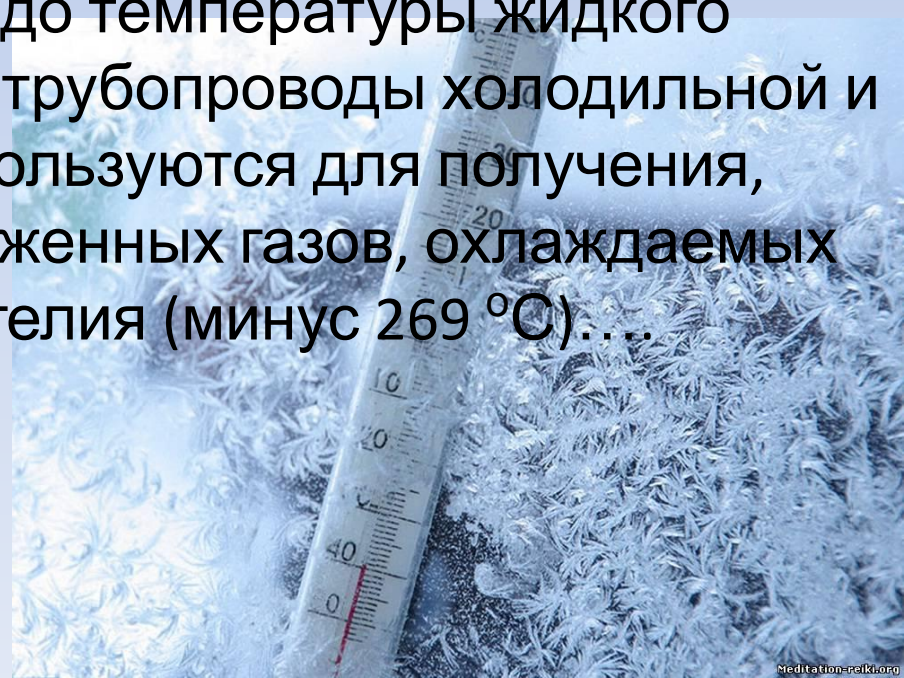
Механические свойства сталей в зависимости от температуры охлаждения

Марка стали	Термо-обработка	Температура испытания, °С	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²	δ_5 , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
Сталь 20	Нормализация	20	510	370	29	65	80
		-40	550	380	33	64	30
		-70	610	400	34	620	10
40X	Закалка, 850 °С (масло); отпуск, 550 °С	20	1170	1090	14	55	110
		-50	1230	1130	15	55	70
		-73	1250	1150	15	54	65
		-193	1580	1550	15	45	13
18X2H4BA	Закалка, 870 °С (масло); отпуск, 200 °С	20	1420	1210	14	62	100
		-70	1450	1240	16	61	100
		-100	1540	1400	15	61	60
		-196	1780	1580	11	57	50
		-253	1930	1720	7	24	30
12X18H10T	Закалка, 1100°С (воздух)	20	660	250	58	72	310
		-70	1000	380	53	69	280
		-196	1520	450	43	55	250
		-253	1420	520	28	26	230
14Г2АФ	Нормализация, 930 °С	20	600	460	28	72	190
		-40	700	540	29	71	180
		-60	700	540	27	71	110
20X13	Нормализация, 1000 °С; отпуск, 700 °С	20	710	540	20	61	78
		0	720	550	29	50	64
		-20	740	570	22	59	55
		-40	780	580	23	57	50
		-60	820	590	23	57	42

• Для работы при отрицательных температурах применяются стали, алюминиевые, медные, титановые сплавы, неметаллические материалы.

Хладостойкими называют материалы, сохраняющие достаточную вязкость при температурах от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до минус $269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($273\text{ K} - 4\text{ K}$).

Воздействие низких температур подвергаются конструкции, автомобили, вагоны в северных районах страны, охлаждаемые до температур климатического холода (минус $60\text{ }^{\circ}\text{C}$); обшивка самолётов, детали ракет и космических аппаратов, охлаждаемые от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры жидкого кислорода (минус $183\text{ }^{\circ}\text{C}$); узлы и трубопроводы холодильной и криогенной техники, которые используются для получения, хранения и транспортировки сжиженных газов, охлаждаемых вплоть до температуры жидкого гелия (минус $269\text{ }^{\circ}\text{C}$)....



О пригодности материала к работе при заданной температуре судят по температурному запасу вязкости, равному вязкости при температуре перехода в хрупкое состояние по отношению к рабочей температуре.



Чем больше температурный запас вязкости, тем меньше вероятность

- О пригодности материала для работы при заданной температуре судят по температурному запасу вязкости, равному разности температуры эксплуатации и t_{50} . При этом, чем ниже температура перехода материала в хрупкое состояние по отношению к рабочей температуре, тем больше температурный запас вязкости и выше гарантия от хрупкого разрушения.
- Запас вязкости для ответственных деталей, испытывающих динамические нагрузки, принимается равным 600, для неответственных деталей и промежуточного случая соответственно 200 и 400.

Вязкий материал способен рассеивать подводимую к нему энергию, расходуя ее на пластическую деформацию внутри материала.

Такая способность растет с увеличением зоны пластической деформации и вершины концентратора напряжений.

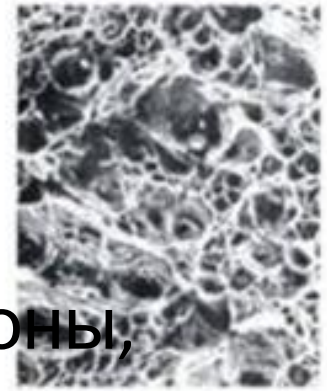
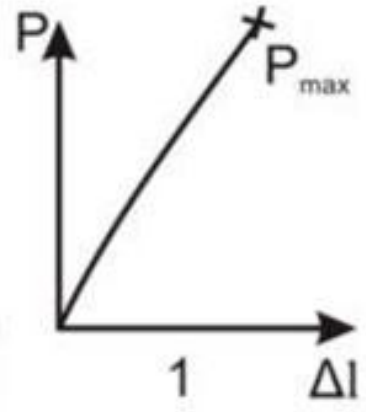
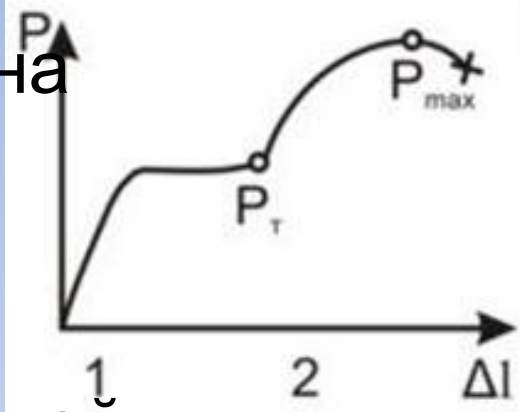
Чем больше величина такой зоны, тем больше расходуется энергии на разрушение, тем выше

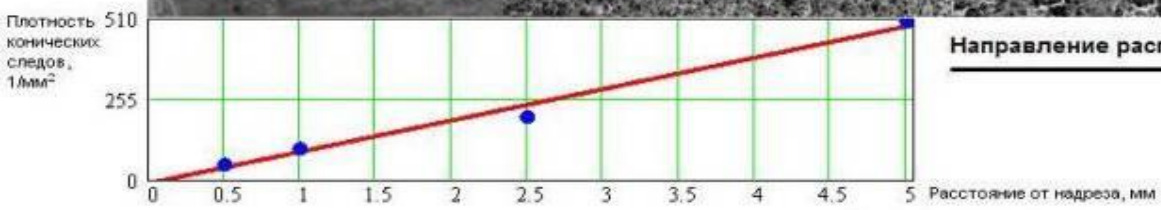
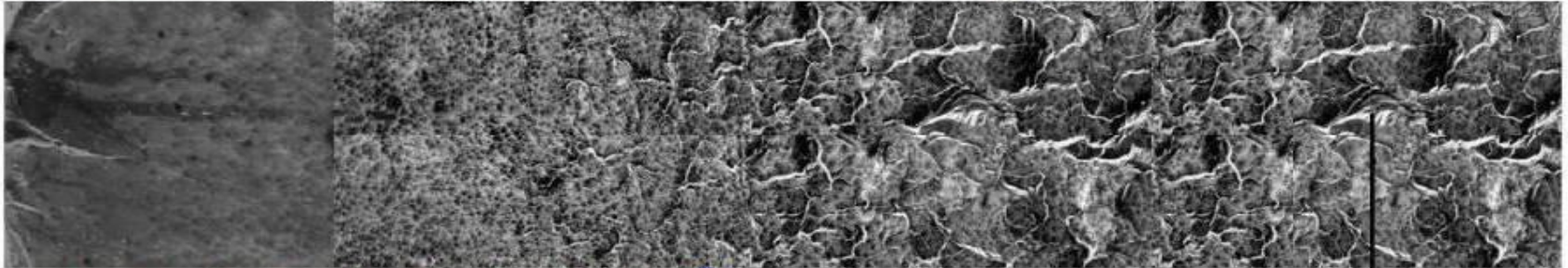
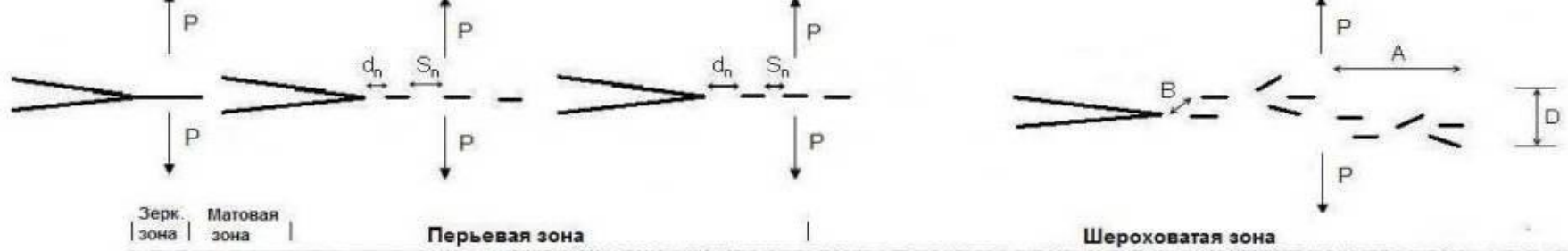
вязкость материала. Хрупкий материал накапливает упругую энергию, которая затем превращается в

ДИАГРАММА РАСТЯЖЕНИЯ И ИЗЛОМ

пластичного металла

хрупкого металла

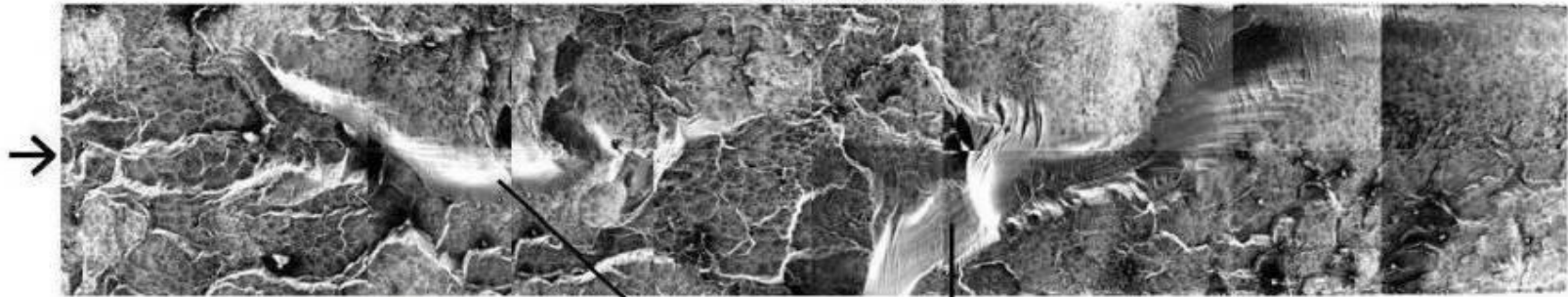




Направление распространения трещины →

Микроветвление

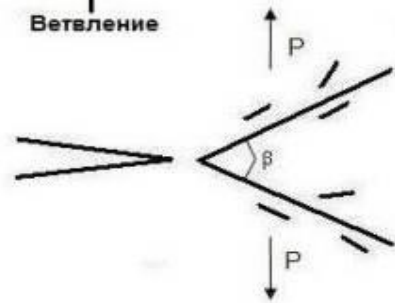
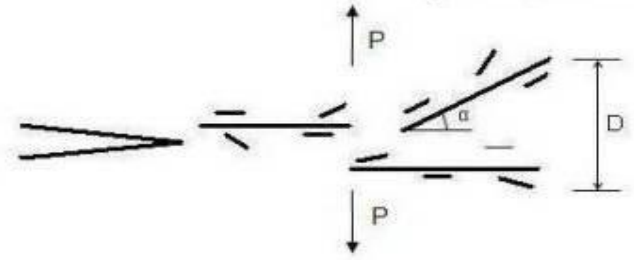
Шероховатая зона



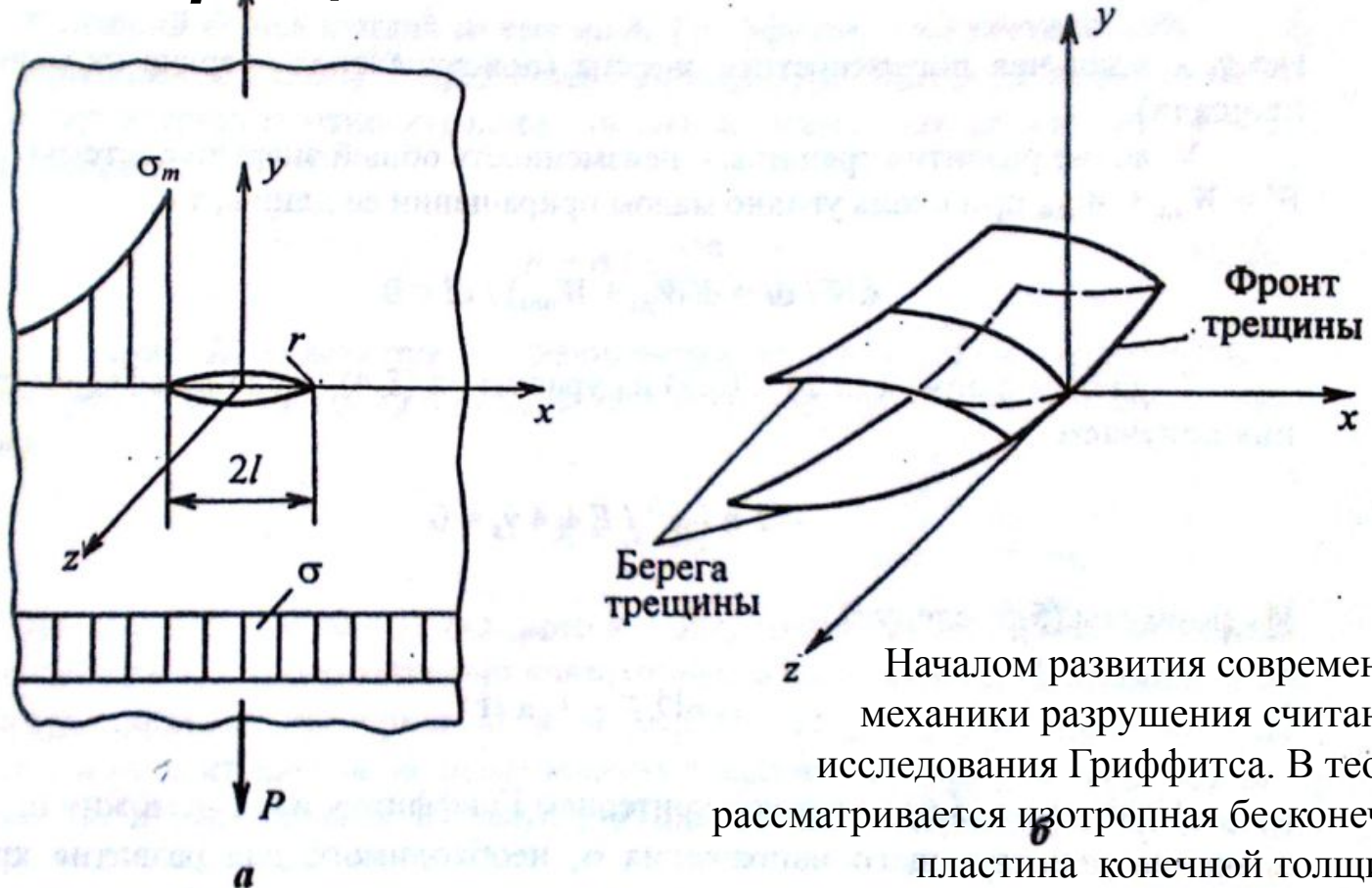
Направление распространения трещины →

Микроветвление

Ветвление



Для обеспечения надежности конструкции важно, чтобы каждому уровню прочности материала соответствовал необходимый запас **трещиностойкости.**

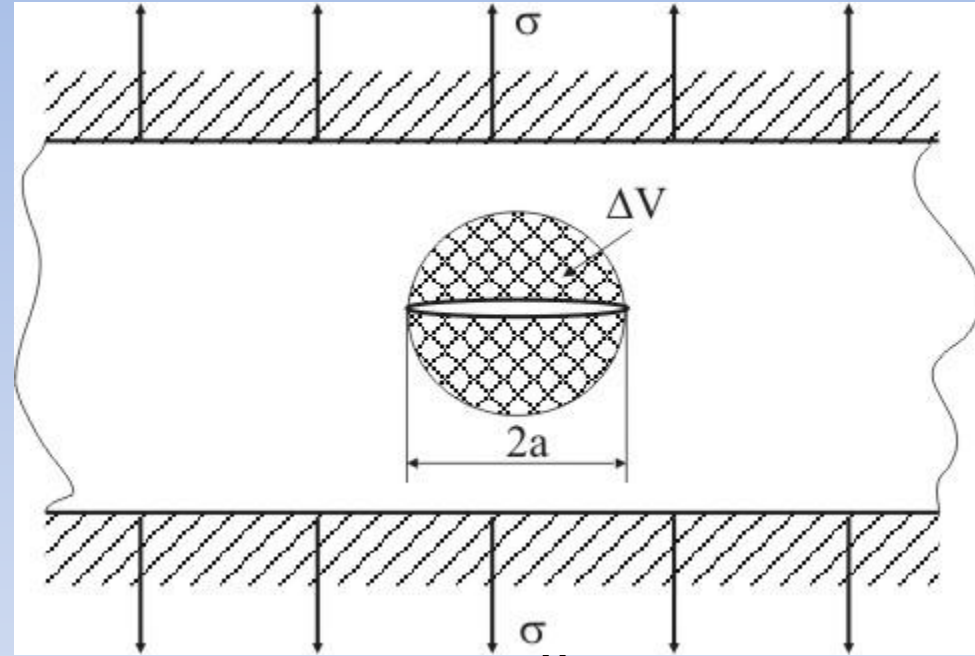


Схемы нагружения пластины с эллиптической трещиной (а) и расположения трещины в пространстве (б)

Началом развития современной механики разрушения считаются исследования Гриффитса. В теории рассматривается изотропная бесконечная пластина конечной толщины, содержащая эллиптическую трещину.

- Гриффитс предположил, что трещина будет развиваться лишь в том случае, если освобождаемая при этом энергия будет достаточна для обеспечения всех затрат энергии, связанных с этим ростом.

Для определения баланса энергии рассмотрим пластину бесконечной ширины и единичной толщины с центральной поперечной трещиной длиной $2a$, нагруженную одноосным полем напряжений σ и закрепленную по краям



- Условие для роста трещины длиной a :

- $dU/da = dW/da$

- где dU/da – скорость высвобождения упругой энергии;
- dW/da – скорость расходования энергии для роста

- Критерий Гриффитса применим только к хрупким материалам. Для реальных материалов невозможно получить полностью хрупкое разрушение, т.к. зарождению и развитию трещины предшествует локализованная пластическая деформация. Если считать, что пластическая деформация сосредоточена в вершине трещины, то на нее затрачивается определенная энергия . Поэтому для распространения трещины должно соблюдаться *равенство выделяющейся энергии упругой деформации и энергии пластической*

Дж. Ирвином и Е.О. Орованом был предложен силовой критерий и доказана эквивалентность

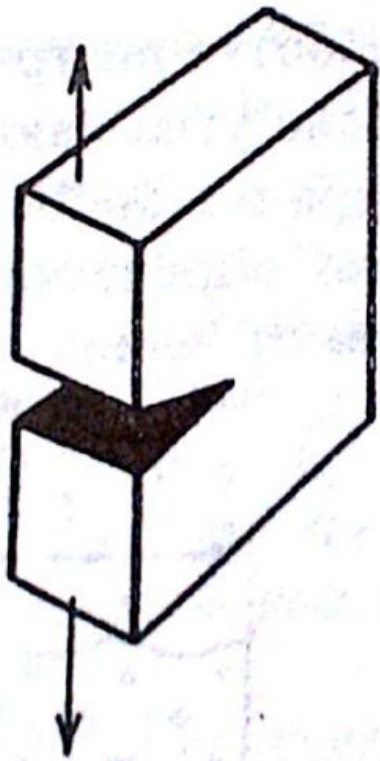
- критерий Ирвина G МПа*м, характеризующий работу, затраченную на образование новой поверхности трещины единичной длины:

- $G = \frac{\pi \sigma^2 l}{E}$ – энергетический критерий.

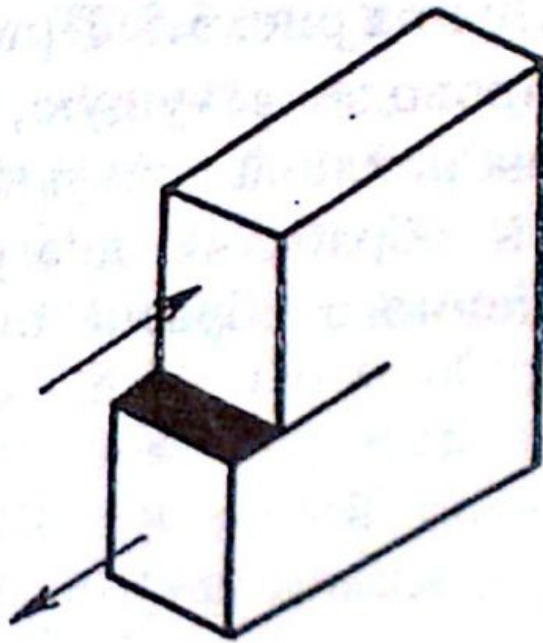
- критерий K , характеризующий относительное локальное повышение напряжения в вершине трещины:

- $K = \sigma \sqrt{\pi l}$ – силовой

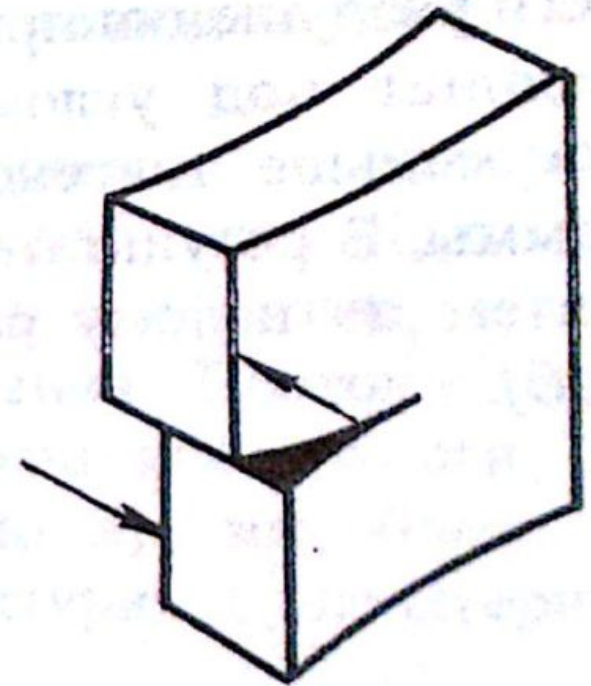
- Помимо рассмотренных критериев, существуют деформационные критерии квазихрупкого разрушения, по которым также можно определить будет ли трещина раскрываться.
- Но на практике наибольшее распространение получил **коэффициент интенсивности напряжений**. Принято считать, что мгновенное развитие трещины наступает в тот момент, когда достигает максимального (или критического) значения, которое называют **критическим коэффициентом интенсивности напряжений**.



1. Трещина отрыва



2. Трещина поперечного сдвига

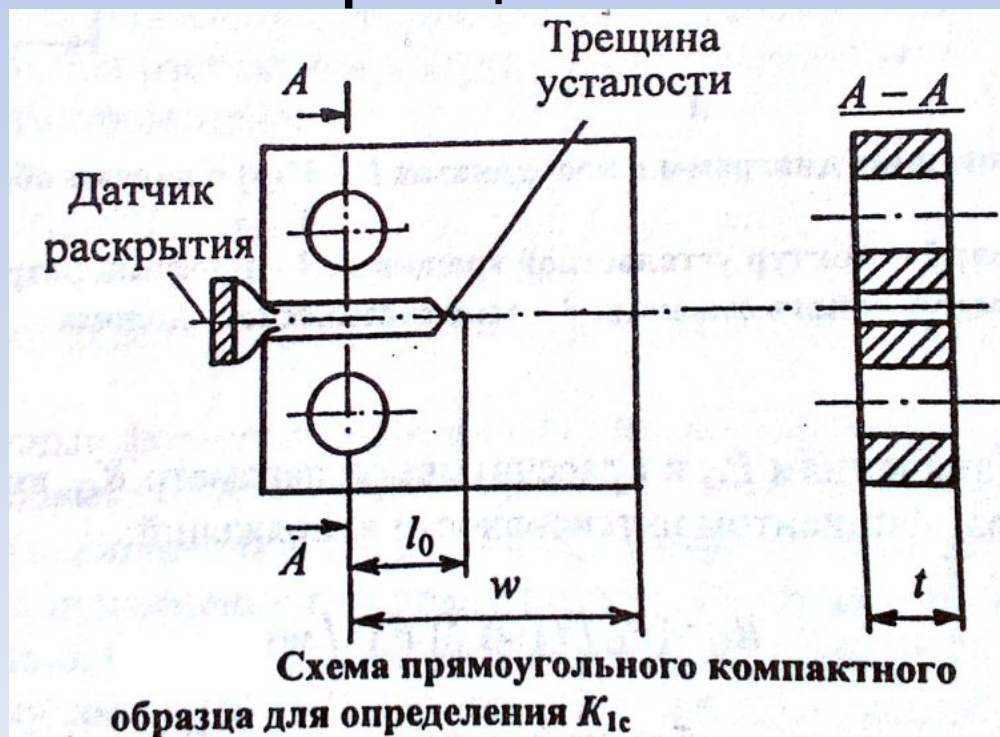


3. Трещина продольного сдвига

Для модели трещины 1, как наиболее типичной, минимальное значение K_{Ic} обозначается K_{Ic} и называется **критическим коэффициентом напряжений** в условиях плоской деформации в вершине трещины. Величина K_{Ic} — *количественная характеристика трещиностойкости материала*. На практике ее используют для определения связи между разрушающими напряжениями и *размерами дефектов* в

- Определяют K_{Ic} путем испытания специальных образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной (ГОСТ 25506-85).
 Схема прямоугольного компактного образца с надрезом и выращенной

Образец подвергается внецентровому растяжению с автоматической регистрацией диаграммы в координатах нагрузка P – раскрытие берегов надреза V . По диаграмме определяют максимальное напряжение P_Q , при котором трещина раскрывается; по излому образца определяют длину трещины l . По этим данным по специальной зависимости определяют расчетный коэффициент интенсивности напряжений



К наиболее важным критериям трещиностойкости относят

*критерий КСТ – удельная работа распространения трещины. Чем выше его значение, тем меньше опасность его хрупкого разрушения и выше эксплуатационная надежность.

Для сталей $K_{СТ} > 0,2 \text{ МДж/м}^2$;

*критерий Дж. Ирвина K_{1C} – характеризует интенсивность растягивающих напряжений у вершины трещины в момент разрушения.

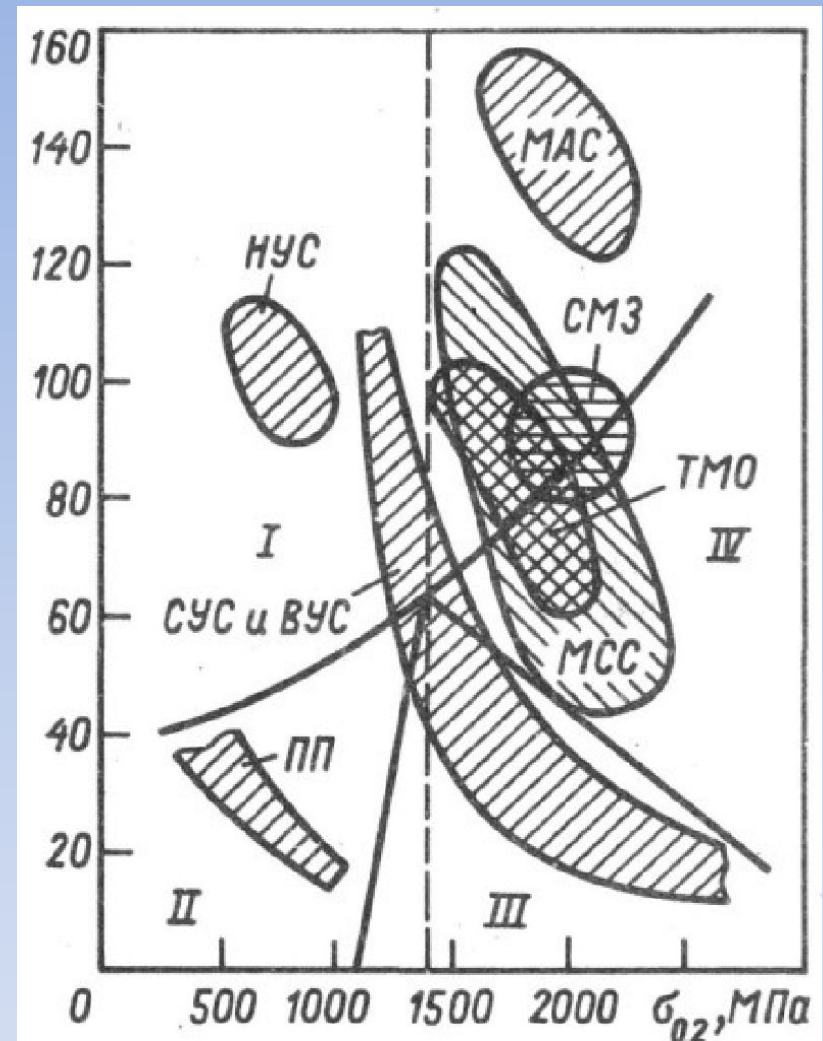
Показатели трещиностойкости некоторых конструкционных материалов

Материал	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	$\sigma_{0,2}$, МПа	$l_{кр}$, мм
Алюминиевый сплав Д16	24,2	450	3,6
Титановый сплав BT6	115	900	20,5
Сталь 40ХНМА 30Х3МФ	99 72	860 1240	17 3,9

В настоящее время существуют методики косвенной оценки по другим, более просто и экономично определяемым механическим и структурным характеристикам материалов (размер зерна, относительное сужение,..)

В качестве ориентира можно использовать рекомендации о том, что нечувствительными к концентраторам напряжения являются материалы с характеристиками: $\delta \geq 10\%$, $\psi \geq 50\%$.

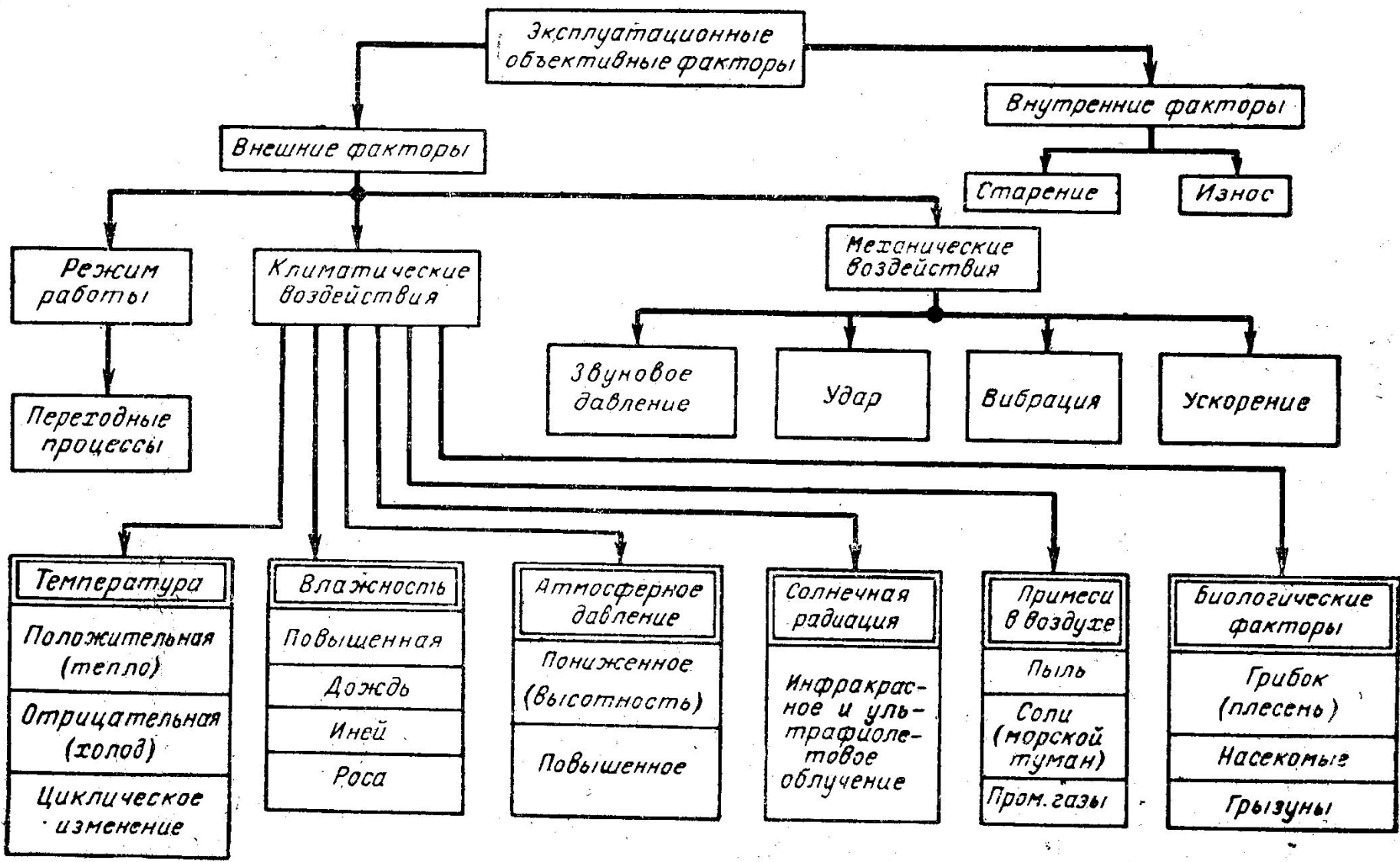
Связь между критерием трещиностойкости и (K_{1c}) и пределом текучести для сталей:



МЛС—метастабильные аустенитные стали; СМЗ—стали со сверхмелким зерном; ТМО — стали после термомеханической обработки; МСС— мартенситно-стареющие стали; СУС и ВУС— средне- и высокоуглеродистые стали; НУС—низкоуглеродистые низколегированные стали; ПП — эвтектоидные стали с пластинчатым перлитом; I—область вязкого разрушения; II — область транскристаллитного скола; III—область интеркристаллитного скола; IV — область квазискола

- Среда, в которой работает материал (жидкая, газообразная, ионизированная, радиационная), оказывает существенное и преимущественно **отрицательное** влияние на комплекс свойств, снижая работоспособность в целом.





Эксплуатационные объективные факторы

Внешние факторы

Внутренние факторы

Режим работы

Старение

Износ

Переходные процессы

Климатические воздействия

Механические воздействия

Звуковое давление

Удар

Вибрация

Ускорение

Температура

Положительная (тепло)

Отрицательная (холод)

Циклическое изменение

Влажность

Повышенная

Дождь

Иней

Роса

Атмосферное давление

Пониженное (высотность)

Повышенное

Солнечная радиация

Инфракрасное и ультрафиолетовое облучение

Примеси в воздухе

Пыль

Соли (морской туман)

Пром. газы

Биологические факторы

Грибок (плесень)

Насекомые

Грызуны

- Долговечность деталей, работающих в атмосферах сухих газов или жидких электролитов, зависит от скорости химической или электрохимической коррозии.
- Работоспособность в таких средах сохраняют **жаростойкие и коррозионностойкие материалы.**

жаростойкость- сопротивление металла окислению при высоких температурах

- **окалиностойкость** — способность противостоять химическому разрушению поверхности в газообразной среде при температурах выше 550°C в ненагруженном или слабонагруженном состоянии. Жаростойкость металла (сплава) в окислительной атмосфере определяется свойствами образующегося на поверхности металла слоя оксидов — окалины, затрудняющей диффузию газа вглубь металла и тем самым препятствующей

- Рабочая среда может вызывать повреждение поверхности, из-за окисления, коррозионного растрескивания, образования окалины, а так же изменение химического состава поверхностного слоя в результате насыщения нежелательными элементами (водород). Кроме того, возможны разбухания и местные разрушения поверхности
- материалов под действием
- излучений.
-



- Для того чтобы противостоять рабочей среде материал должен обладать не только определенным комплексом механических свойств, но и физико-химическими свойствами:
- стойкость к электрохимической коррозии;
- радиационная стойкость;
- влагостойкость;
- способность работать в условиях вакуума и т.д.

Коррозия



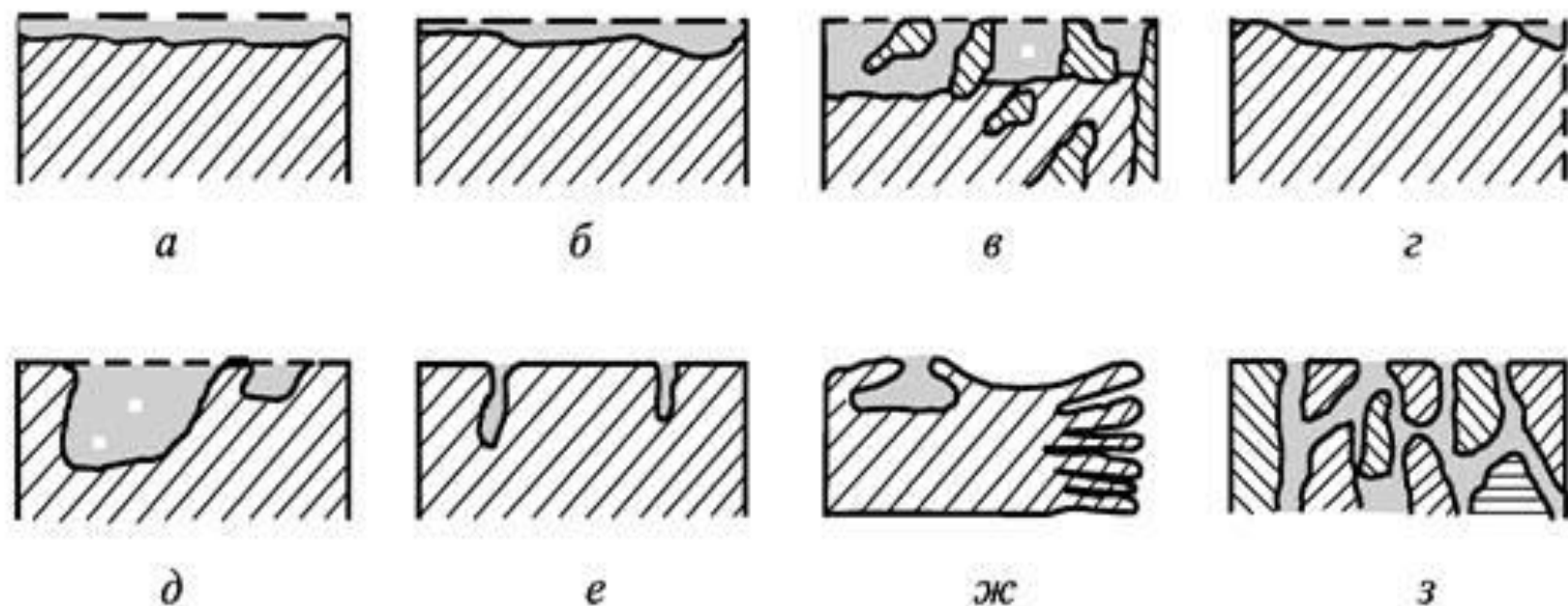


Рис. 1.1. Виды коррозии:

a — сплошная равномерная; *б* — сплошная неравномерная; *в* — структурно-избирательная; *г* — пятнами; *д* — язвами; *е* — точками (питтинговая); *ж* — подповерхностная; *з* — межкристаллитная

стойкость против общей и межкристаллитной коррозии, коррозионного растрескивания

- Испытания на общую коррозию проводят на образцах с большим отношением поверхности к объему. Коррозионную среду выбирают с учетом **условий эксплуатации материала**. Испытания проводят в жидкости при постоянном или многократно повторяемом переменном нагружении образцов, в кипящем соляном растворе, в парах или окружающей атмосфере.

Пятибалльная шкала коррозионной стойкости металлов

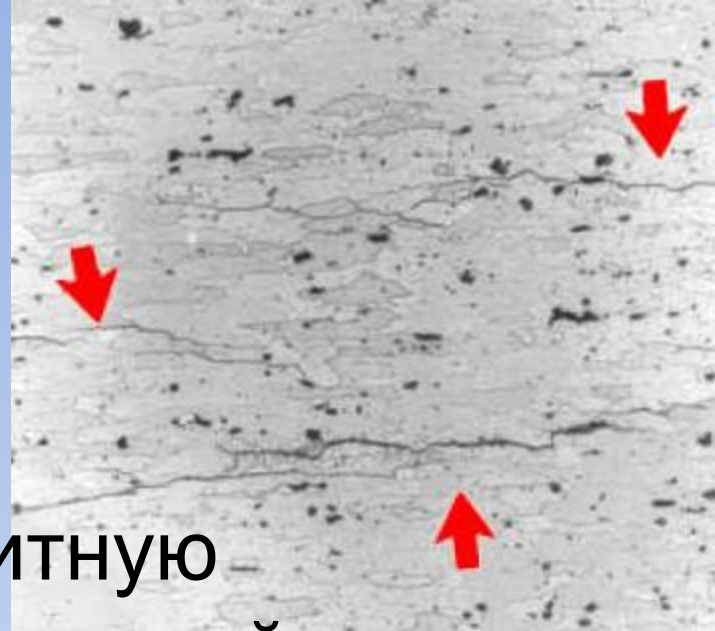
Балл	Скорость коррозии $V_{кор}$, мм/год	Категория стойкости
1	Не более 0,10	Сильностойкие
2	0,10–1,00	Стойкие
3	1,10–3,00	Пониженностойкие
4	3,10–10,0	Малостойкие
5	Более 10,0	Нестойкие



Кроме глубины проникновения, оценку коррозионной стойкости можно проводить по десятибалльной шкале потери массы образца за определенный период времени на единицу площади

Балл коррозионной стойкости	Категория стойкости	Потеря массы K ,	
		Черные металлы	Медь и сплавы
1	Совершенно стойкие	$< 0,009$	$< 0,001$
2	Весьма стойкие	$0,0009 - 0,0045$	$0,001 - 0,0051$
3	То же	$(> 0,0045) - 0,009$	$(> 0,0051) - 0,01$
4	Стойкие	$0,009 - 0,045$	$0,01 - 0,051$
5	То же	$(> 0,045) - 0,09$	$(> 0,051) - 0,1$
6	Пониженно стойкие	$(> 0,09) - 0,45$	$(> 0,1) - 0,5$
7	То же	$(> 0,45) - 0,9$	$(> 0,5) - 1,02$
8	Малостойкие	$(> 0,9) - 4,5$	$(> 1,02) - 5,1$
9	То же	$(> 4,5) - 9,1$	$(> 5,1) - 10,2$

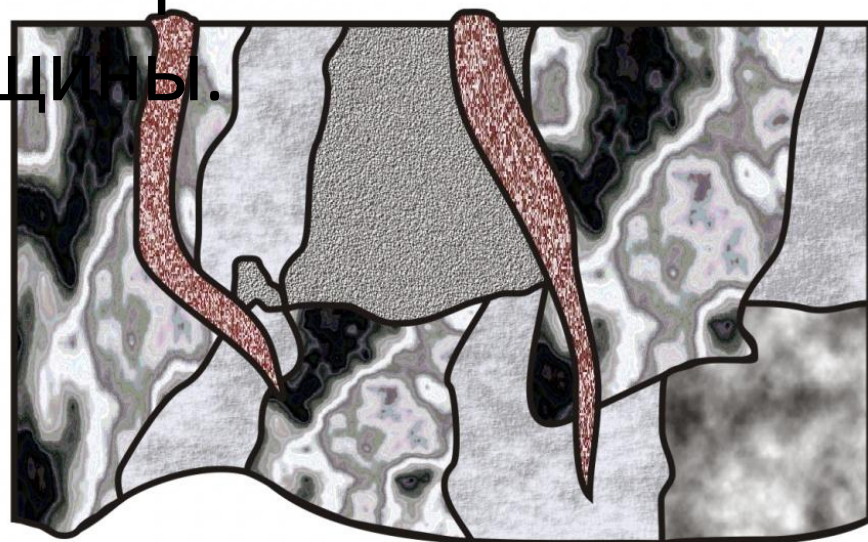
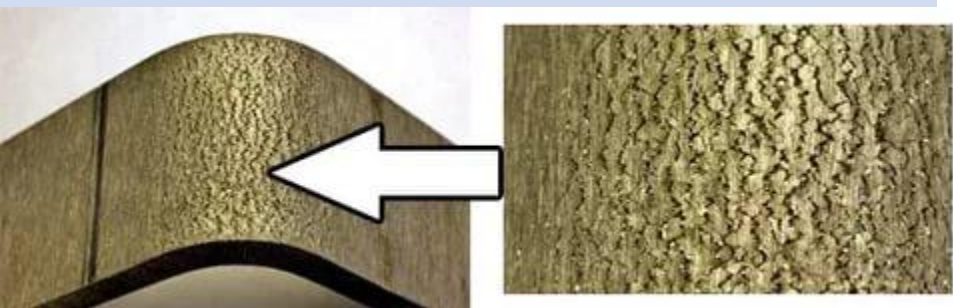
МКК



- Испытания на межкристаллитную коррозию (ГОСТ 6032-84). Основной причиной межкристаллитной коррозии коррозионно-стойких материалов является нагрев при обработке давлением или сварке, приводящий к электрохимической гетерогенности между приграничными участками и объемом зерен.

коррозионное растрескивание

- Испытания могут проводиться либо в условиях, вызывающих разрушение материалов (испытания на растяжение, на вязкость разрушения и усталость), либо путем определения времени появления первой трещины.



Коррозионное растрескивание

Методы защиты от коррозии можно объединить в следующие группы:

- 1) нанесение защитных покрытий и пленок;



Внешняя
поверхность продуктов
коррозии (РЭМ); x25.

- 2) изменение электрохимического потенциала защищаемого материала по отношению к среде на границе фаз;



- 3) модификация коррозионной среды.

Скорости процессов определяют долговечность материала в изделии

- скорость коррозии

- $v_{\text{кор}} = dn/dt$

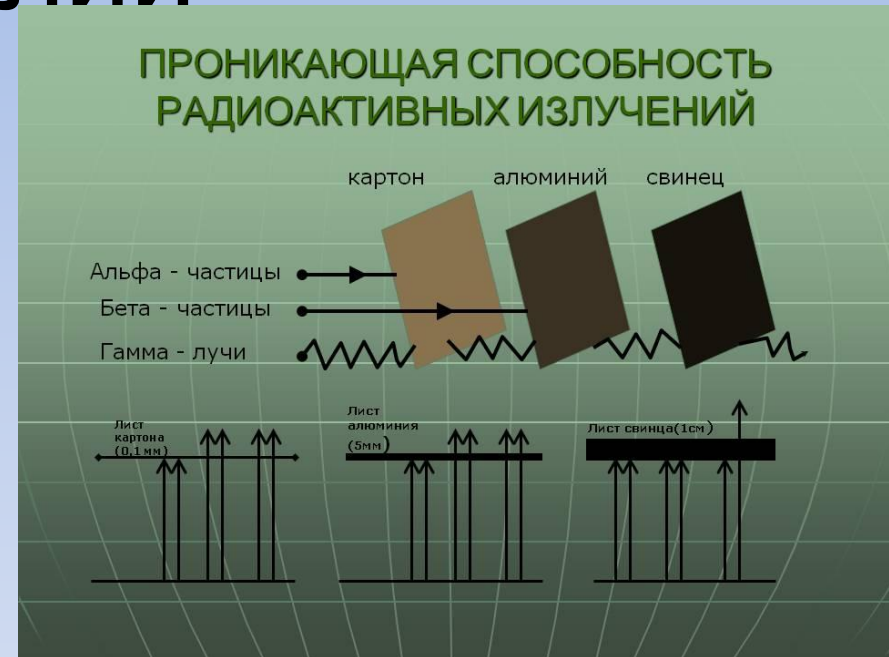
- (dn - толщина,

- dt - время);

- скорость радиационного разбухания

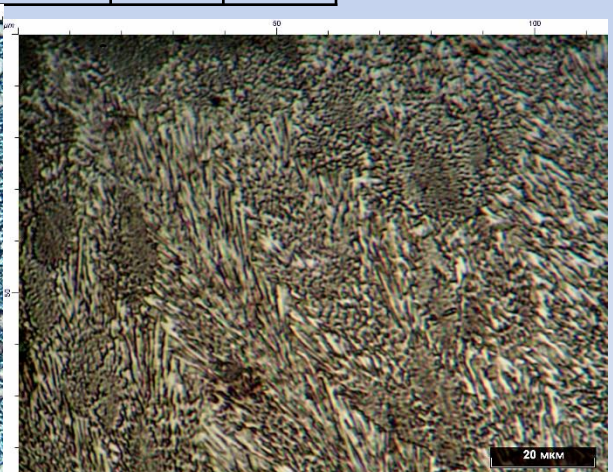
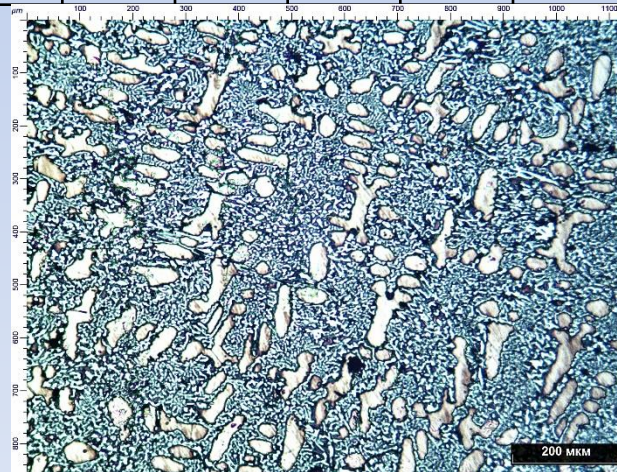
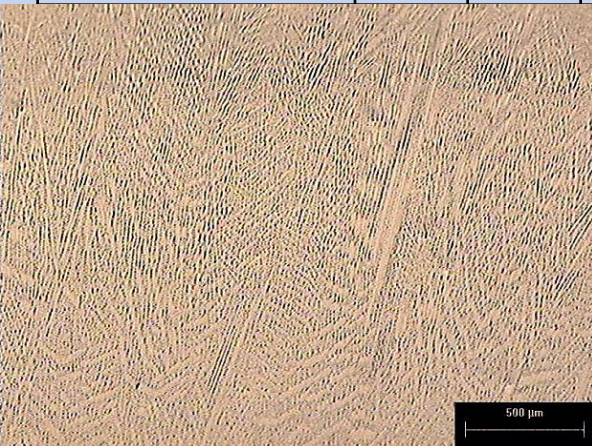
- $v_p = dn/dt$

- (dn - толщина, dt - время).



Химический состав наплавочных порошков

Наименование наплавочного порошка	Fe	Ni	C	Si	Mn	W	Mo	V	Cr	Al	B
Nistelle C (Delloro Stellite Ltd. Германия)	5,5	Осн.	0,12	0,9	0,9	4,5	17,5	-	16,4	-	-
Сормайт (Полема, Россия)	Осн.	-	2,9	1,88	0,73	-	-	-	24,1	0,7	2,3
PLASMOTEC 19 (ПТ, Россия)	Осн.	-	3,1	0,8	0,8	-	-	3,91	19,3	0,74	-





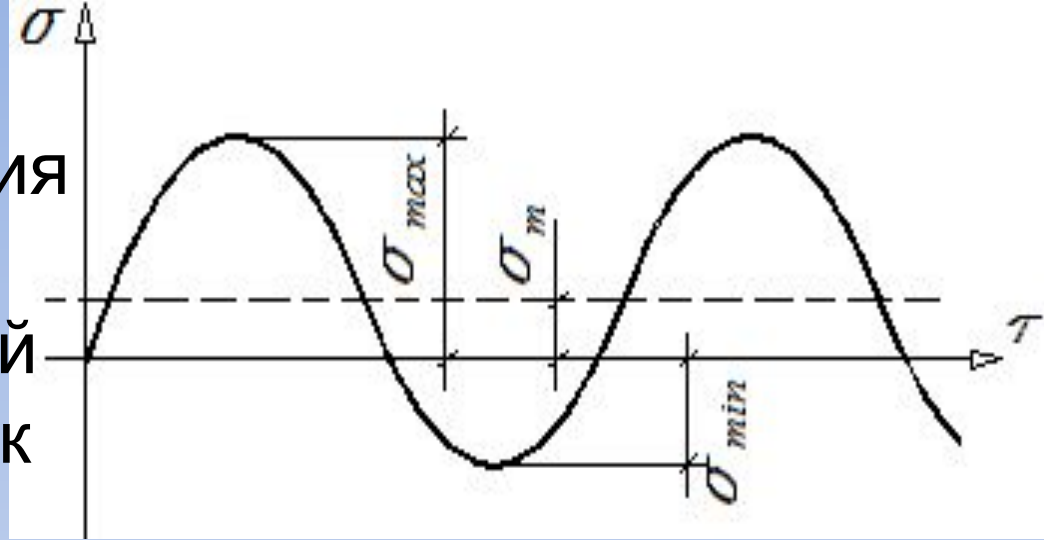
Долговечность



Для большинства деталей машин на 80% долговечность определяется сопротивлением материалов **усталостным разрушениям** (циклической долговечностью, характеризующей работоспособность материала в условиях многократно повторяющихся циклов напряжений) или сопротивлением **изнашиванию**



Усталость – процесс постепенного накопления повреждений под действием циклической нагрузки, приводящий к уменьшению срока



• При длительных знакопеременных нагрузках используют критерий **циклической прочности**.

• Характеристики циклов:

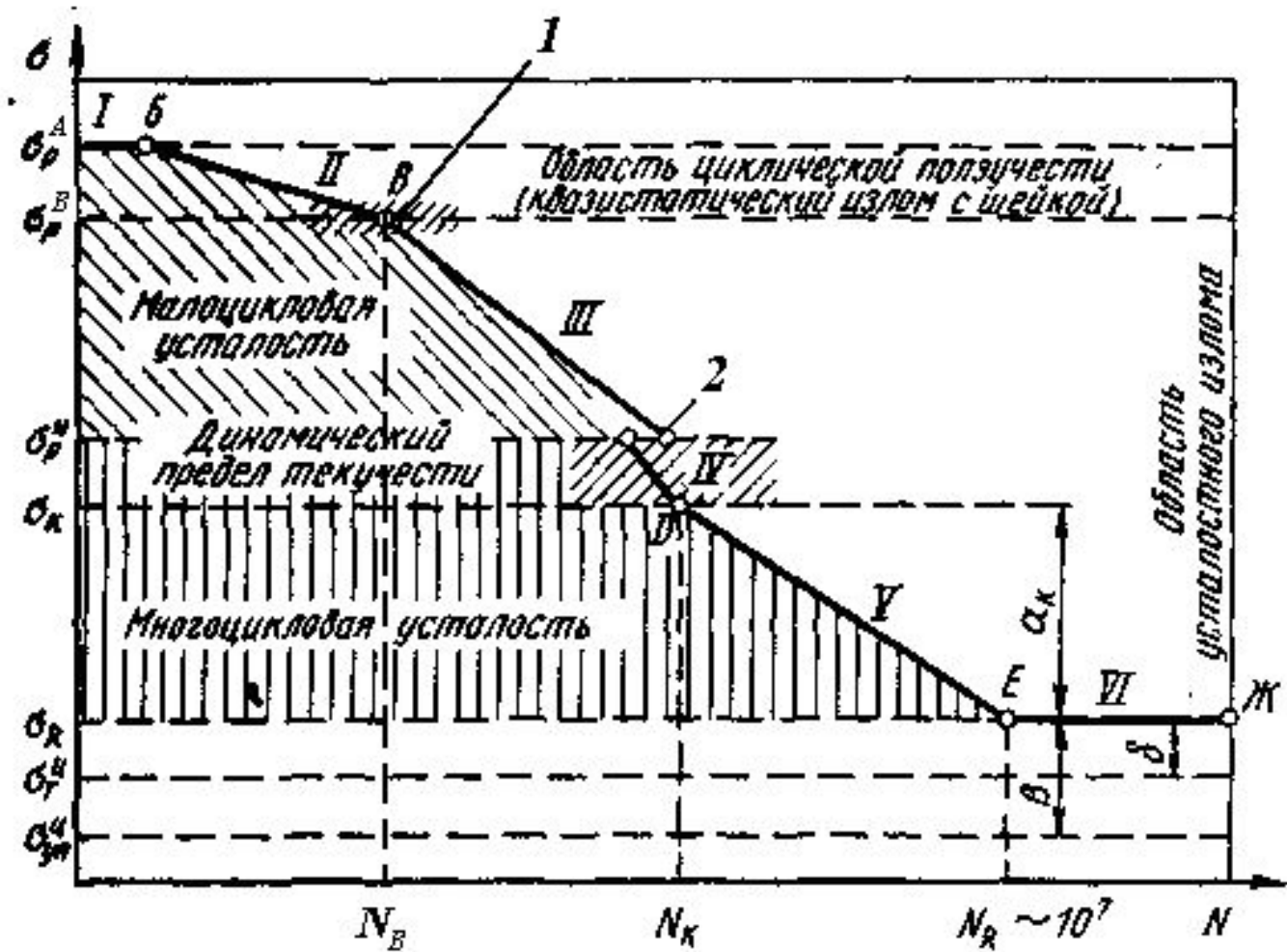
• – σ_{min} минимальное напряжение цикла;

• – $\sigma_m = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{max}}{2}$ среднее напряжение цикла;

• – $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ коэффициент асимметрии.

если $R = -1$, цикл симметричный

Для оценки сопротивления усталости испытывают серию образцов (10-15 шт.) при разных нагружениях N . В результате испытаний получают диаграмму усталости, представляющую собой зависимость напряжения от числа циклов нагружения N (в логарифмической оси, т.к. число циклов нагружения значительное)



- При испытаниях на усталость чем выше максимальное напряжение, тем меньше число повторных нагружений N до разрушения образца, т.е. тем меньше его выносливость. При снижении напряжения кривая усталости в большинстве случаев переходит в горизонтальное положение. Следовательно, существует некоторое напряжение – ***предел выносливости***, ниже которого образец может выдерживать неограниченное число циклов нагружения.

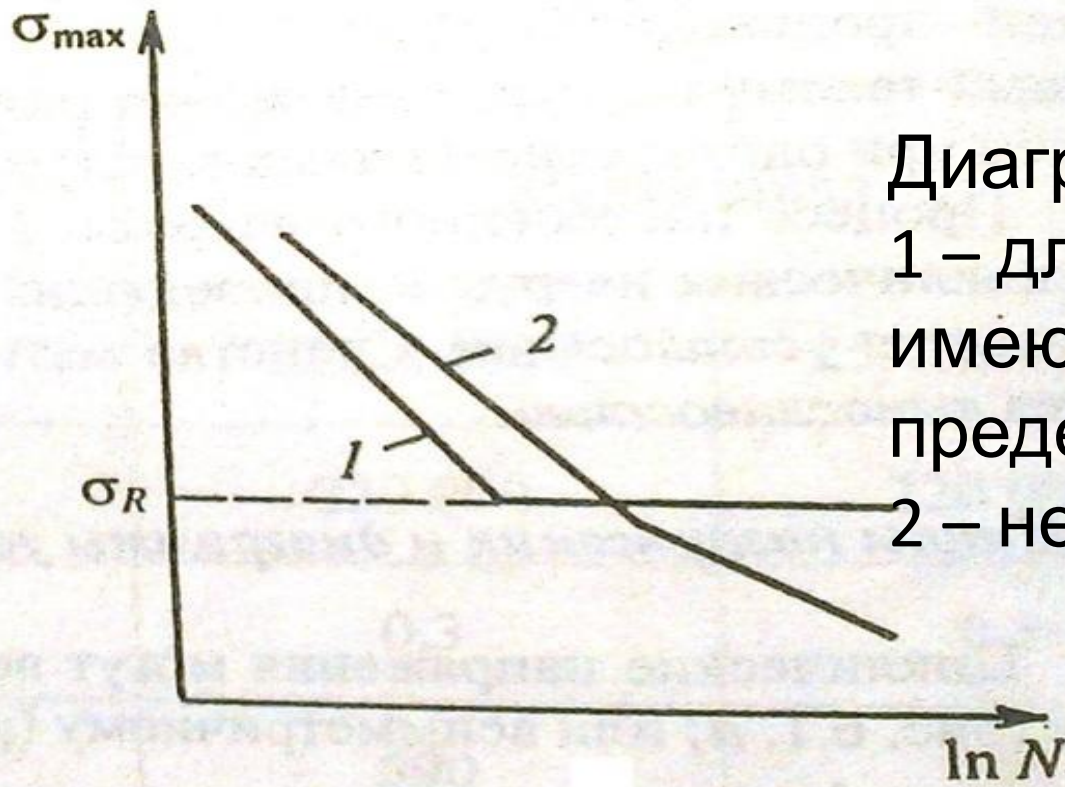
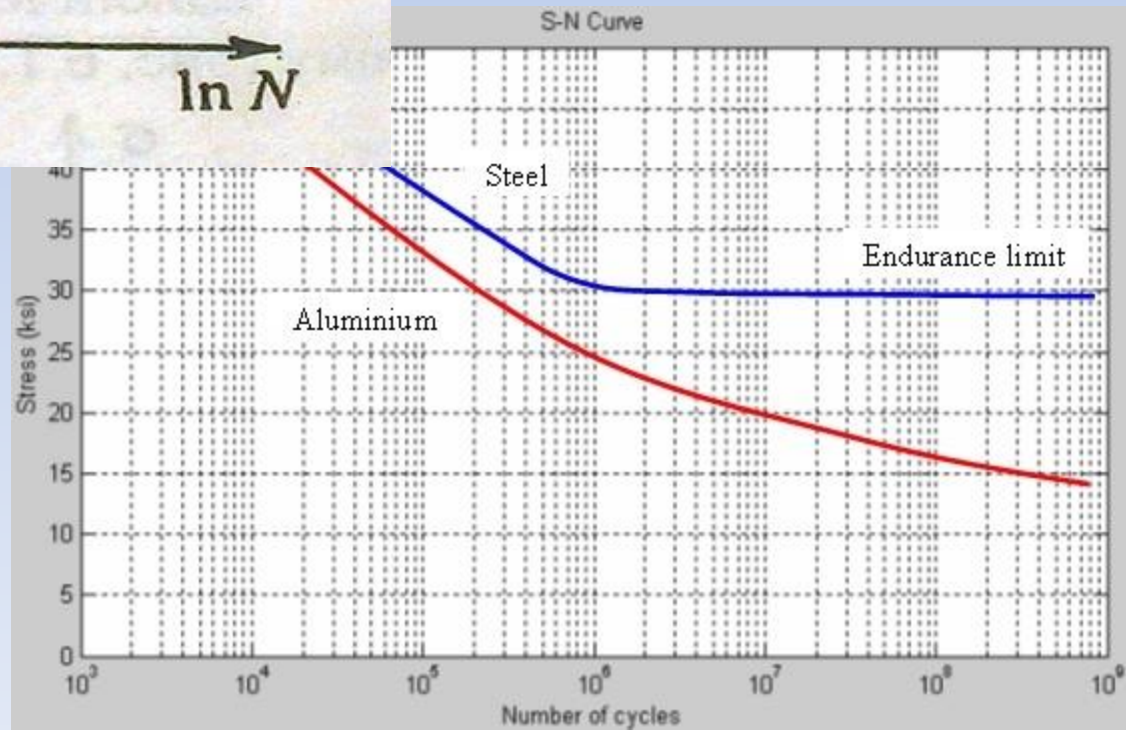
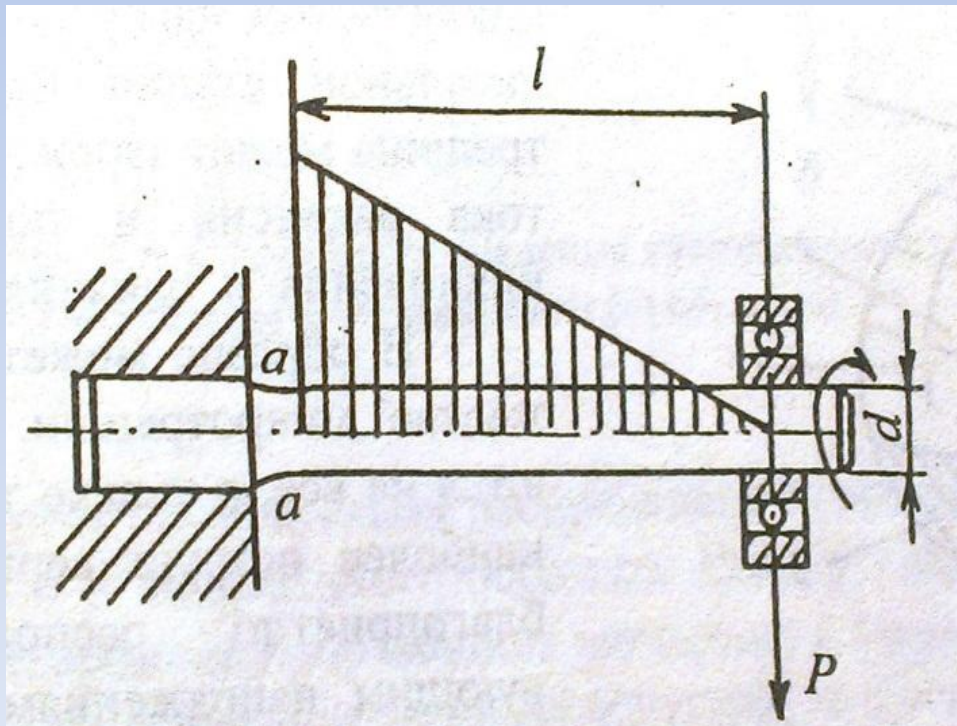


Диаграмма усталости:
 1 – для материалов, имеющих физический предел выносливости;
 2 – не имеющих.



Циклические испытания материалов на усталость можно осуществлять при различных видах нагружения. Наиболее часто выполняют в условиях изгиба образца в одной плоскости или изгиба вращающегося образца при симметричном цикле нагружения



$$\sigma_{\max} = Pl / W = 32 Pl / (\pi d^3)$$

где P – вертикальная нагрузка;

l и d – плечо и диаметр сечения образца;

W – момент сопротивления изгибу сечения образца.

Схема испытания на круговой изгиб консольно закреплённого образца.

Разрушение начинается постепенно и включает несколько стадий:

-Формирование повреждений.

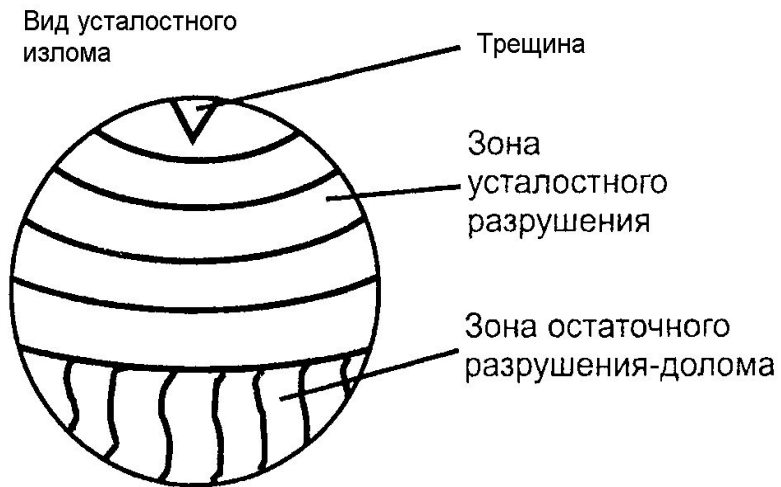
-Образование микротрещин.

-Слияние микротрещин в одну или несколько.

-Развитие трещины.

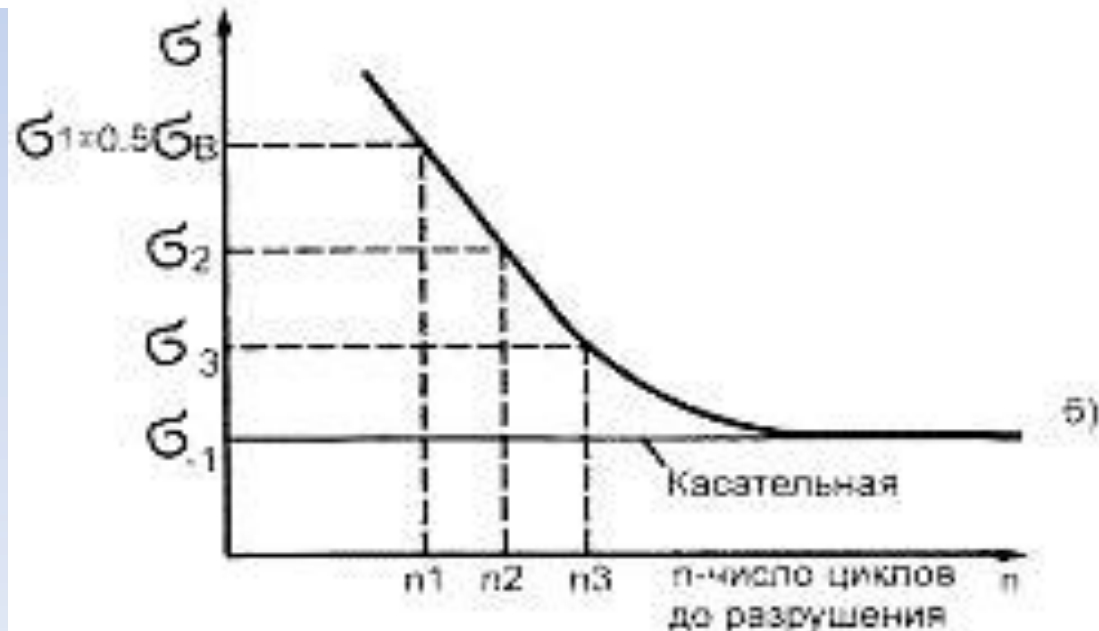
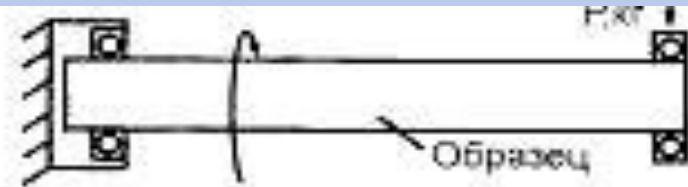
-Окончательное разрушение – долом.

Такая стадийность процесса определяет специфическое строение усталостного излома:

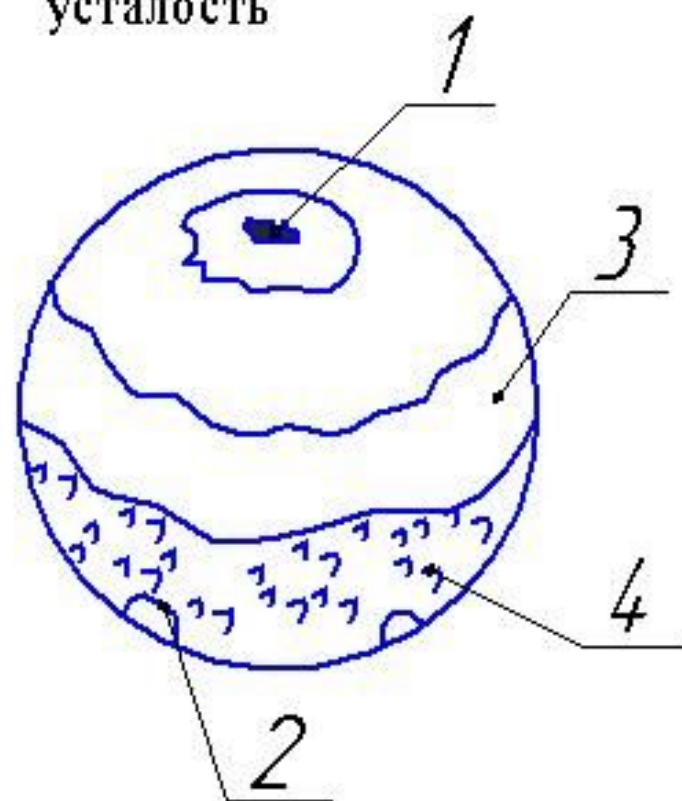


ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ
СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР
СВЕРДЛОВСКОЕ ФИЛИАЛ ВЕЩНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОГО
ИНСТИТУТА МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. MENDELEEVA (СФ ВНИИМ)

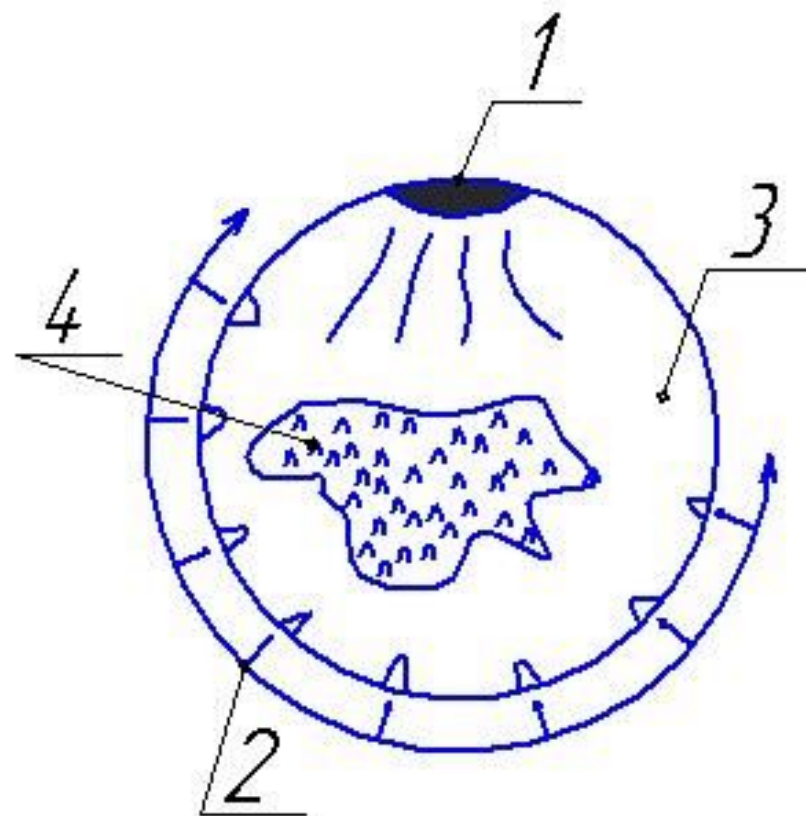
МЕТОДИКА
ПОВЕРКИ МАШИН
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ НА УСТАЛОСТЬ
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ
МИ 73-75



механическая
усталость






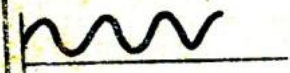




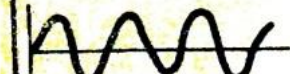
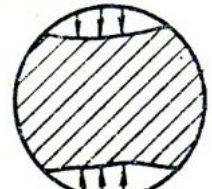




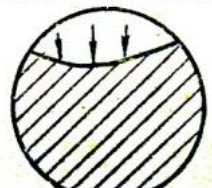





термоусталость



1 - первичный очаг разрушения, 2 - вторичные очаги, 3 - зона развирия усталости, 4 - зона долома.

Схемы усталостных изломов при различных видах нагружения:

Вид нагрузки	Высокое номинальное напряжение		Низкое номинальное напряжение	
	Гладкий образец	Образец с надрезом	Гладкий образец	Образец с надрезом
I – осевая нагрузка 				
II – односторонний плоский изгиб 				
III – двухсторонний плоский изгиб 				
IV – изгиб вращающегося образца 				

Боковая рама тележки грузового
железнодорожного вагона



Ось
электровоза



ИЗНОС



Физический износ

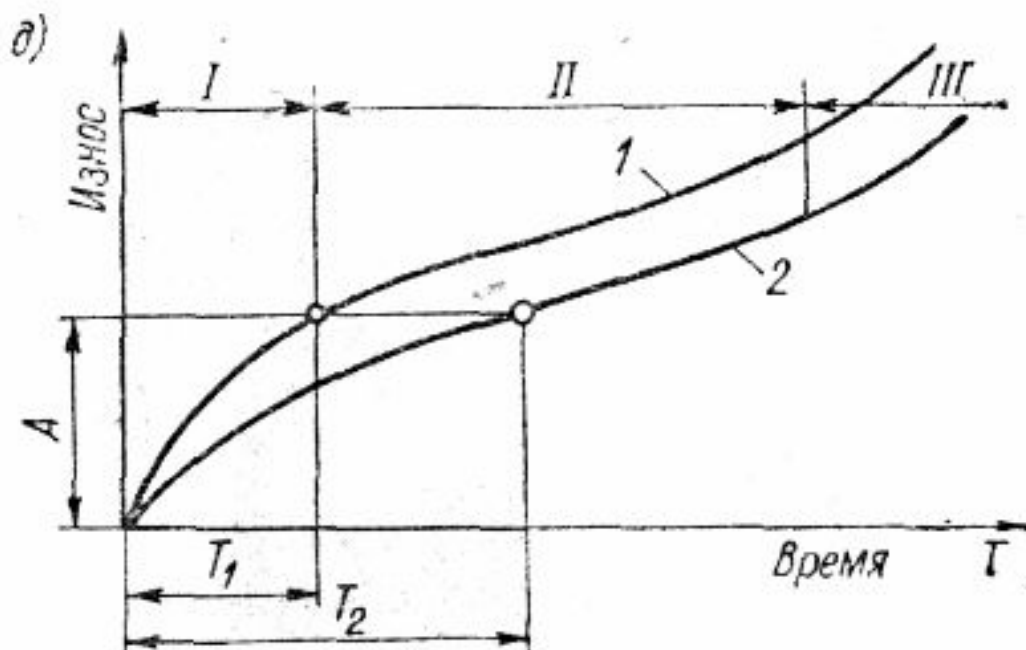
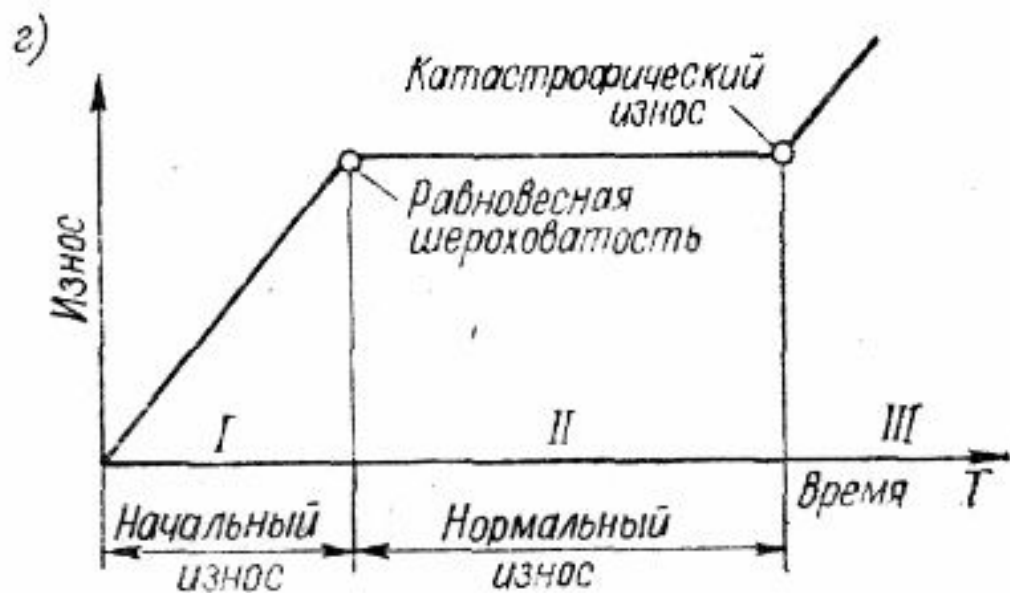
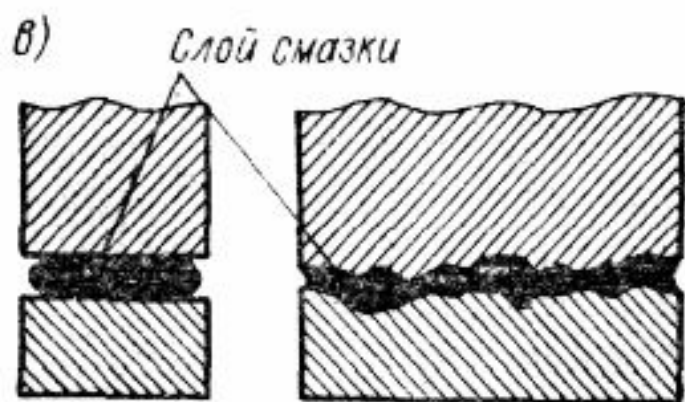
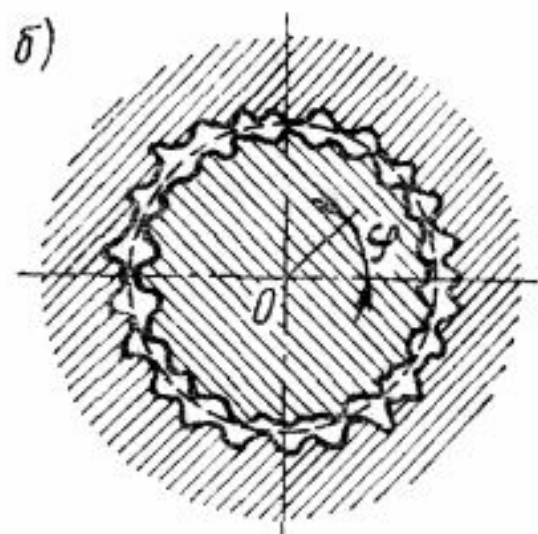
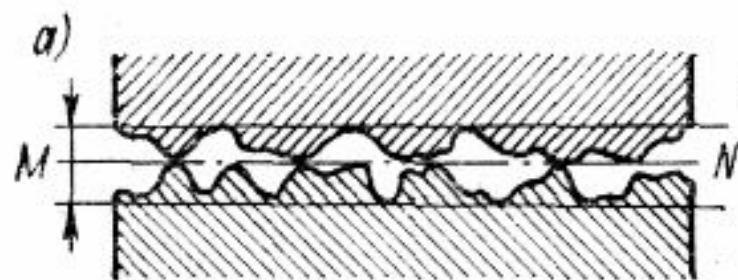
Потеря потребительной стоимости вследствие физического разрушения

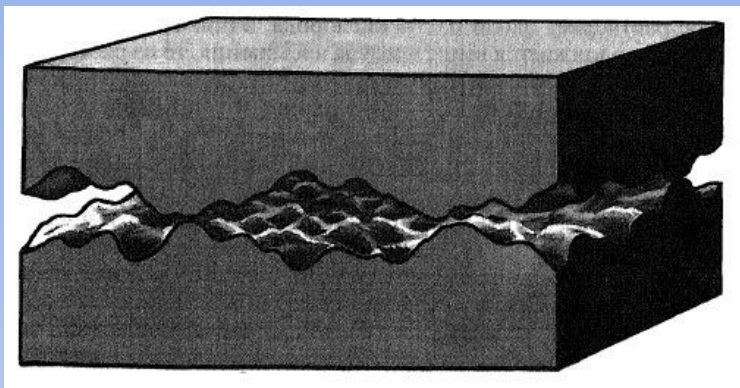


Моральный износ

Потеря части стоимости по причине:

- а) создание аналогичных, но более дешевых средств труда;**
- б) выпуска более производительных средств труда (при той же цене)**





Фактическая площадь контакта $A_r \sim (0,0001 \dots 0,1)A_a$ даже при высоких нагрузках A_r не превышает 40 % от A_a

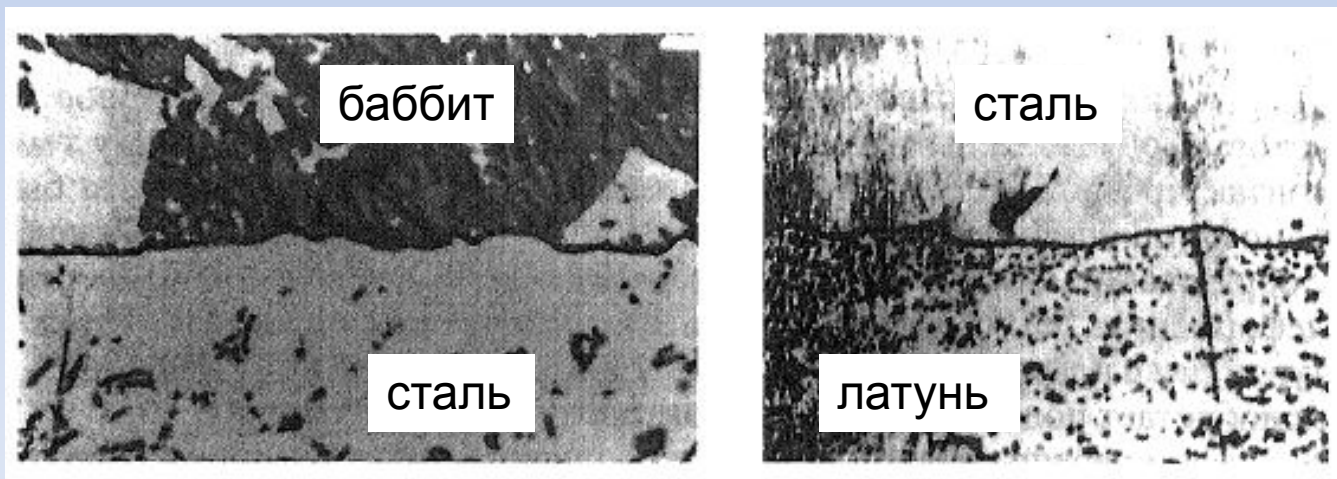
Сталь по стали при нагрузке 15 МПа:

$R_a = 0,63 \dots 0,32$ мкм $A_r/A_a = 0,35$;

$R_a = 2,5 \dots 1,25$ мкм $A_r/A_a = 0,2$.

Фактическая площадь контакта возрастает с ростом нагрузки, снижением шероховатости, увеличением длительности действия нагрузки; уменьшается с увеличением жесткости и предела текучести материала, высоты неровности поверхности.

Взаимное внедрение поверхностей



$P = 3000$ кПа

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

характеристика
сопротивления материала
разрушению поверхности
путем отделения его частиц
под воздействием
трения

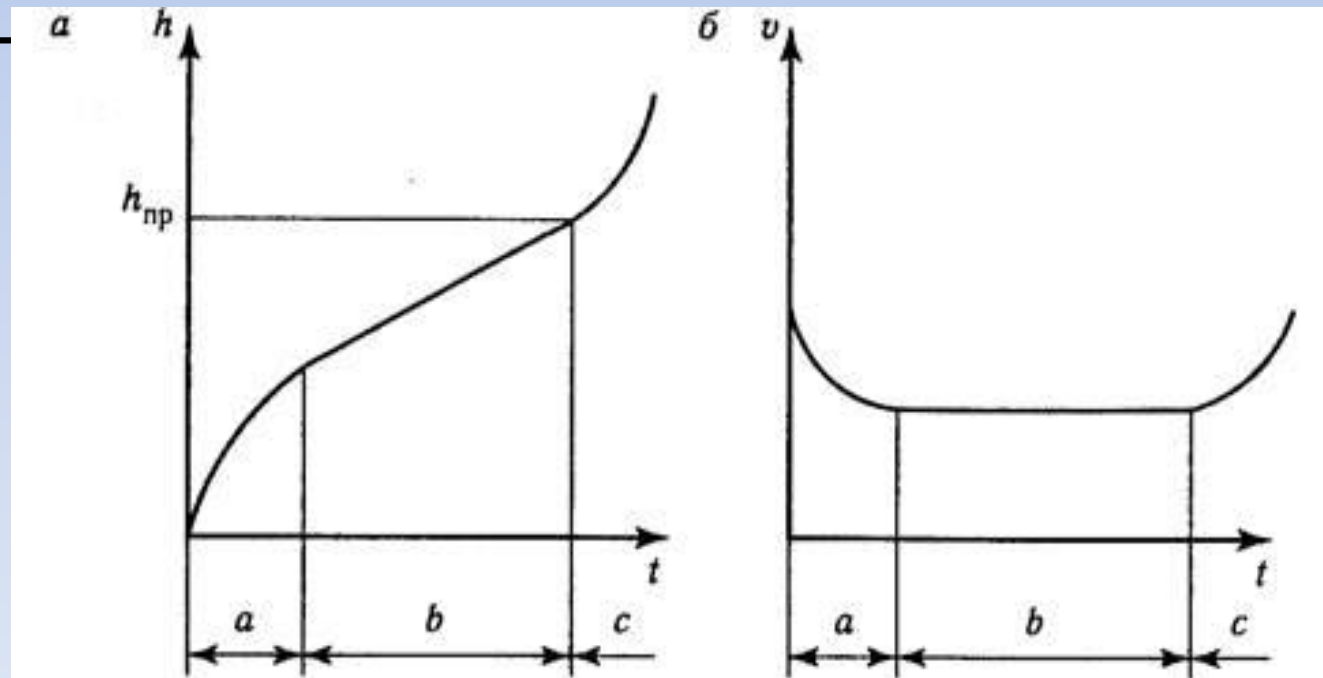
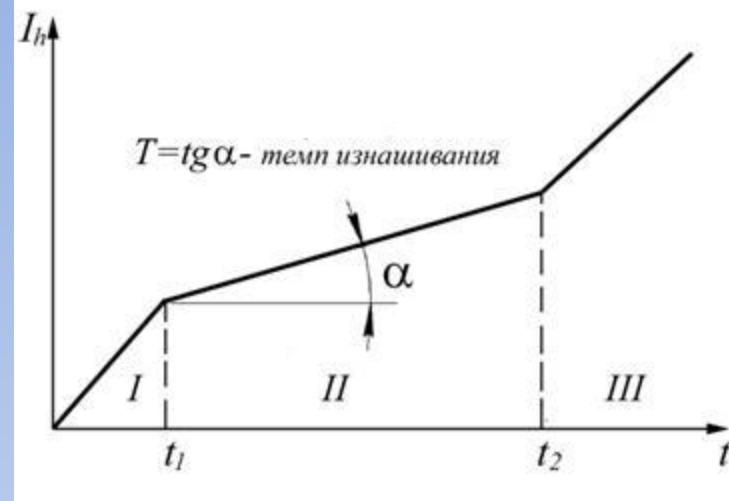
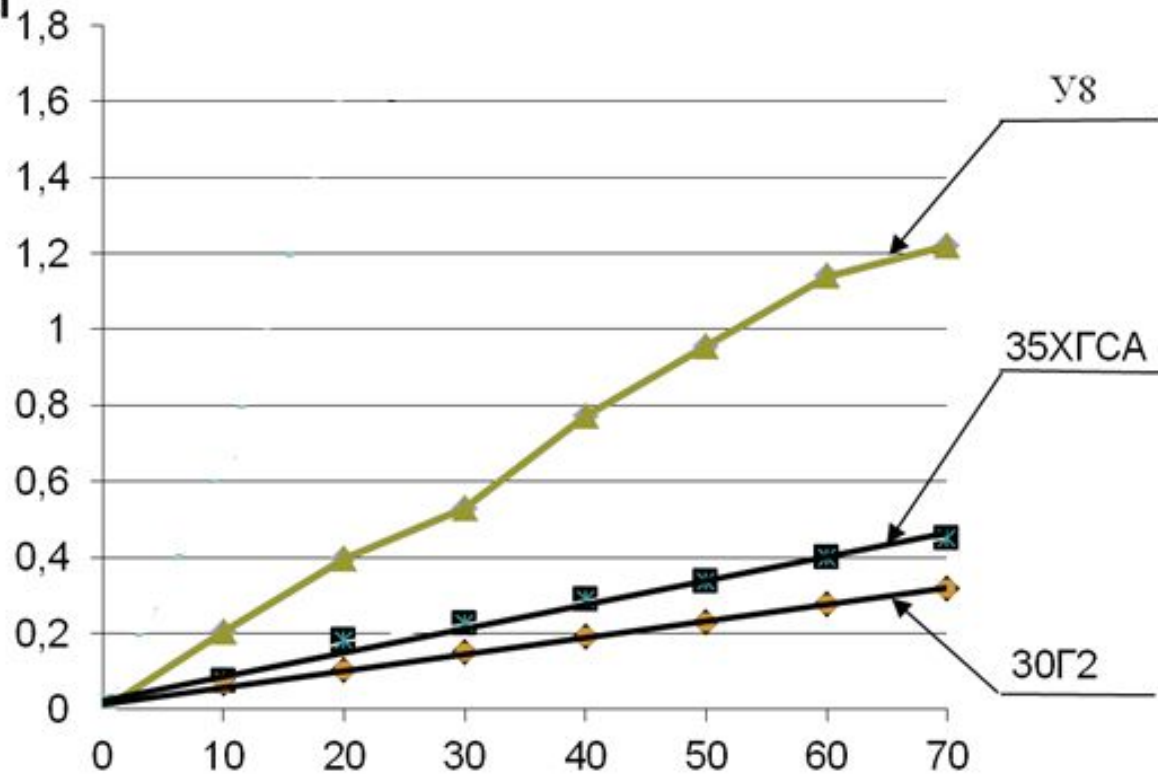


Рис. 1.13. Графики интенсивности (а) и скорости (б) изнашивания деталей

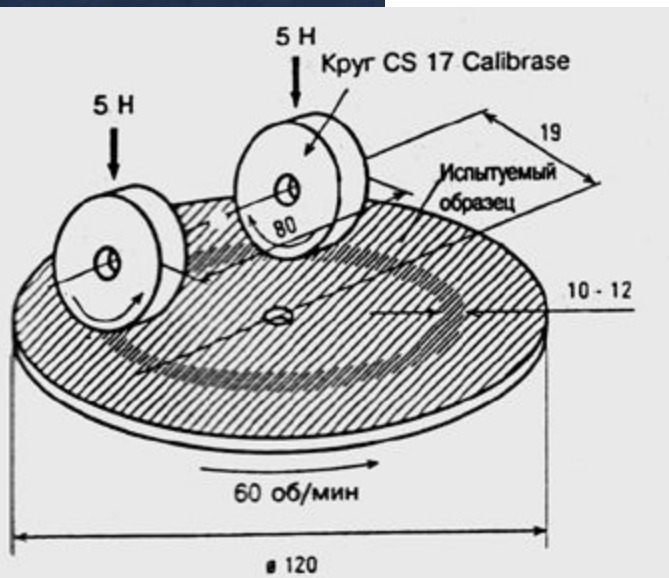
Твердость и относительная износостойкость по абразивному
полотну различных материалов

Материал	Твердость, МПа	Относительная износостойкость
Карбид вольфрама	22900	193,3
Твердые сплавы:		
ВК6	19500	80,2
ВК8	15100	70,6
ВК15	11100	61,8
Сталь 10X18H9ТЛ	2200	29,2
Чугун СЧ21	1940	0,95
Кобальт	1450	20,1
Бронза	1400	13,8
Фторопласт-4	34	0,9

Потеря массы
образца, г



Время опыта, мин



Различают следующие виды изнашивания при трении деталей машин: механическое, абразивное, гидроабразивное, газоабразивное, эрозионное, усталостное, кавитационное, изнашивание при заедании, коррозионно-механическое.

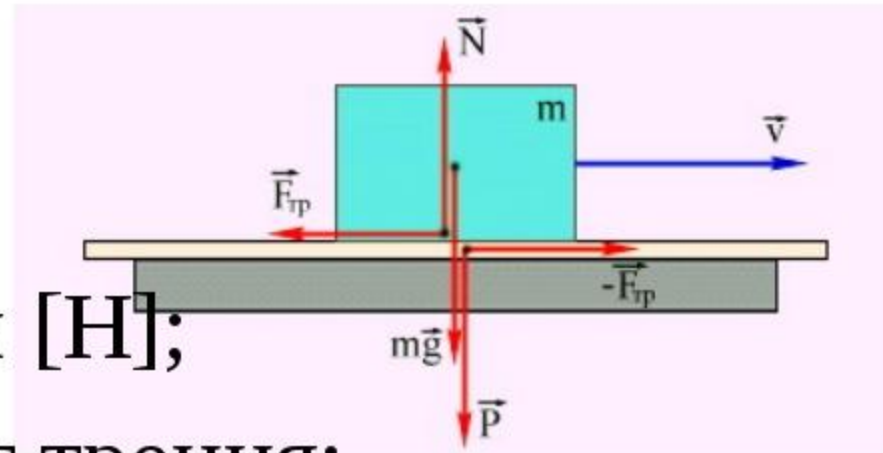
Коэффициент трения

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N,$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения [Н];

μ – коэффициент трения;

N – сила нормального давления.



Коэффициент трения μ - величина безразмерная.

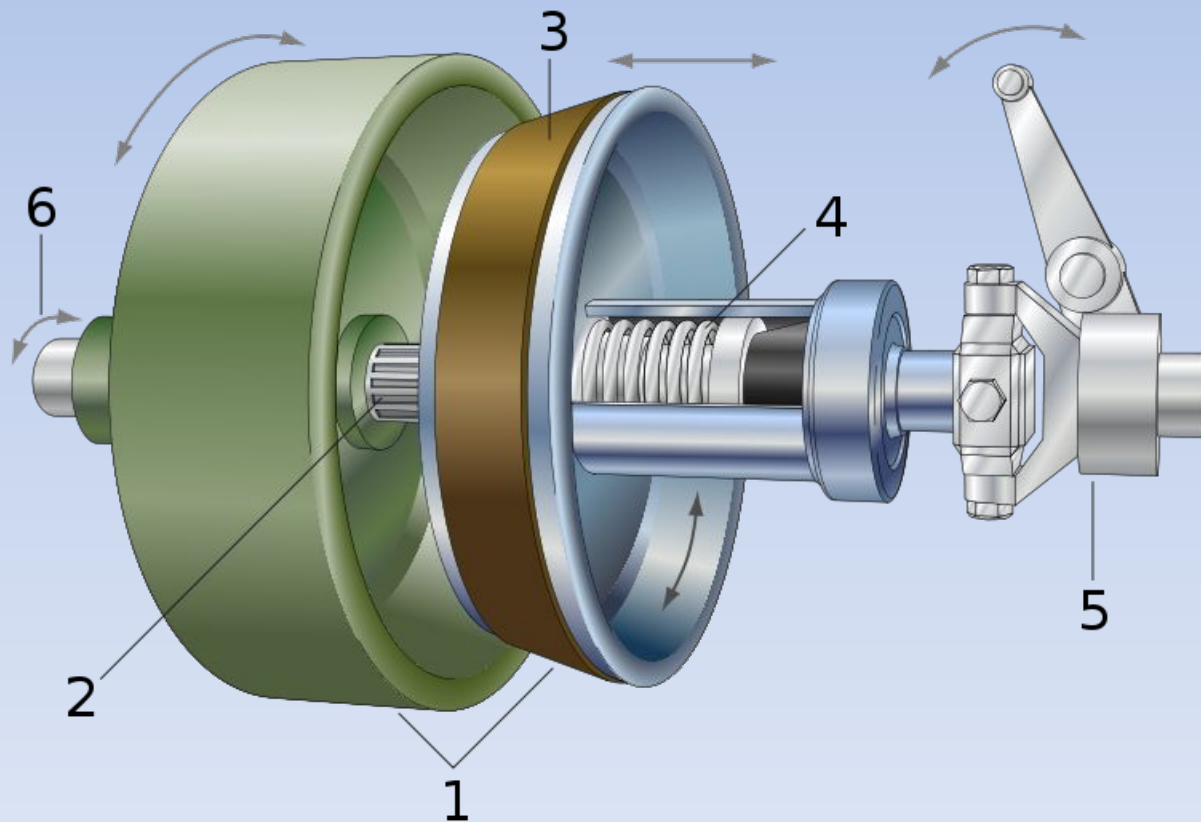
Зависит от:

- 1) рода трущихся материалов;
- 2) обработки поверхностей тел.

триботехнические

- Антифрикционные

Фрикционные



Стоимость материала может быть определена, как свойство, оценивающее экономичность материала

- количественной характеристикой (оптовая цена), где оптовая цена - стоимость единицы массы материала, по которой производитель рекомендует его потребителю.
-
-
- **Обобщенный критерий эффективности** может быть оценен:
- σ_T - предел текучести;
- $P = (\sigma_T * k) / (\gamma * C)$, k - коэффициент, характеризующий технологичность;
- γ - плотность материала;
- C - цена.

ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ

- — это совокупность свойств, проявляемых в возможности оптимальных (наивыгоднейших технико-экономических) затрат труда и времени при изготовлении, эксплуатации и ремонте.

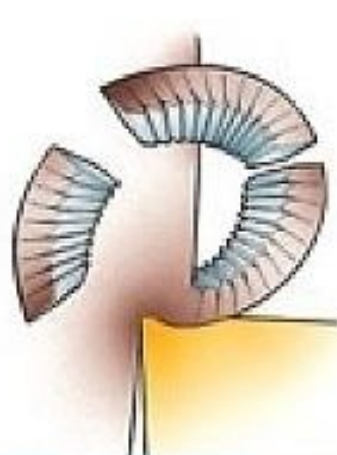


Технологические свойства.

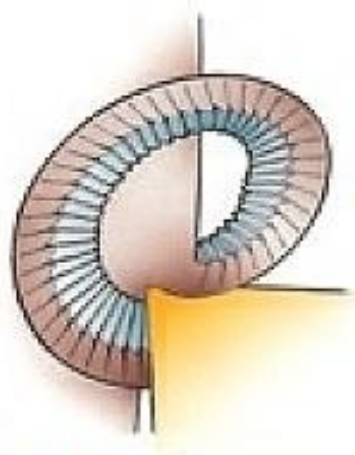
Определяют пригодность материала для изготовления деталей машин требуемого качества с минимальными трудозатратами.

Технологичность оценивают возможными методами обработки:

- Обрабатываемость резанием, давлением;
- Способность литься, свариваться, ...;
- Поведением при термообработке:
 - закаливаемость;
 - прокаливаемость;
 - отсутствие закалочных деформаций и коробления.



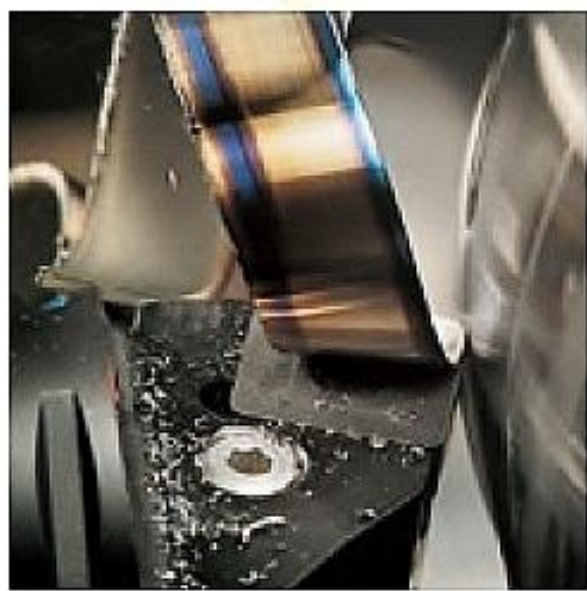
а



б



в



Стружка ломается в процессе резания сама (А), от соприкосновения с инструментом (В) или от соприкосновения с деталью (С).

- Наиболее распространенной является оценка **обрабатываемости** материала *по производительности*. Критерием является скорость резания, при которой достигается заранее заданная стойкость инструмента. Используют критерий v_{60} — это скорость резания, при которой достигается 60-минутная стойкость режущего инструмента до регламентируемого износа, м/мин. Критерий v_{60} является абсолютным показателем обрабатываемости. За эталон часто принимается сталь 45 с

Деление в отношении обрабатываемости резанием

Все обрабатываемые материалы группируются определенным образом, и в соответствии с принадлежностью к той или иной группе осуществляется выбор геометрии режущего инструмента, марки сплава и режимов резания.

- Обрабатываемые материалы **подразделяют, в соответствии со стандартом ISO, на шесть основных групп**

Группы обрабатываемых материалов по ИСО

Условное
обозначени
е

Обрабатываемый материал

P

Сталь (кроме нержавеющей и закалённой)

M

Нержавеющая сталь

K

Чугун

N

Цветные сплавы

S

Жаропрочные сплавы

H

Сплавы высокой твёрдости,
в т. ч. закалённая сталь

  <p>Сталь</p>	  <p>Нержавеющая сталь</p>	  <p>Чугун</p>
  <p>Алюминий</p>	  <p>Жаропрочные сплавы</p>	  <p>Закалённая сталь</p>

ISO P – Как правило, материалы данной группы имеют хорошую обрабатываемость, но это зависит от твёрдости стали и процентного содержания в ней углерода.

ISO M – Характерной особенностью для обработки всех этих сталей является интенсивный термический износ режущих кромок, износ в виде образования наростообразования.

ISO K – В состав любого чугуна входит карбид кремния (SiC), что определяет абразивный характер износа режущей кромки.

ISO N – В общем цветные металлы обрабатывают инструментом с острыми режущими кромками с высокой скоростью резания и продолжительным периодом стойкости.

ISO S – Все они достаточно вязкие, поэтому их обработка сопровождается наростообразованием на инструменте и выделением большого количества тепла, к тому же для них характерно упрочнение в процессе резания.

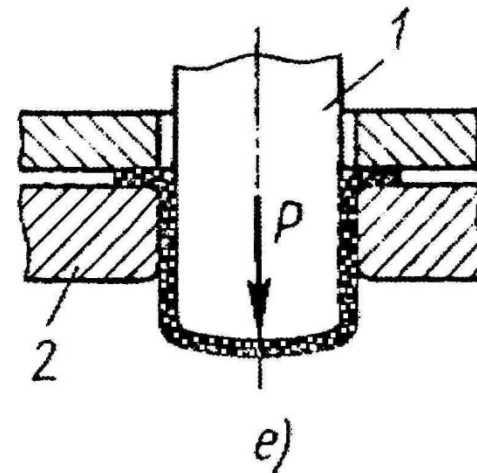
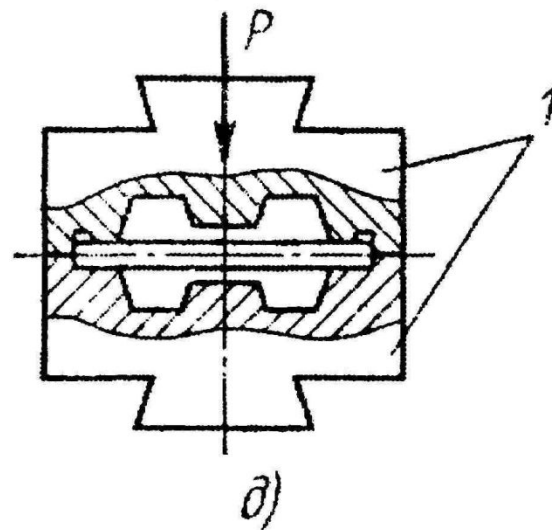
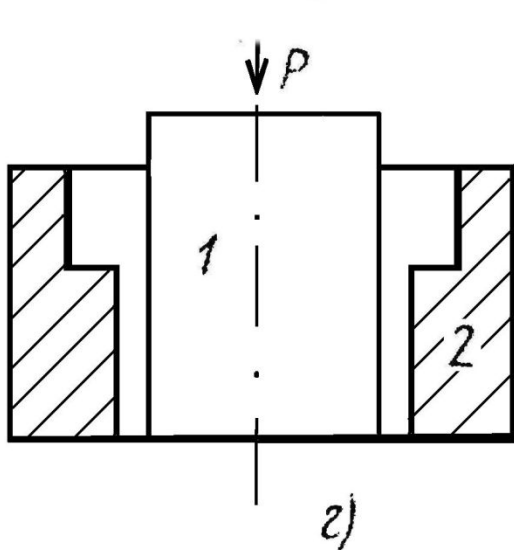
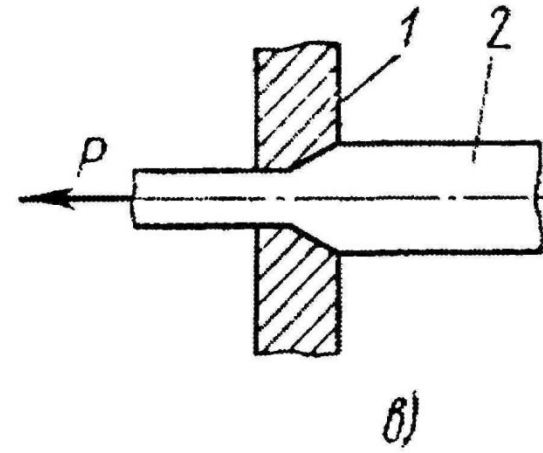
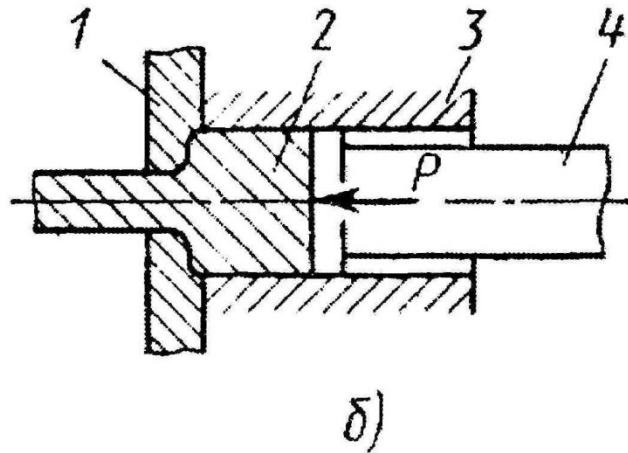
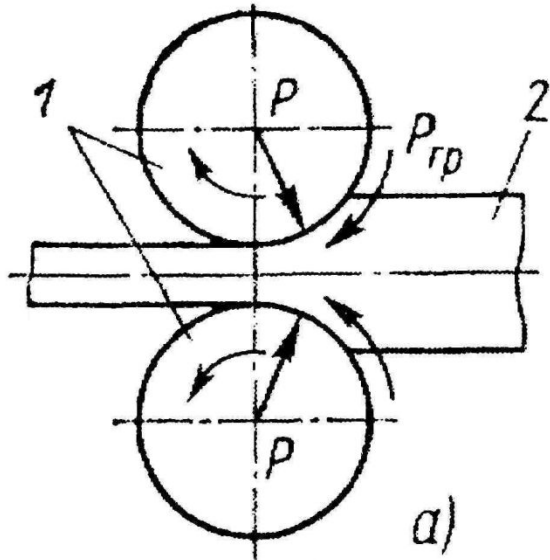
ISO H – Высокое значение твёрдости делает их трудно поддающимися обработке.

Группа по ISO	ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛА	МАРКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ПО ГОСТ
P	Углеродистые стали	
	C= 0,1 - 0,25 %	Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, 05кп, 08кп, 08пс, 08, 10пс, 10, 15кп, 15пс, 15, 20кп, 20пс, 20, 25, 15Г, 20Г, 25Г, 10Г2, 09Г2, 09Г2С, А11, А12, А20, АС14, 14Г2АФ, 18Г2АФ, 10ХСНД, 15ХСНД, электротехнические: Э12, Э10, Э8
	C= 0,25 - 0,55 %	Ст4, Ст5, Ст6, 30, 35, 30Г, 40, 45, 40Г, 45Г, 47ГТ, 50, А30, А35, А40, А40Г, А35Е, А45Е, АС40, АС35Г2, АС40Г2
	C= 0,55 - 0,8 %	55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 60Г, 65Г, 70Г, У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А, 80С
	Легированные стали	
		15Х, 20Х, 18ХГ, 15ХФ, 20ХФ, 12ГН2МФАЮ, 20ХН, 12ХН2, 12ХН3А, 20ХН3А, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А, 14Х2Н3МА, 18Х2Н4МА, 20ХН2М, 15Н2М, 20Н2М 15ХМ, 20ХМ, 18ХГТ, 25ХГТ, 25ХГМ, 30ХГТ, 20ХГР, 27ХГР, 20ХНР, 20ХГНР, 15ХГН2ТА, 20ХГНТР, 15Х2ГН2ТА, 30Г2, 35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2, 30Х, 35Х, 38ХА, 40Х, 45Х, 50Х, 30ХРА, 33ХС, 38ХС, 40ХС, 20ХГСА, 25ХГСА, 30ХГСА, 35ХГСА, 30ХМА, 35ХМ, 38ХМ, 40ХФА, 40ХГТР, 40ХН, 45ХН, 50ХН, 30ХН3А, 38ХГН, 30ХГСН2А, 30ХН2МА, 38Х2Н2МА, 40ХН2МА, 40Х2Н2МА, 25Х2Н4МА, 20ХН4ФА, 45ХН2МФА, 20Х3ВМФ, 30Х3МФ, 38ХН3МФА, 36Х2Н2МФА, 34ХН1МА, АС12ХН, АС12ХН, АС14ХГН, АС19ХГН, АС20ХГНМ, АС30ХМ, АС38ХГМ, АС40ХГНМ, 55С2А, 60С2А, 70С3А, 50ХГА, 55ХГР, 50ХФА, 50ХГФА, 60С2ХА, 70С2ХА, 60С2ХФА, 65С2ВА, 60С2Н2А
	подшипниковые	ШХ4, ШХ15, ШХ15ГС, ШХ4РП
	электротехнические	Э310-Э360(3411-3425), 2011-2412
	Высоколегированные и инструментальные стали	
	после отжига	Х12М, Х6ВФ, 7ХГ2ВМ, 6Х6В3МФС, 5ХНМ, 5ХНВ, 4Х3ВМФ, 4Х5В2ФС, 3Х2В8Ф, 11ХФ, 13Х, ХВГ
с повышенной твердостью	ХСВГ, 9ХС, Х, В2Ф, Р18, Р9, Р6М5, Р18К5Ф2, Р9К5, Р6М5К5, Р2АМ9К5, 11Р3АМ3Ф2, Р12Ф3	
Стальное литье		
нелегированное	15Л, 20Л, 25Л, 30Л, 35Л, 40Л, 45Л, 50Л, 55Л, У8Л,	
низколегированное, до 5%	20ГЛ, 35ГЛ, 30ГСЛ, 20ГФЛ, 30ХГСФЛ, 45ФЛ, 30ХНМЛ, 23ХГС2МФЛ, 20Х5МЛ	

M	<p align="center">Нержавеющие стали</p> <p>Ферритная/мартенситная</p> <p>теплостойкие и мартенситно стареющие</p> <p>Аустенитная</p> <p>Аустенитная, литевая</p>	<p>08X13, 12X13, 20X13, 30X13, 40X13, 14X17H2, 12X17, 15X25T, 40X9C2Л, 95X18</p> <p>11X11H2B2MФ, Х5Н12К3М7Т, Н18К9М5Т, Н12К8М4Г2, Н10Х11М2Т, Н9Х12Д2ТБ, 30Х9Н8М4Г2С2, 25Н25М4Г1(TRIP или ПНП), 04Х11Н9М2Д2ТЮ (ЭП832), 03Н17К10В10МТ-ВД (ЭП836-ВД), 03Н18К9М5Т-ВД (ЭП637-ВД), ЧС4-ВИ, ЧС5-ВИ</p> <p>12Х18Н10Т, 17Х18Н9, 06Х18Н11, 10Х14АГ15, 10Х14Г14Н4Т (ЭИ711), 12Х17Г9АН4 (ЭИ878), 20Х13Н4Г9 (ЭИ100), 08Х10Н20Т2, 09Х16Н4Б (ЭП56)</p> <p>30Х24Н12СЛ, 40Х24Н12СЛ, 35Х23Н7СЛ, 12Х18Н9ТЛ, 10Х18Н11БЛ, 12Х18Н12М3ТЛ, 55Х18Г14С2ТЛ, 45Г13Н3ЮЛ, 15Х18Н22В6М2Л, 20Х21Н46В8Л, 31Х19Н9МВБТЛ, 10Х17Н10Г4МБЛ, 08Х17Н34В5Т3Ю2Л</p>
K	<p align="center">Чугуны</p> <p>Серый ферритного класса</p> <p>Серый перлитного класса</p> <p>Высокопрочный ферритного класса</p> <p>Высокопрочный перлитного класса</p> <p>Ковкий чугун</p>	<p>СЧ10, СЧ15, СЧ18, АЧС-3</p> <p>СЧ21, СЧ24, СЧ25, СЧ30, СЧ35, АЧС-1, АЧС-2</p> <p>ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45</p> <p>ВЧ50, ВЧ60 ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100</p> <p>Ферритный КЧ37-12, КЧ35-10, КЧ30-6, КЧ33-8, АЧК-1 Перлитный КЧ50-5, КЧ55-4</p>
N	<p align="center">Алюминиевые сплавы</p> <p>Алюминий чистый</p> <p>Деформируемые</p> <p>Литейные</p> <p>силумины Si ≥ 8%</p> <p align="center">Медь и сплавы на ее основе</p> <p>Латунь</p> <p>Бронза</p>	<p>А999-А95, А85, А7-А0, АД1, АД0</p> <p>Амц, Амг2, Амг3, Амг5, Амг6, АД31, Д1, Д16, АК4, АК6, АК8, В95</p> <p>АЛ3, АЛ5, АЛ32, АК52М, АЛ8, АЛ23, АЛ23-1, АЛ27, АЛ27-1, АЛ28, АЛ7, АЛ19, АЛ33, ВАЛ10, АЛ1, АЛ21, АЛ24</p> <p>АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ34</p> <p>ЛС59-1, ЛС60-1, ЛС64-2, ЛС74-3, ЛС63-3, ЛЖС58-1-1 (>1%Pb)</p> <p>Л96, Л90, Л85, Л70, Л68, Л63, Л60 (<1% Pb)</p> <p>БрОЦС4-4-4, БрО6Ц6С3 (>1%Pb), БрОФ6, БрАЖН10-4-4 (<1% Pb)</p>
S	<p align="center">Титановые сплавы</p> <p>Технически чистый титан</p> <p>альфа сплавы</p> <p>Сплавы альфа+бета</p> <p align="center">Жаропрочные сплавы</p> <p>на основе Fe</p> <p>на основе Ni</p> <p>на основе Co</p>	<p>BT1-00, BT1-0, BT1Л</p> <p>BT3-1, BT3-1Л, BT4, BT5, BT5-1, OT4</p> <p>BT6, BTC6, BT6Л, BT9Л, BT14, BT14Л, BT20, BT21Л</p> <p>ХН38ВТ (ЭИ703), ХН28МАБ (ЭП126), 36ХНТЮ (ЭИ702), ХН35ВТЮ (ЭИ787), ХН32Т, ЭП99</p> <p>ХН60В (ВЖ98, ЭИ868), ХН77ТЮ (ЭИ437), ХН72МВКЮ (ЭИ867), ХН60МВТЮ (ЭП487), ХН82ТЮМВ (ЭП460), ВЖ36-Л2, АНВ-300, ЖС6К, ЖСЗДК</p> <p>Сплавы зарубежного производства: Inconel 600, 601, 604, 625</p>
H	<p align="center">Твердые материалы</p> <p>Закаленная сталь</p> <p>Отбеленный чугун</p>	<p>Термообработанные стали</p> <p>ЧХ16, ЧХ28, ЧХ32, ЧН15Д7, ЧН15Д3Ш, ЧН19Х3Ш, ЧН11Г7Ш, ЧС13, ЧС15, ЧС17</p>

Обработка давлением

Технологические свойства определяют путем технологических проб и испытаний, ряд из которых стандартизованы.

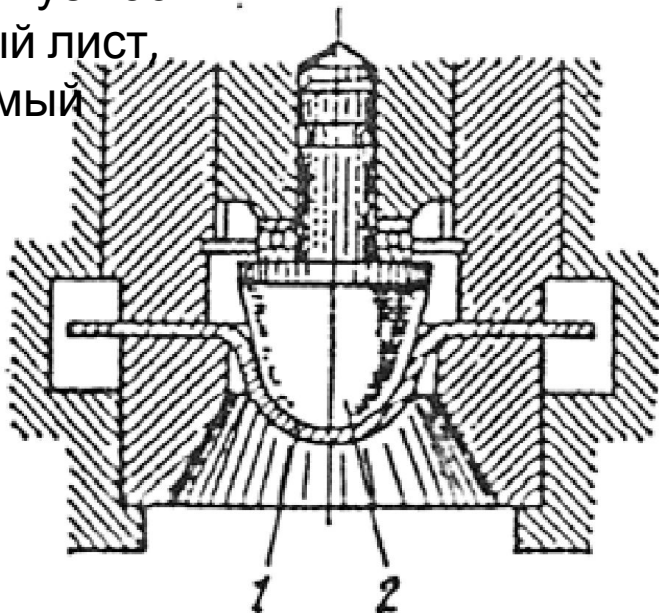


Технологические свойства материалов

Технологические свойства характеризуют податливость материалов технологическим воздействиям при переработке в изделия, то есть технологичность материалов при различных видах обработки

проба на штампуемость

(1 - испытуемый лист,
2 – вдавливаемый
наконечник)

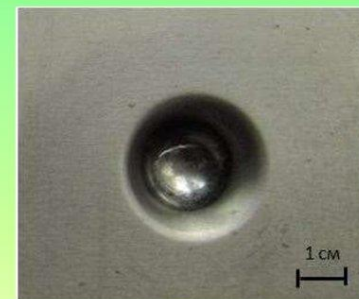


Результаты испытаний стали 08кп (толщина 0,5 мм) на выдавливание по методу Эриксона после эпиламирания

Состояние	Глубина лунки, мм	Способность к вытяжке
Отжиг	9,05	СВ
Эпиламирание	11,7 – 11,85	ВОСВ



а



б

Образцы после испытаний на выдавливание по методу Эриксона:
а – сталь 20 (отжиг); б – сталь 20 после эпиламирания

Способность литься

Технологическая проба Нехендзи - Самарина на жидкотекучесть

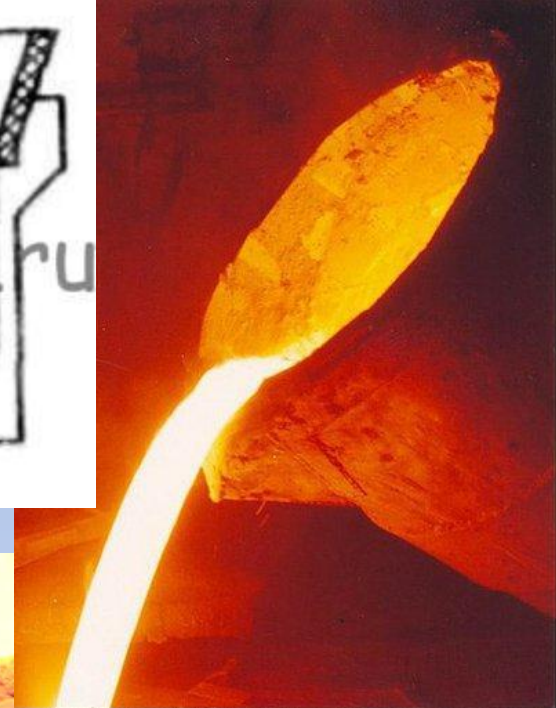
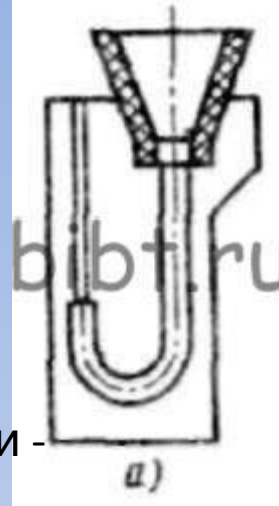


Схема спиральной пробы на жидкотекучесть.





Объемная усадка
равна:

$$\epsilon_v = \frac{V_0 - V}{V} 100$$

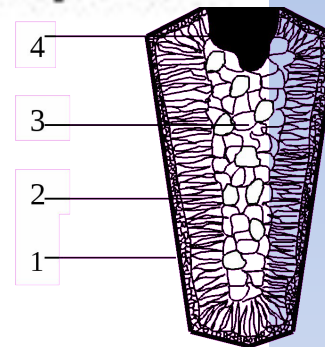


Рис.1.1. Макроструктура слитка (схема):
1 - корковая зона;
2 - зона столбчатых кристаллов;
3 - зона равноосных кристаллов;
4 - усадочная раковина

Линейная усадка
равна:

$$\epsilon_l = \frac{l_0 - l}{l} 100$$



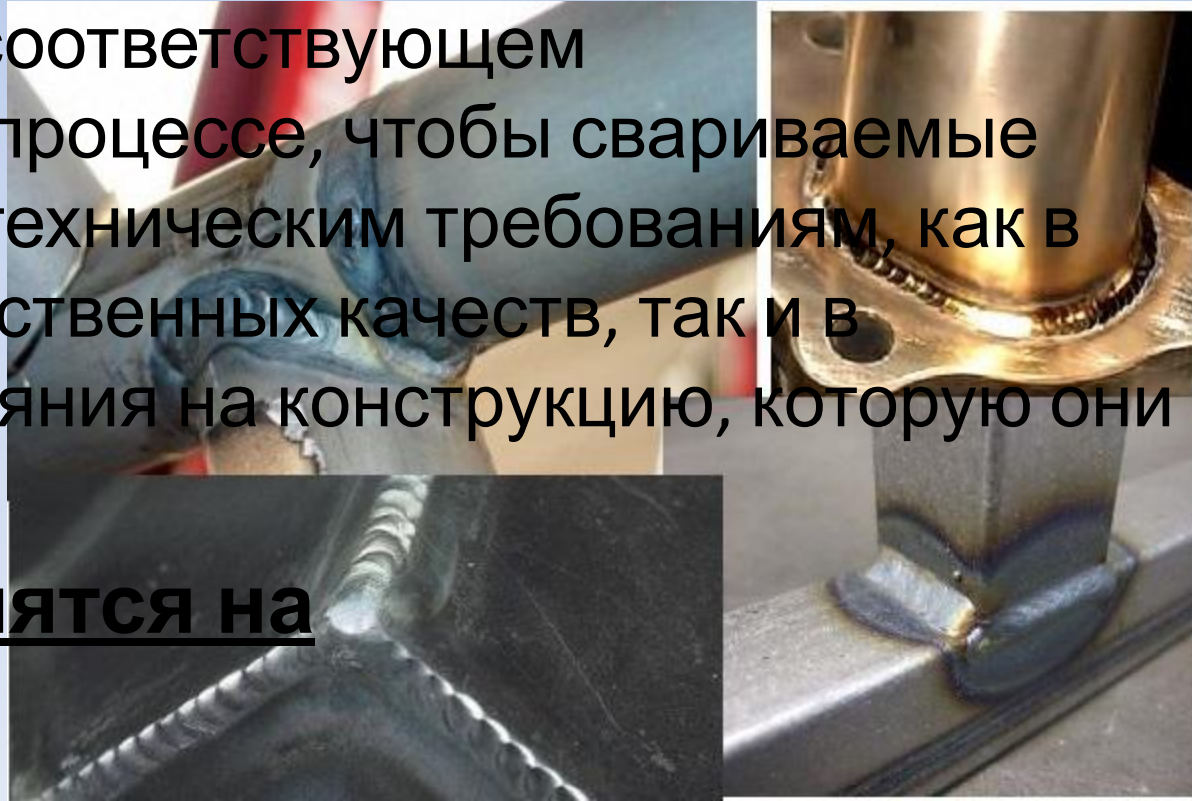
Металл	Линейная усадка
Алюминий	1,7–1,8%
Бронза	1,45–1,6%
Латунь	2,06%
Медь	2,1%
Сталь (низкоуглеродистая)	2%
Чугун (серый литейный)	0,7–0,8%

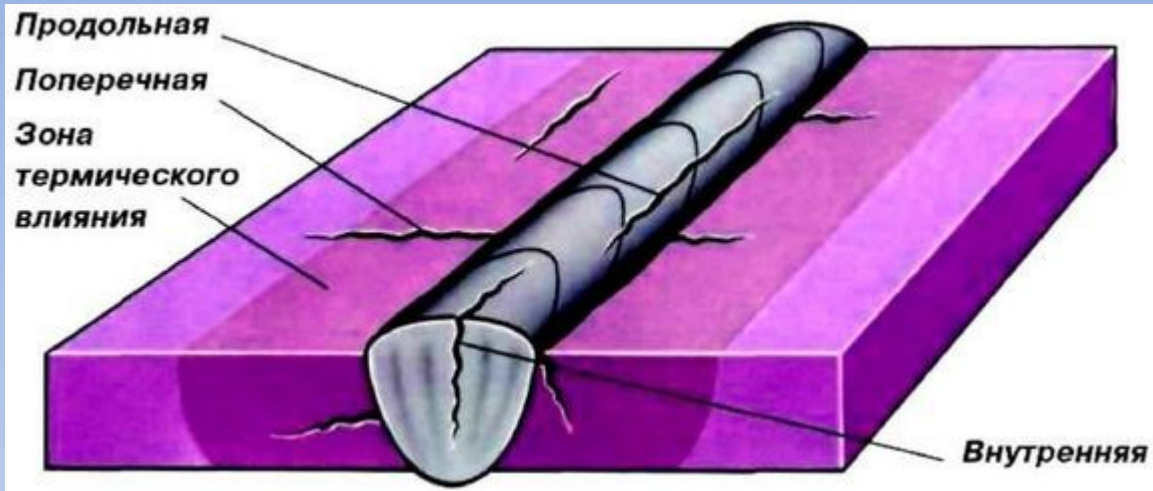
- **свариваемость** — свойство материалов образовывать при установленной технологии неразъемное соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия.

- **Свариваемость** оценивается степенью соответствия свойств сварного соединения свойствам основного материала и его склонностью к образованию дефектов.



- Определение *свариваемости* по ГОСТ 29273-92: металлический материал считается поддающимся сварке по ГОСТ 29273-92: металлический материал считается поддающимся сварке до установленной степени при данных процессах и для данной цели, когда сваркой достигается металлическая целостность при соответствующем технологическом процессе, чтобы свариваемые детали отвечали техническим требованиям, как в отношении их собственных качеств, так и в отношении их влияния на конструкцию, которую они образуют.
- **Материалы делятся на**
- **хорошо,**





ГРУППА СВАРИВАЕМОСТИ	УСЛОВИЯ СВАРКИ
I	Без ограничений, в широком диапазоне режимов сварки независимо от толщины металла, жесткости конструкций, температуры окружающей среды
II	Сварка только при температуре окружающей среды не ниже - 5 °С, толщине металла менее 20 мм при отсутствии ветра
III	Сварка с предварительным или сопутствующим подогревом до 250 °С в жестком диапазоне режимов сварки
IV	Сварка с предварительным и сопутствующим подогревом, термообработкой после сварки

Поведением при термообработке:

- закаливаемость;
- прокаливаемость;
- отсутствие закалочных деформаций и коробления.



закаливаемость

способность приобретать в результате закалки высокую твёрдость (структуру [Мартенсита](#)).

например, при увеличении содержания углерода с 0,3 до 0,7% в сталях твёрдость углеродистой стали возрастает с 30 до 65 HRC

(дальнейшее увеличение содержания углерода не влечёт за собой роста твёрдости).

При содержании углерода меньше 0,4%

твёрдость

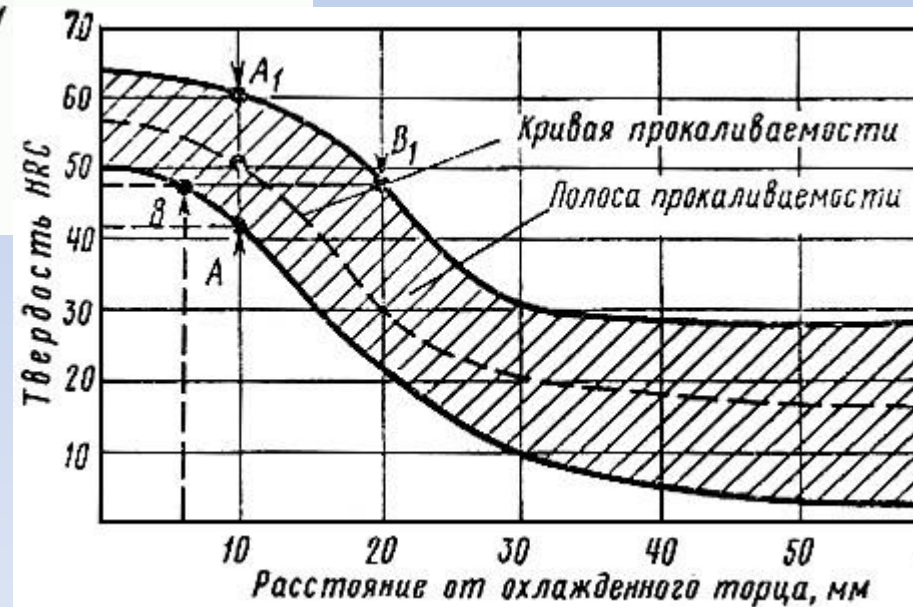
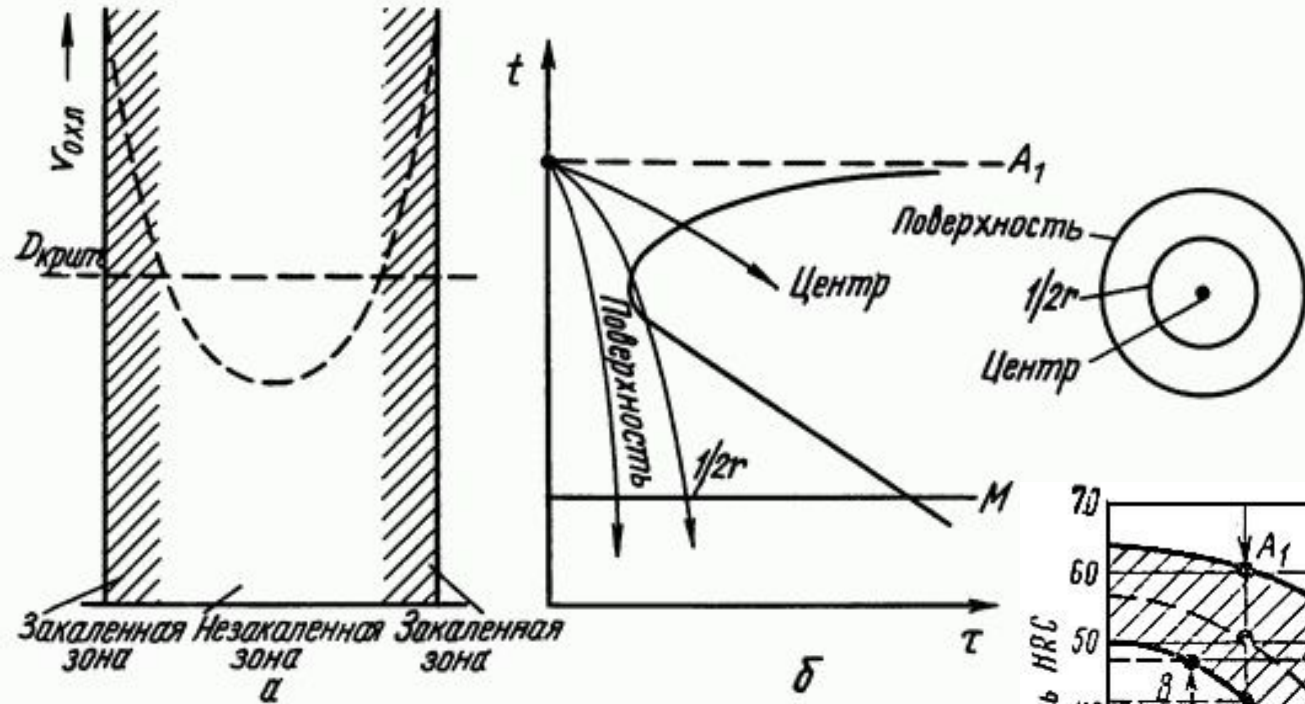
повышают легированием стали

никелем,

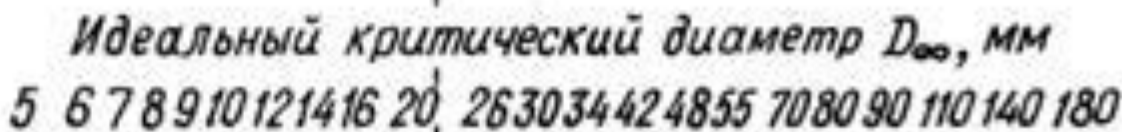
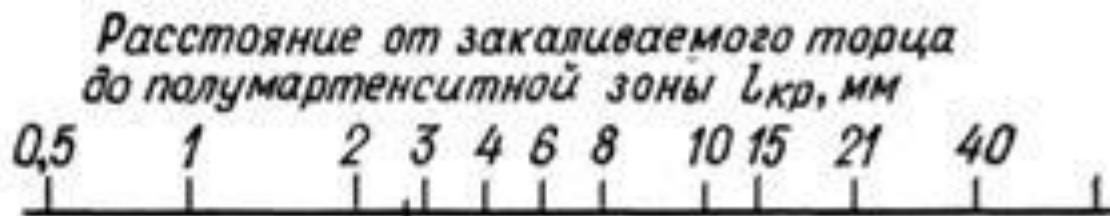
марганцем,

хромом, кремнием.

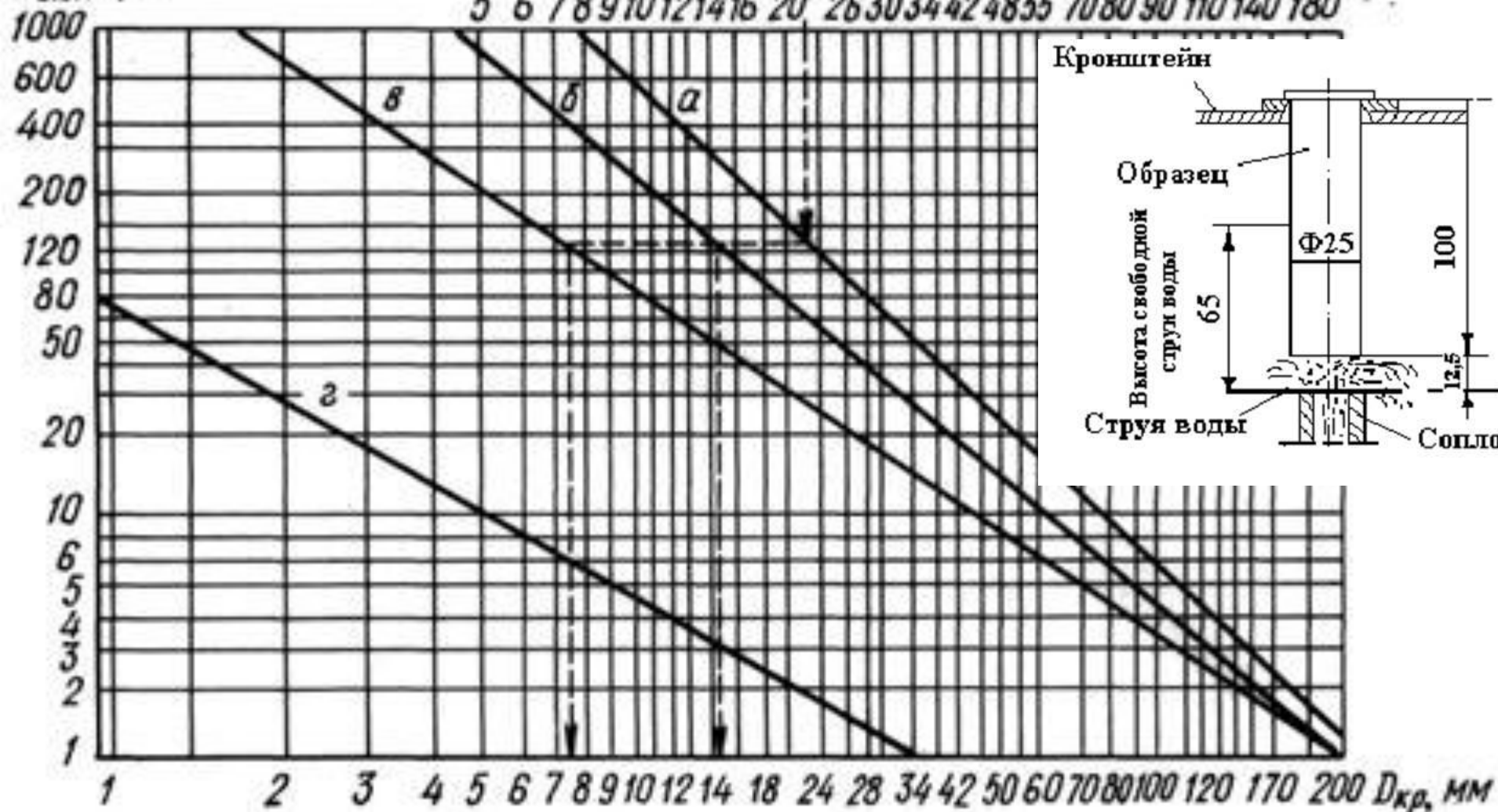
прокаливаемость



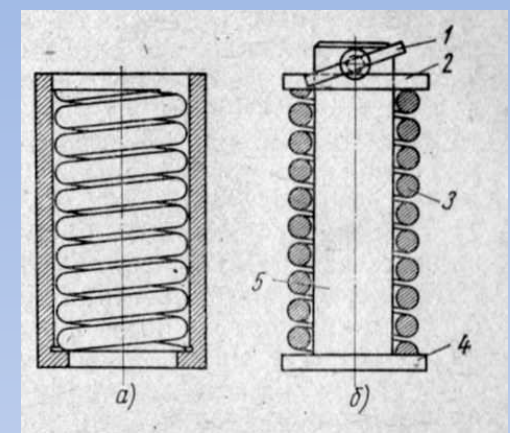
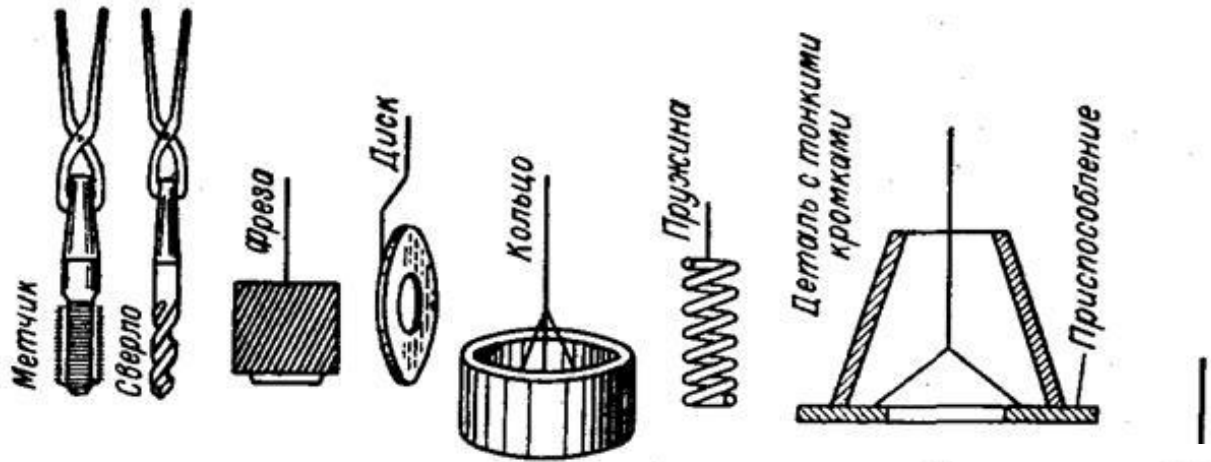
Номограмма Блантера



$v_{охл}, К/с$



закалочные деформации и коробления при закалке



Под короблением обычно понимают искажение формы изделий, а **поводкой** называют нарушение размеров, вызванное изменением объема.

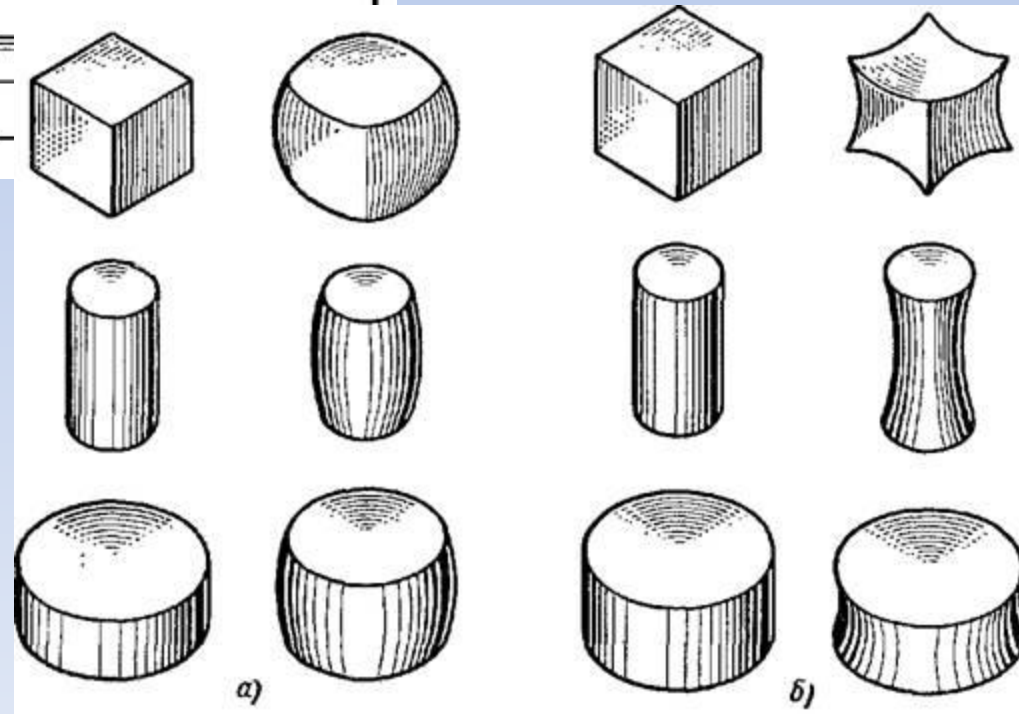
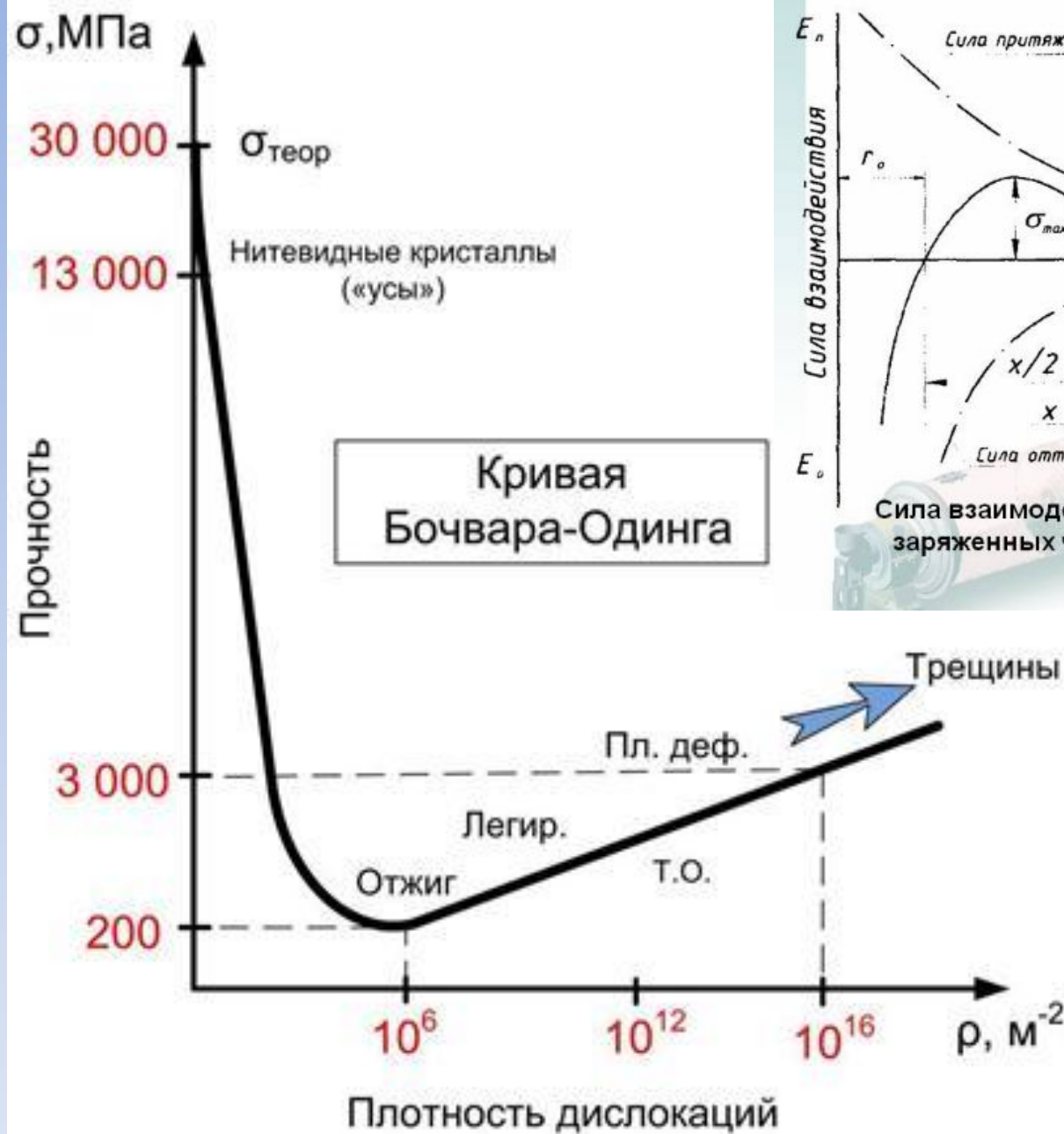


Рис. 70. Тела простой формы после деформации под влиянием тепловых (а) и структурных (б) напряжений

Прочность представляет собой комплексный показатель внутренней напряженности и может иметь различную интерпретацию:

Теоретическая прочность -
распределение напряжений
между атомами.

Реальная прочность - прочность
материала, с учетом наличия
внутренних дефектов,
определяется из механических
испытаний с построением
диаграмм.



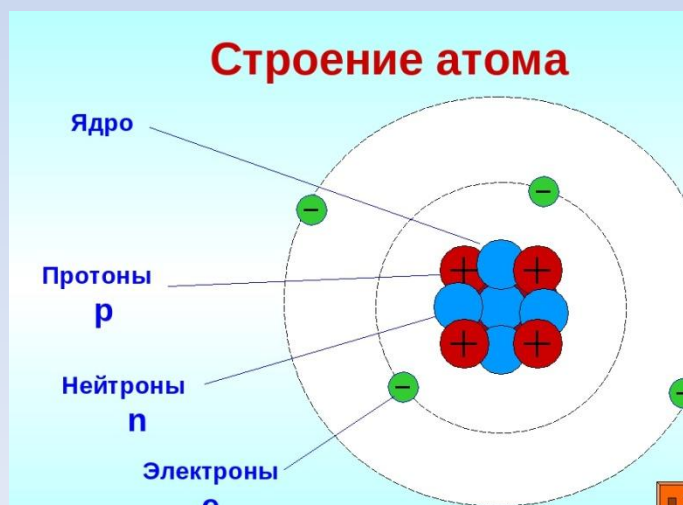
Теоретическая прочность

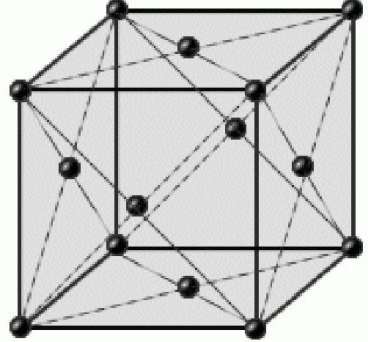
$$U = -\frac{c'}{r^{n_1}} + \frac{c''}{r^{n_2}}$$

где

- $\frac{c'}{r^{n_1}}$ соответствует силам притяжения;
- $\frac{c''}{r^{n_2}}$ соответствует силам отталкивания;

$\sigma_0 = 0,1E$



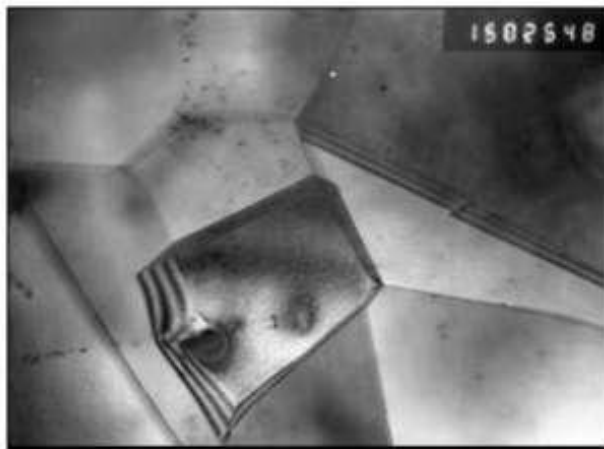


Атомно-кристаллическое

- Каждый кристалл имеет правильное внутреннее строение. Особенность кристаллов — закономерное расположение частиц в пространстве. Оно характеризуется пространственной кристаллической решеткой (ПКР).
- *Элементарная ячейка (Э.Я)*- структурная единица кристалла, служит характеристикой кристаллической решетки.
- Все кристаллические тела отличаются формой и размерами элементарных ячеек.



Тонкая структура



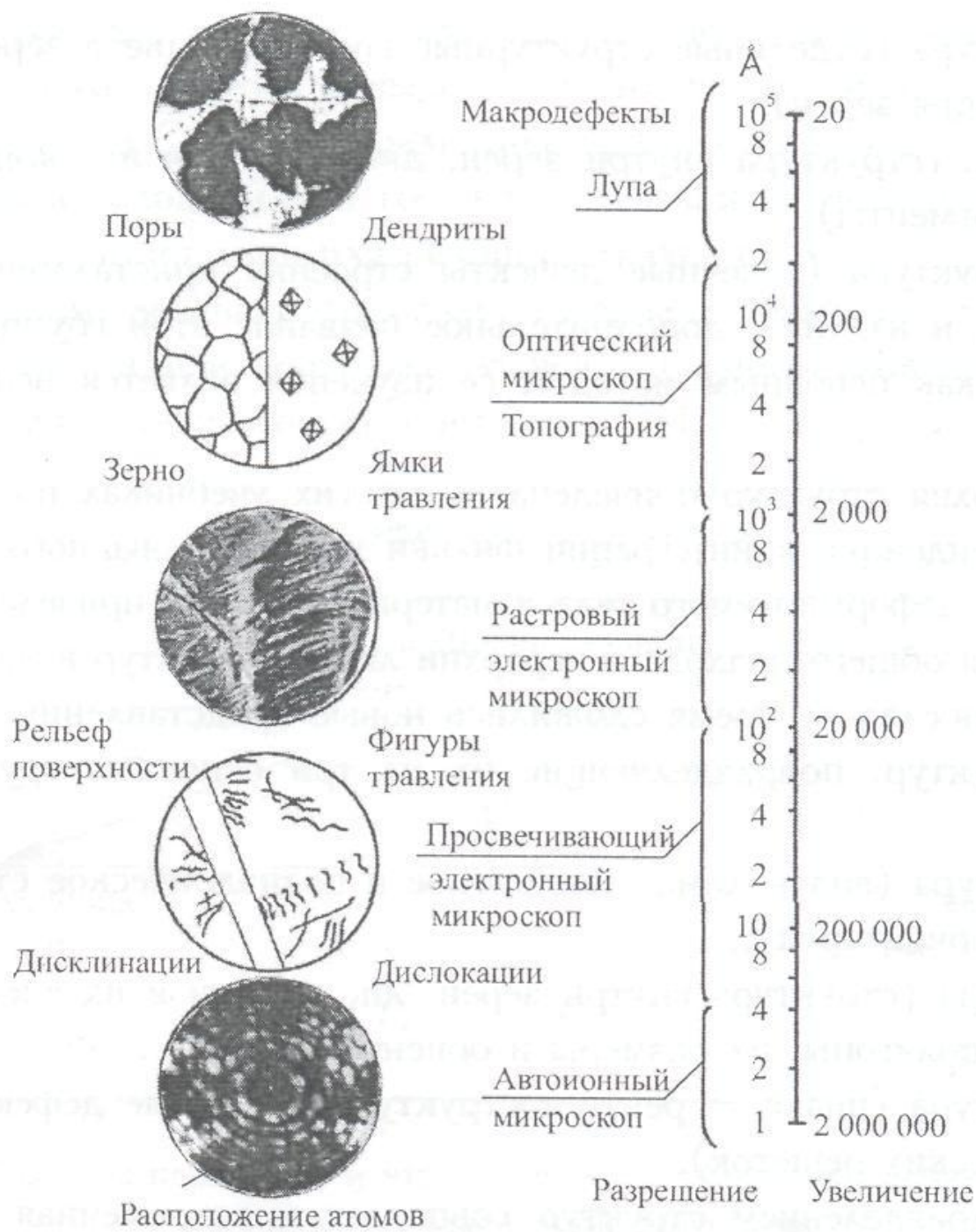
а



б

Тонкая структура стали 12Х18Н10Т:

а) основной металл $\times 15000$; б) модифицированный шар $\times 20000$



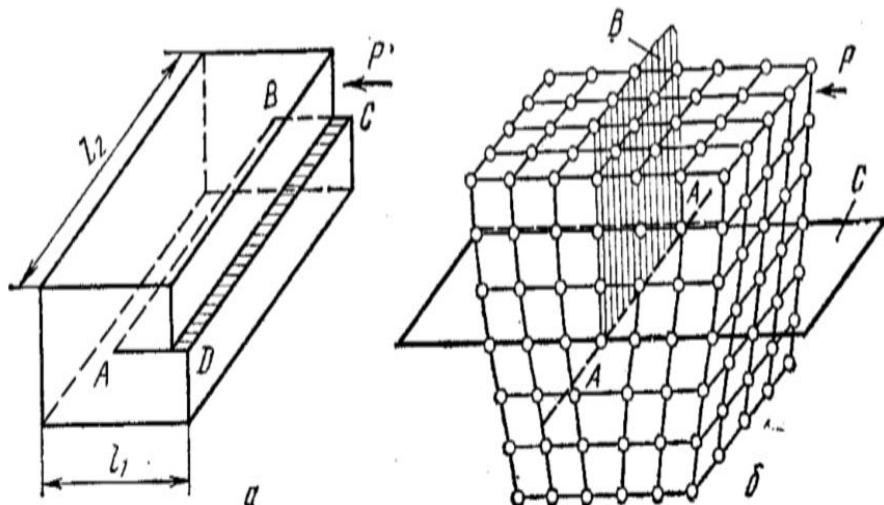
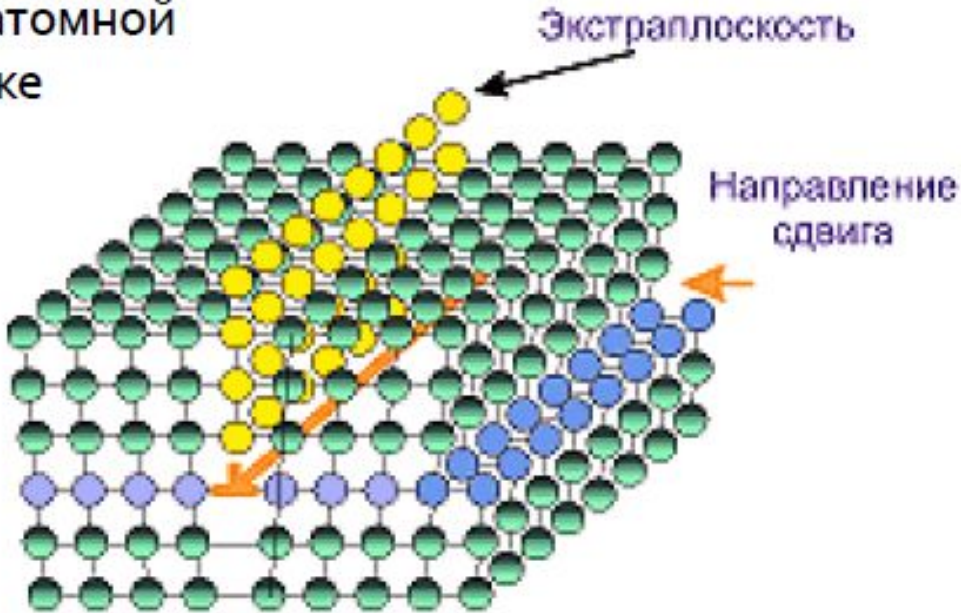
Прочность представляет собой комплексный показатель внутренней напряженности и может иметь различную интерпретацию:

Теоретическая прочность -
распределение напряжений
между атомами.

Реальная прочность - прочность
материала, с учетом наличия
внутренних дефектов,
определяется из механических
испытаний с построением
диаграмм.

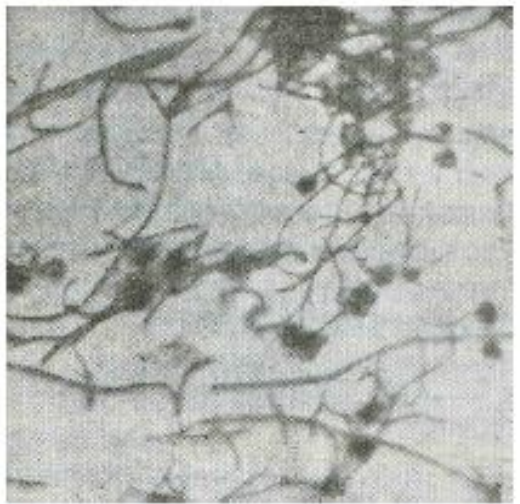
Дислокация – край недостроенной атомной плоскости в кристаллической решетке

Дислокации возникают при:
 - кристаллизации расплава;
 - пластической деформации.



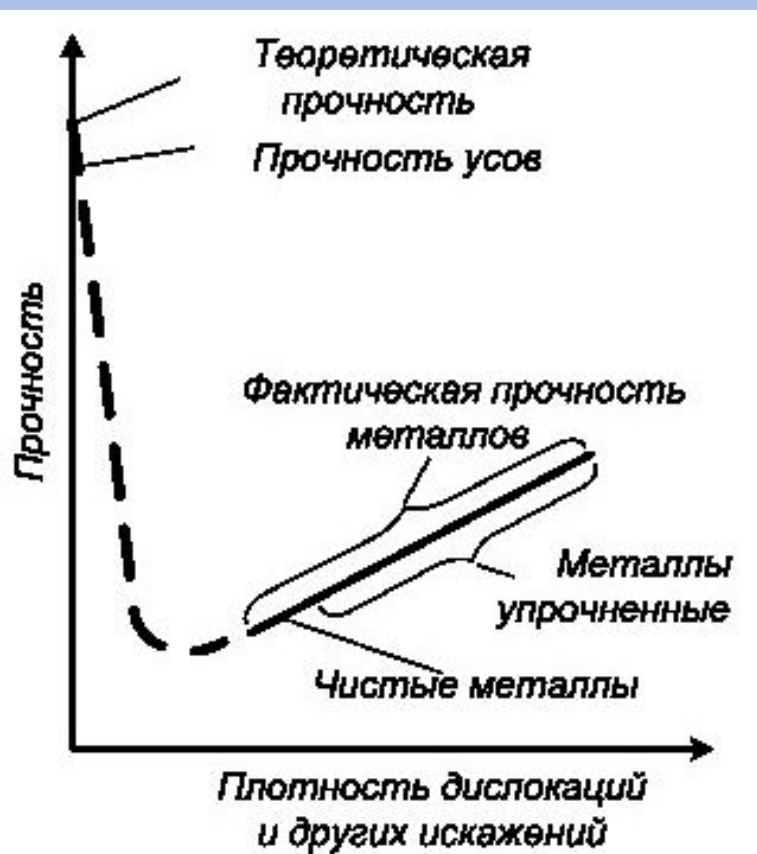
Краевая дислокация, возникающая в результате сдвига:

а – схема образования краевой дислокации; б – краевая дислокация положительного знака.



Электронная микроскопия, $\times 40000$

Для упрочнения материала нужно затруднить перемещение дислокаций в нём. Для обеспечения пластичности материала нужно облегчить перемещение дислокаций.

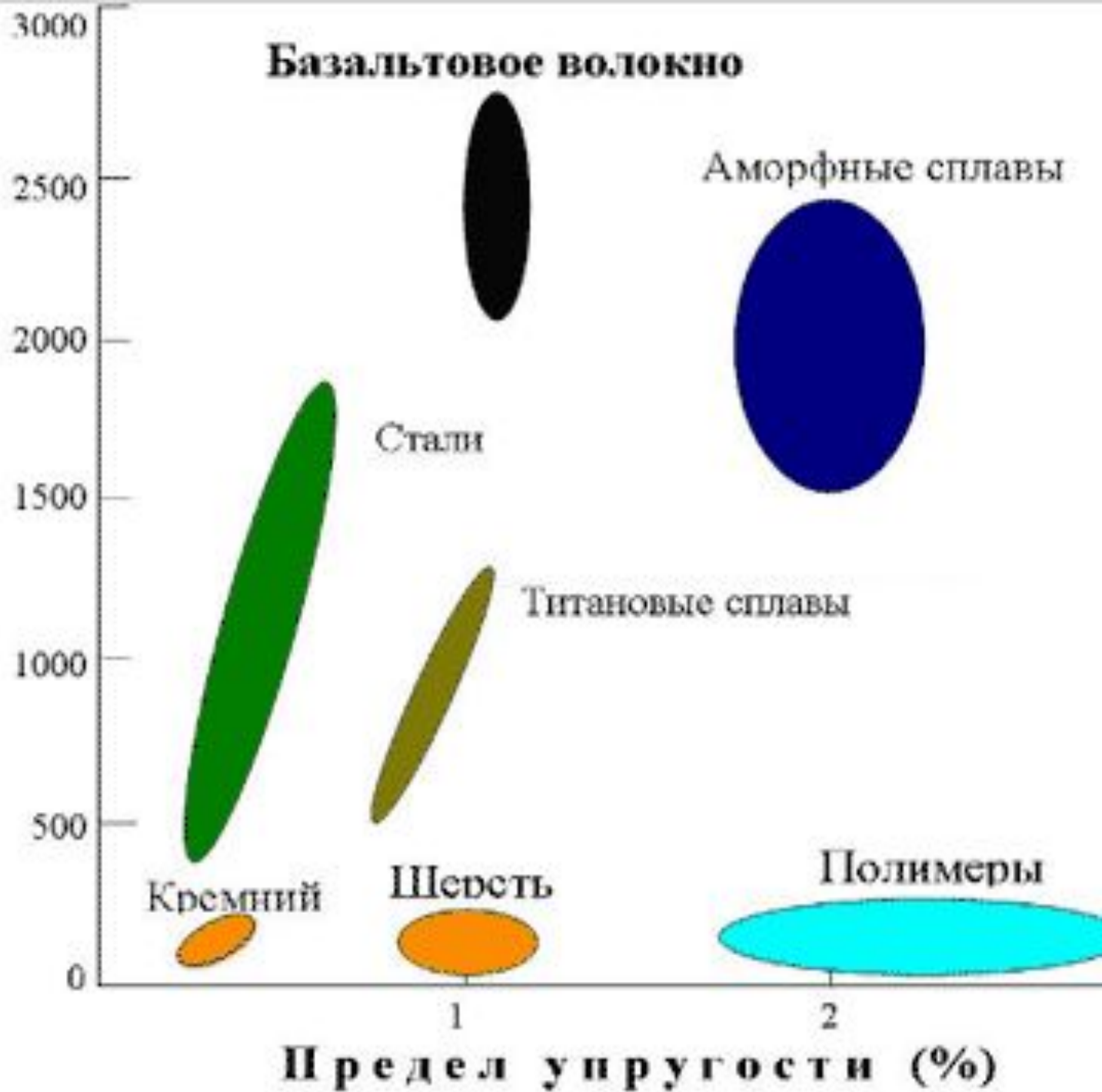


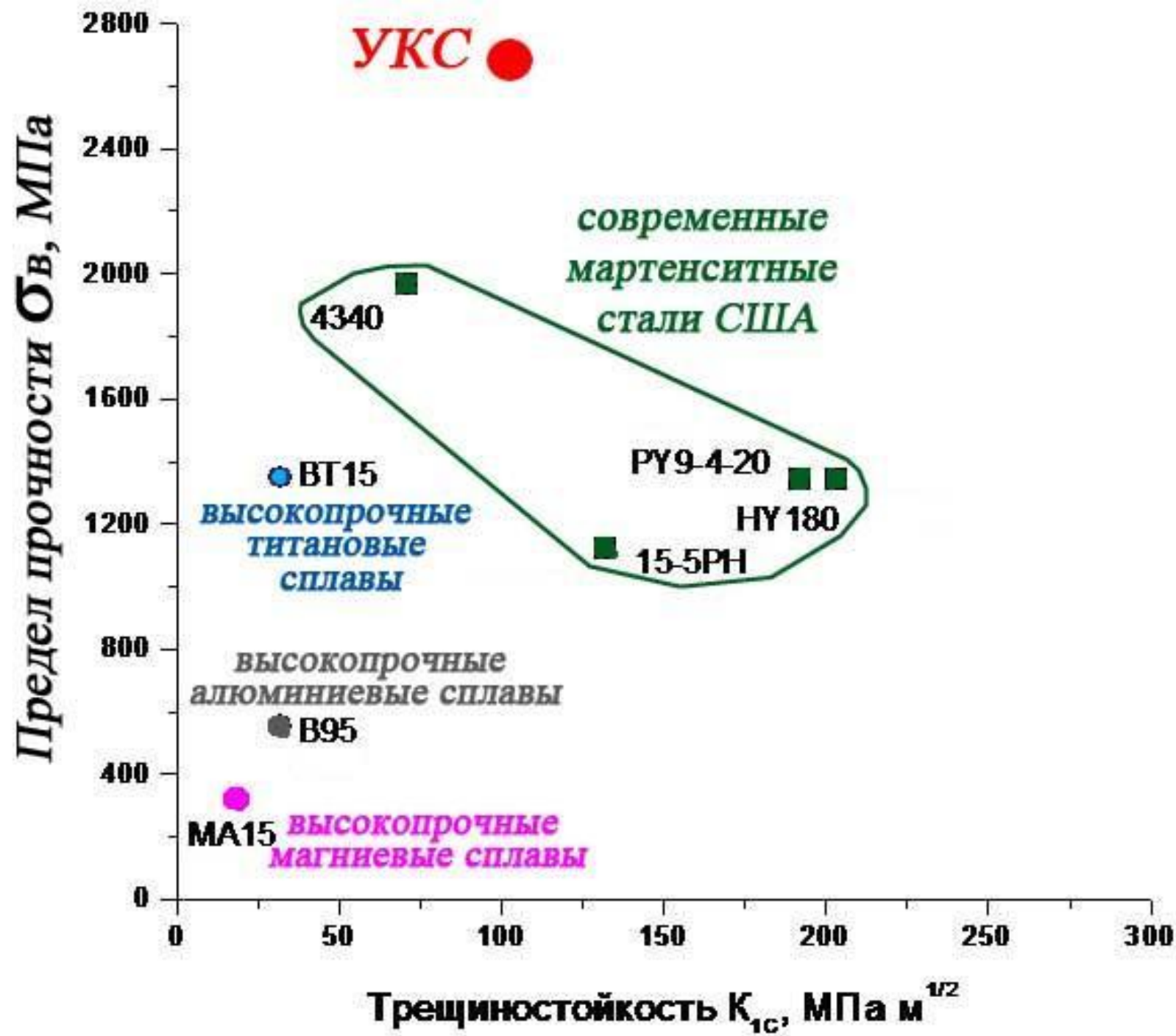
Плотность дислокаций в кристалле определяется как среднее число линий дислокаций, пересекающих внутри тела площадку площадью 1 м^2 , или как суммарная длина линий дислокаций в объеме 1 м^3

Плотность дислокаций изменяется в широких пределах и зависит от состояния материала. После тщательного отжига плотность дислокаций составляет $10^5 \dots 10^7 \text{ м}^{-2}$, в кристаллах с сильно деформированной кристаллической решеткой плотность дислокаций достигает $10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Рис. 7. Влияние искажений кристаллической решетки на прочность

Прочность на растяжение (МПа)





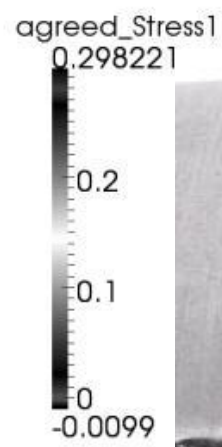
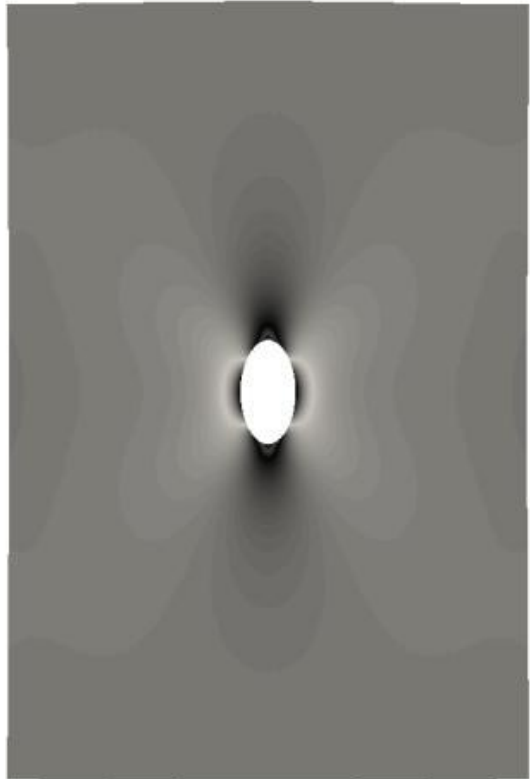
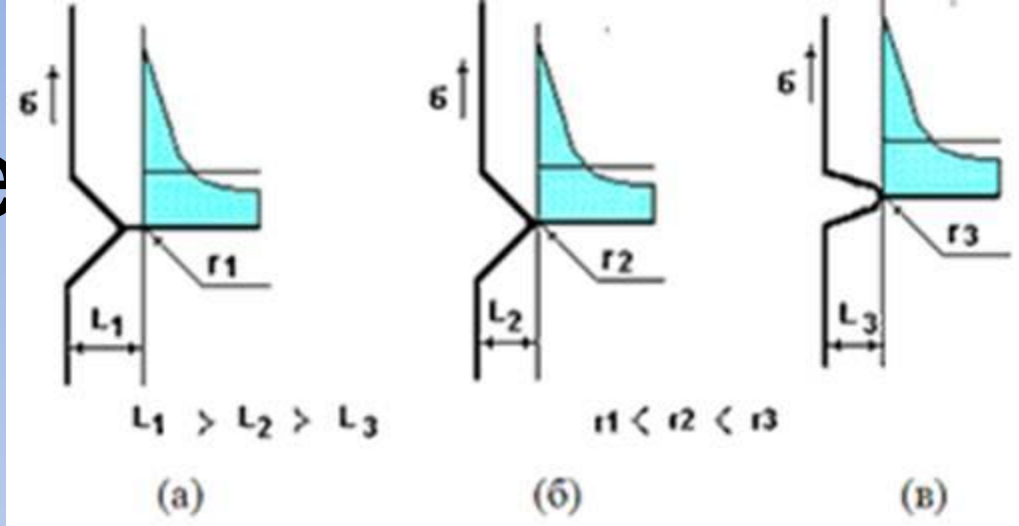
Методы повышения конструкционной прочности

- Высокая прочность и долговечность конструкций при минимальной массе и наибольшей надежности достигается металлургическими,
- конструкторскими и
- технологическими методами.
-
-

Металлургические - повышение чистоты Me , удаление вредных примесей (S , P , газообр. эл-тов - O , H , N , оксидов, сульфидов) - переплав, рафинирование и др.

Конструкторские методы предусматривают обеспечение равнопрочности высоконапряженных деталей. При их проектировании избегают резких перепадов жесткости, глубоких канавок и других конструктивных надрезов.

конструкторские



Технологические методы

- **Твердорастворное.**
- Оценивает упрочнение твердого раствора, растворенными в нем элементами

$$\Delta\sigma \sim G \varepsilon^2 c$$

- G – коэффициент природы твердого раствора;
- c – концентрация второго элемента;
- $\varepsilon = (r_A - r_B)/r_2$.
- *Упрочнение при легировании растет пропорционально концентрации легированного элемента в твердом растворе и относительной разницы атомного радиуса компонента.*

Твердые растворы – фазы, в которых атомы одного компонента располагаются в кристаллической решетке другого (растворителя). Имеют переменный состав и решетку растворителя.

с неограниченной растворимостью

с ограниченной растворимостью

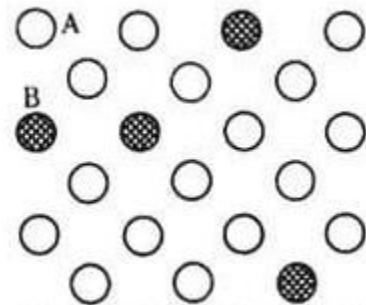
Условия неограниченной растворимости:

- $\frac{R_B - R_A}{R_A} < 7...8\%$

- решетки компонентов А и В одинаковы

$$\frac{R_B - R_A}{R_A} = 8...15\%$$

Если $\frac{R_B - R_A}{R_A} > 15\%$, то вещества нерастворимы

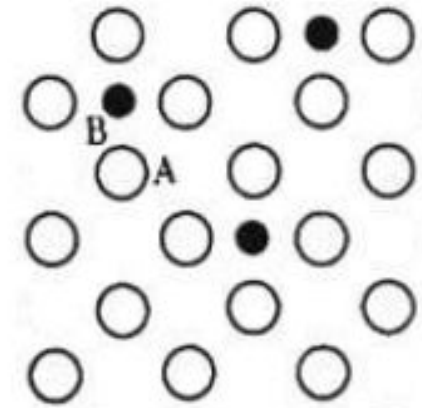


Твердые растворы внедрения

Условие растворимости:

$$R_B \leq 0,59R_A$$

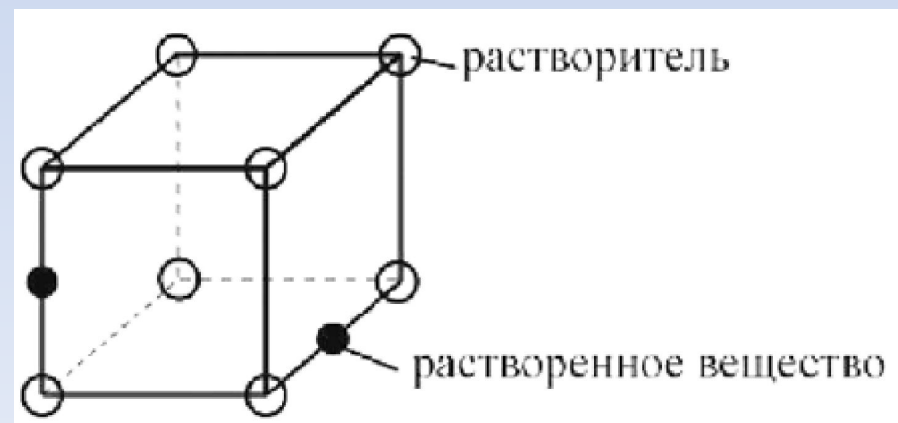
$$R_{\text{поры ГЦК}} \leq 0,41R_A, \quad R_{\text{поры ОЦК}} \leq 0,29R_A$$



Обозначаются твёрдые растворы либо греческими буквами алфавита: α , β , γ , δ ..., либо: $A(B)$, где A - растворитель, B - растворенный компонент.

Например:

$\text{Fe}\alpha(\text{C})$ – твердый раствор углерода в α - железе – феррит.



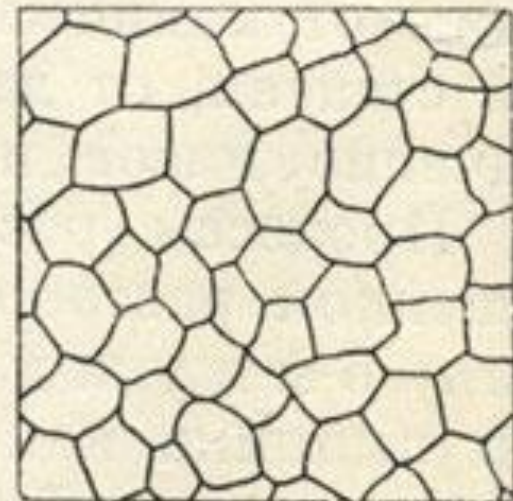
- **Зеренное** упрочнение. Определяется размером действительного зерна сплава.

Границы зерен служат эффективным барьером на пути скольжения дислокаций. Повышение прочности при измельчении зерна описывается в уравнении Холла-Петча:

- $\Delta\sigma_3 = k_y d_3^{1/2}$
- k_y – коэффициент, характеризующий прочность торможения дислокаций.



а



б

Для Ф-П сталей $k_y = 0,57..0,73 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{1/2}$

-

Зеренная структура

Размеры зерен составляют до 1000 мкм.

Углы разориентации составляют до нескольких десятков градусов.

Граница между зернами представляет собой тонкую в 5 – 10 атомных диаметров поверхностную зону с максимальным нарушением порядка в расположении атомов.

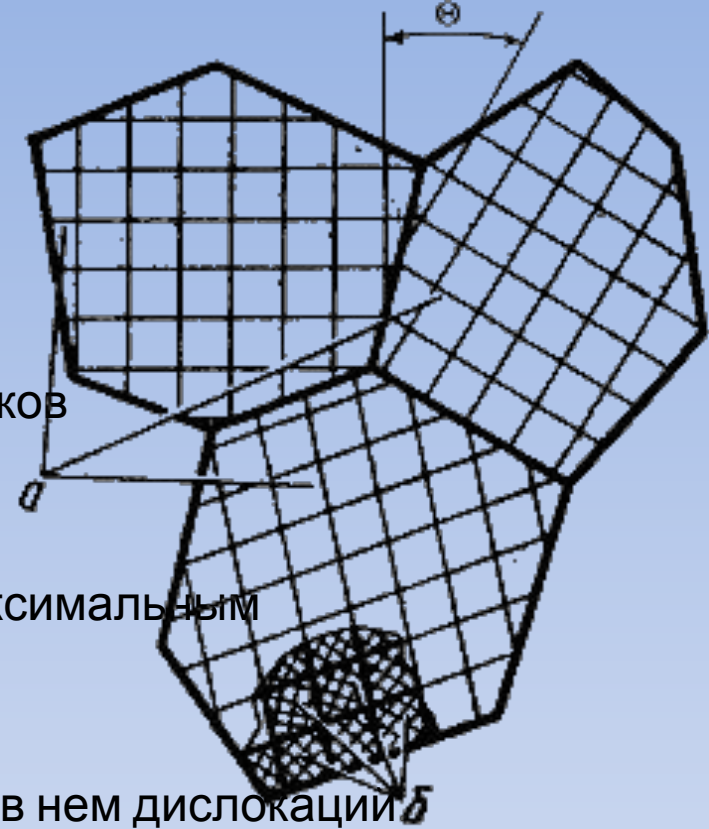
Строение переходного слоя способствует скоплению в нем дислокаций b

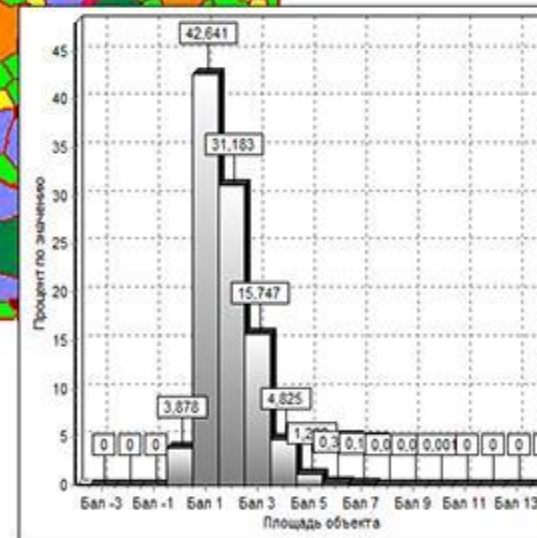
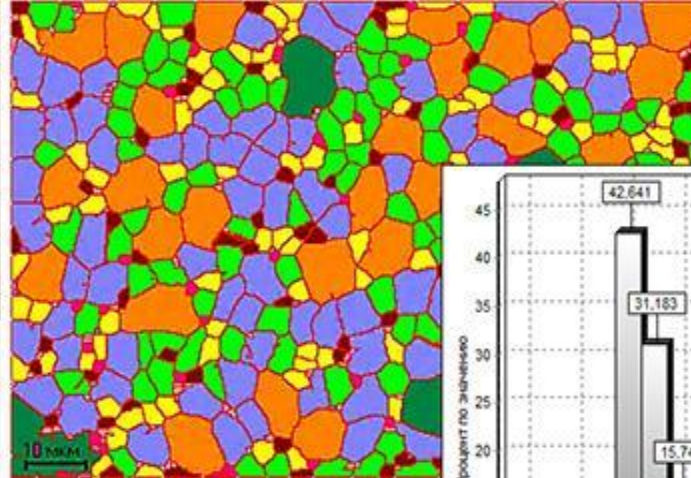
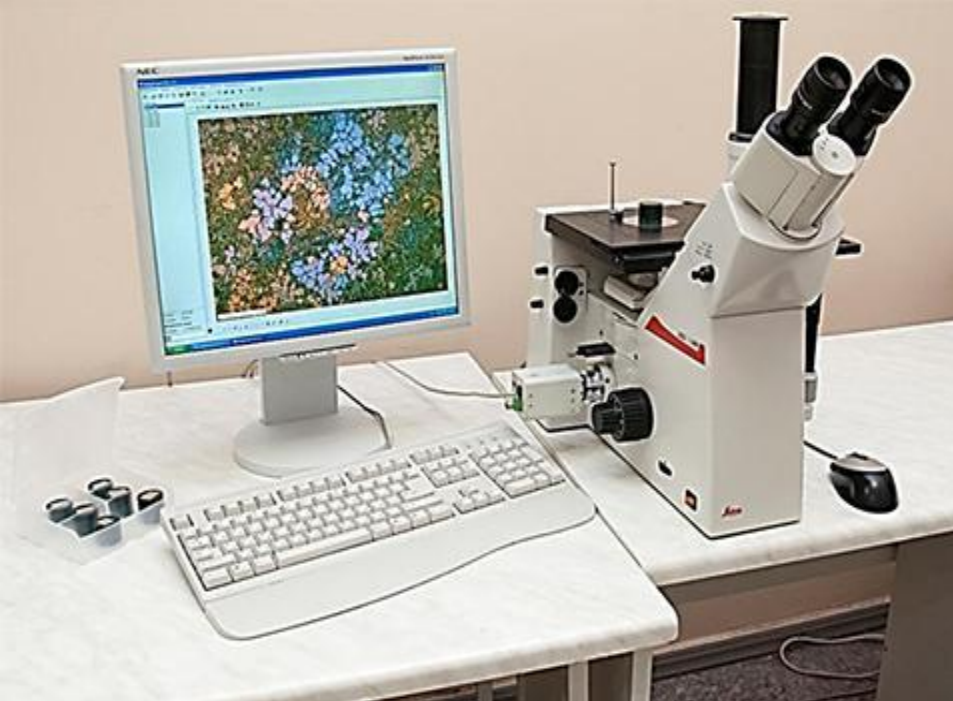
На границах зерен повышена концентрация примесей, которые понижают поверхностную энергию.

Однако и внутри зерна никогда не наблюдается идеального строения кристаллической решетки. Имеются участки, разориентированные один относительно другого на несколько градусов. Эти участки называются **фрагментами**.

Процесс деления зерен на фрагменты называется *фрагментацией* или **полигонизацией**.

В свою очередь каждый фрагмент состоит из блоков, размерами менее 10 мкм, разориентированных на угол менее одного градуса. Такую структуру называют





Масштаб зернистой структуры:

- Структура
 - Наноструктура
 - Ультрадисперсная
 - Микроструктурная
 - Мелкозернистая
 - Крупнозернистая
- Диаметр зерна
- <100нм < 0.1мкм
 - 0.1...1 мкм
 - 1...10 мкм
 - 10...50 мкм
 - 50...100 > мкм

Чем мельче зерно в поликристалле, тем больше суммарная протяженность границ, тем выше прочность материала.

Терминологические подходы к понятию наноматериалов

Геометрические размеры

$$D \sim 1 \dots 100 \text{ нм}$$

Доля границ раздела $\Delta V_{\text{гр}} \geq 50\%$

$\Delta V_{\text{гр}} \sim 3s/D$ при ширине приграничной области $s \sim 1 \text{ нм}$ $D = 6 \text{ нм}$

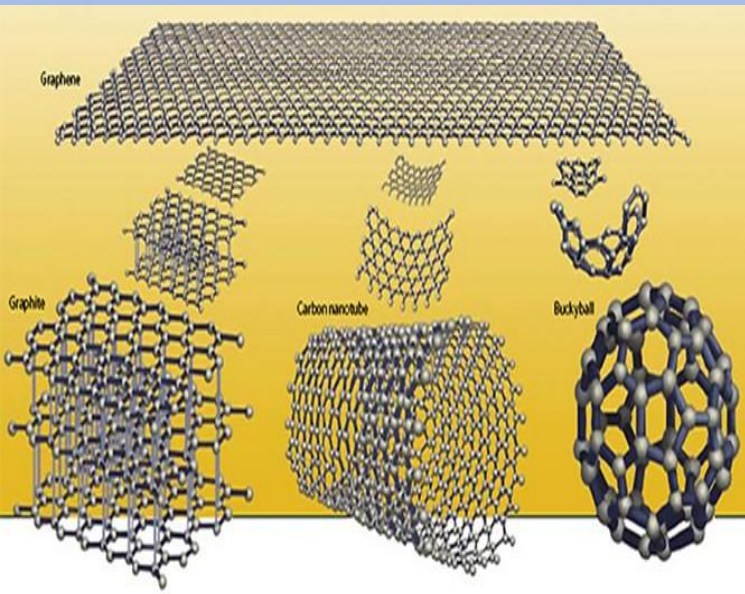
Критический размер для физического эффекта $D_{\text{кр}} > D$

Возникновение нового качества при уменьшении V вещества или его компоненты по 1, 2 или 3 координатам до нанодиапазона

Комплексный подход

содержание в материалах структурных элементов с $D < 100 \text{ нм}$ хотя бы в одном измерении и обладающие качественно новыми характеристиками

Наноматериалы



С развитием техники сканирующей микроскопии, которая позволила наблюдать отдельные атомы и молекулы, оказалось возможным манипулировать атомами и молекулами с тем, чтобы создавать новые структуры, и тем самым получать новые материалы, которые строятся на основе элементов атомного уровня размеров. Эти возможности аккуратно собирать атомы открыли перспективы создавать материалы с механическими, электрическими, магнитными и другими свойствами.

Изучением свойств таких новых материалов занимается **нанотехнология**, где приставка «нано» означает, что размеры структурных элементов составляют величины порядка нанометра.

Нано и микрообъекты, изделия и материалы из них

Наночастицы

Кластеры

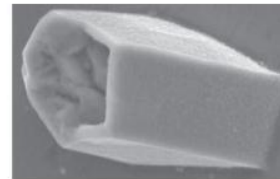
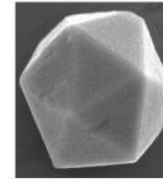
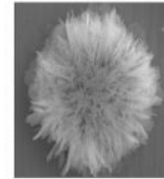
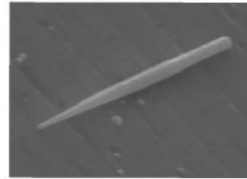
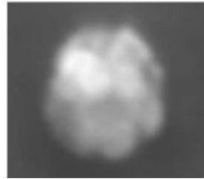
“Усы”, вискеры

Микрочастицы с развитой поверхностью

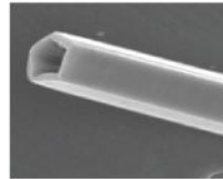
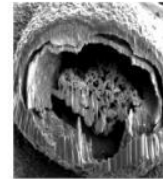
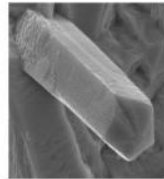
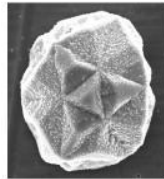
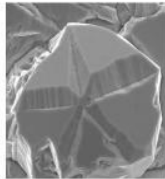
Микрочастицы с полостью

Пентагональные трубки

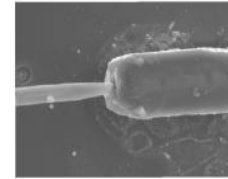
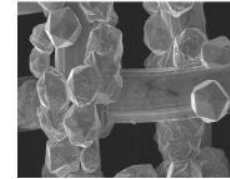
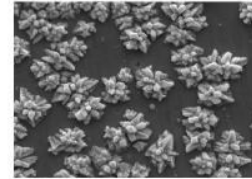
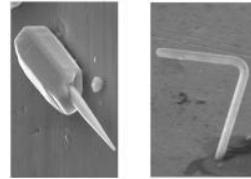
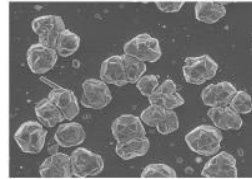
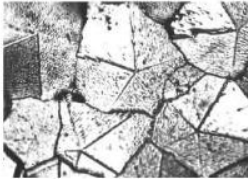
Нанообъекты



Микрочастицы и кристаллы



Наноматериалы и микроизделия



Покрyтия, пленки

Порошки

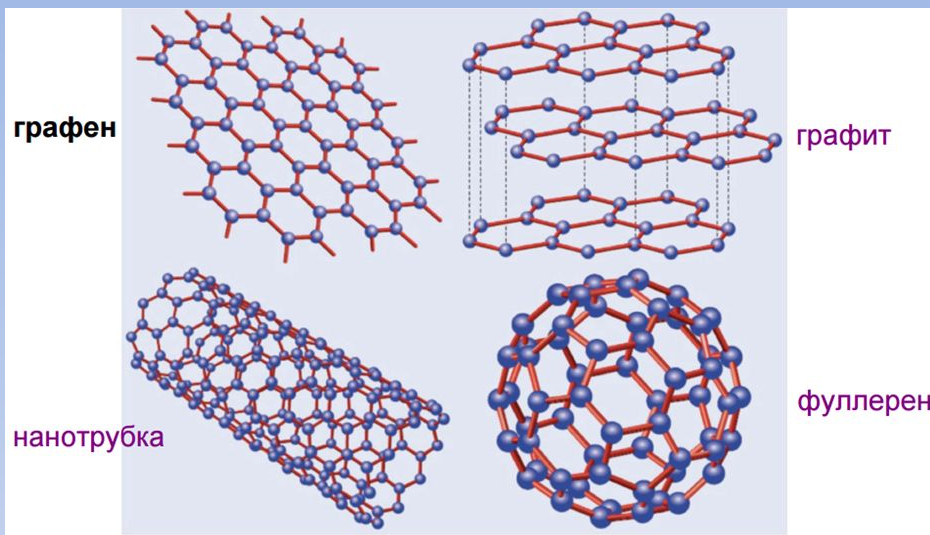
Кантилеверы, зонды, нанокрючки

Катализаторы, адсорбенты

Контейнеры, фильтры

Полые микропровода, композиционная проволока

Структуры наноматериалов



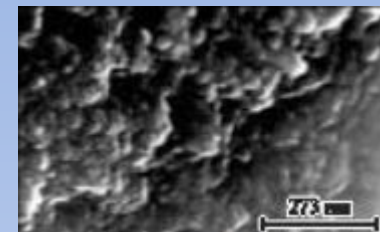
Углеродные наноструктуры

Рисунок 2-Микрофотографии наноструктур:

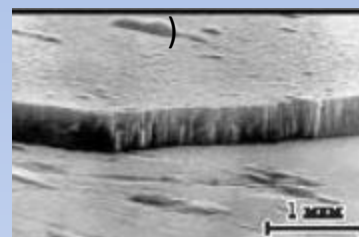
а – компакт Pd; **б** – компакт TiN; **в** – излом пленки TiN; **г** – поверхность пленки TiN; **д** – многослойная пленка (сверхрешетка) Mo – V; **е** – закаленный из жидкого состояния сплав Al – Pb (10 %); **ж, з** – соответственно ячеистая и дендритно-ячеистая структура сплава Fe – Si, закаленного из жидкого состояния



а



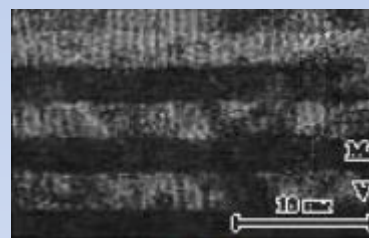
б)



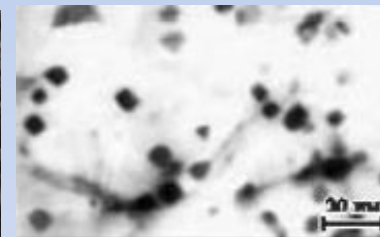
в)



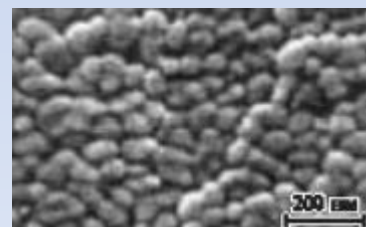
г)



д)



е



ж)



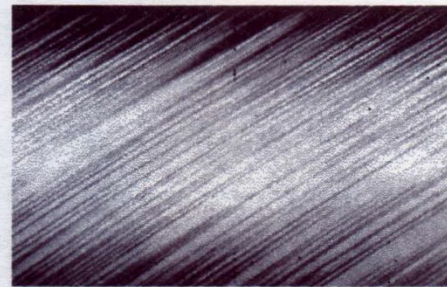
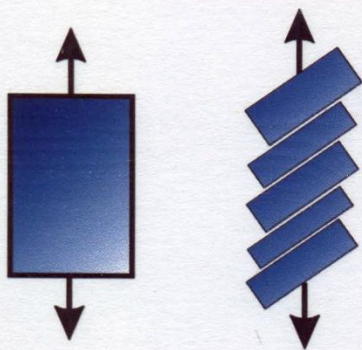
з)

- **Деформационное.** Упрочнение в результате повышения плотности дислокаций.

Силовые поля вокруг дислокаций являются эффективными барьерами для других близкорасположенных дислокаций. В связи с этим, чем больше плотность, тем выше сопротивление пластическому деформированию.

- Пример в Ф-П сталях горячекатаных, нормализованных $\rho = 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-2}$

Деформация скольжением



Полосы скольжения в деформированном алюминии

Плоскости и направления скольжения

Решетка ГЦК (Cu, Al)

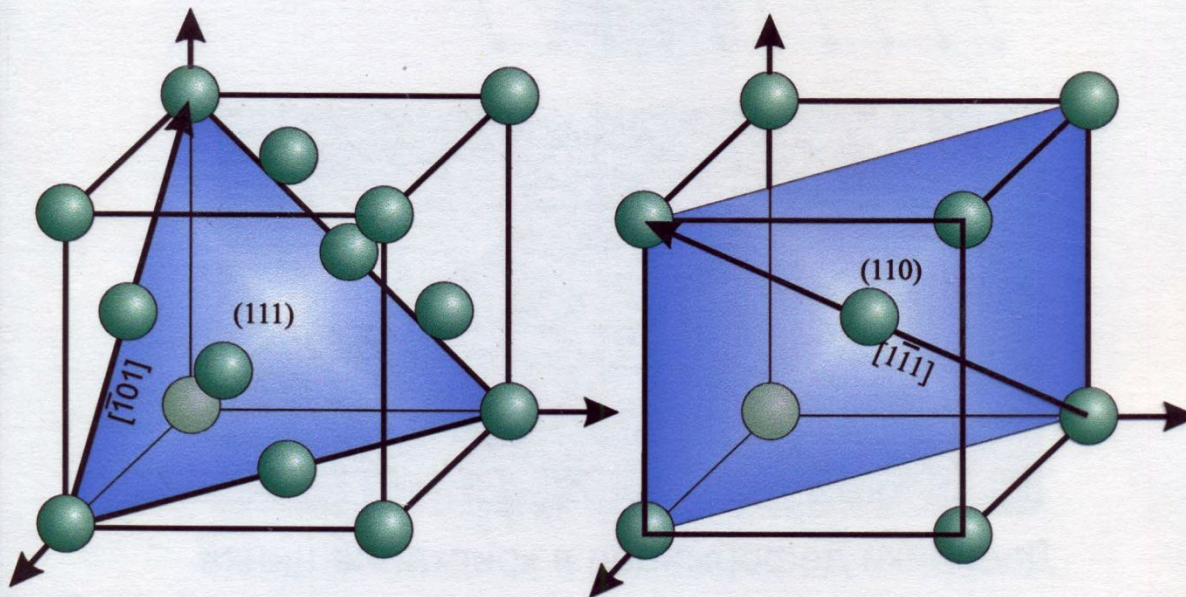
Плоскости скольжения - $\{111\}$

Направления скольжения - $\langle 110 \rangle$

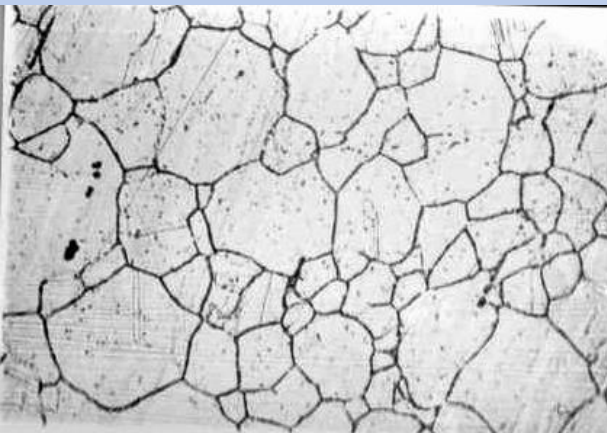
Решетка ОЦК (Cr, W)

Плоскости скольжения - $\{110\}$, $\{112\}$

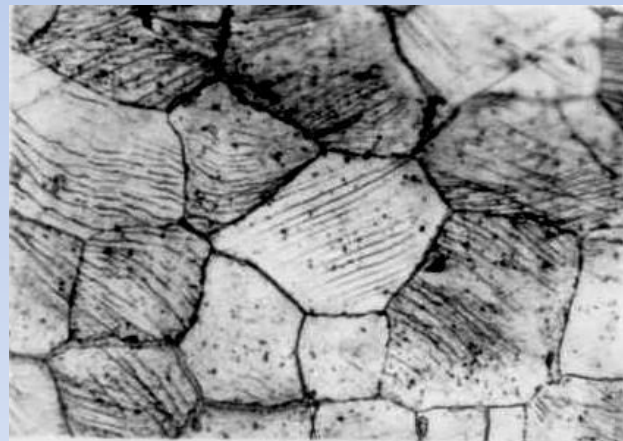
Направления скольжения - $\langle 111 \rangle$



Изменение структуры и свойств металла в процессе пластической деформации



0%



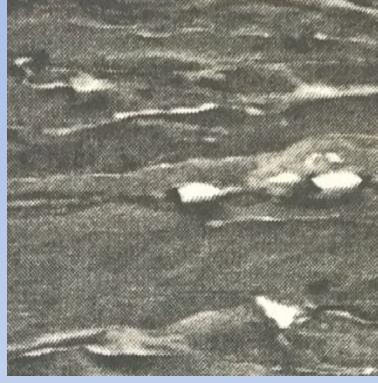
1%



80%

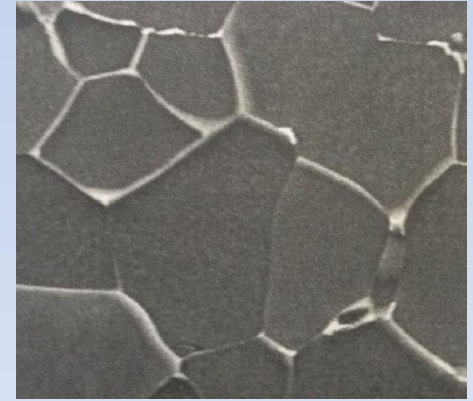
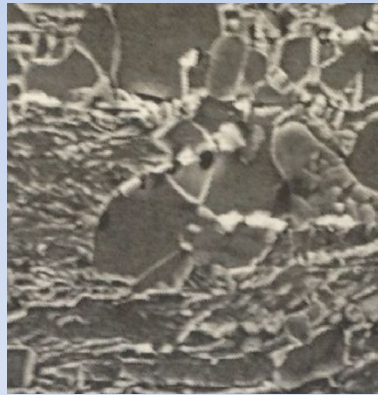
При увеличении степени пластической деформации прочность металла возрастает, пластичность снижается. Упрочнение при пластической деформации называется **наклёпом**

Нагрев холоднодеформированной стали



1- Структура холоднодеформированной стали 10пс.

2- Начало рекристаллизации в холоднодеформированной стали 10пс – образование зародышей рекристаллизации (ЗР).

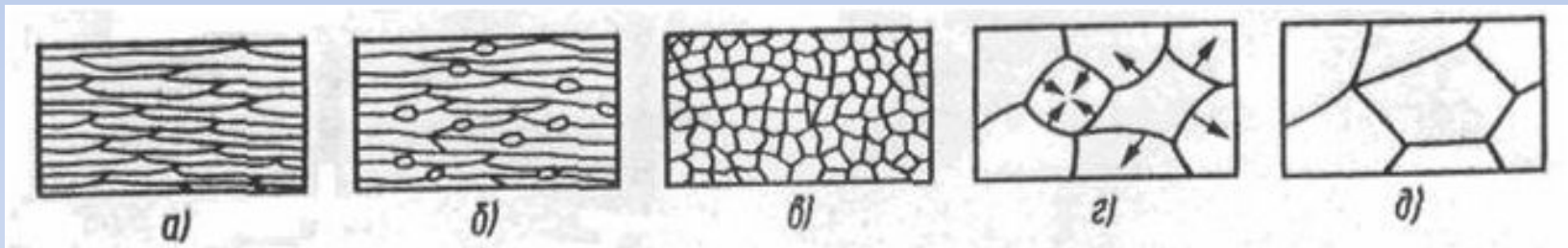
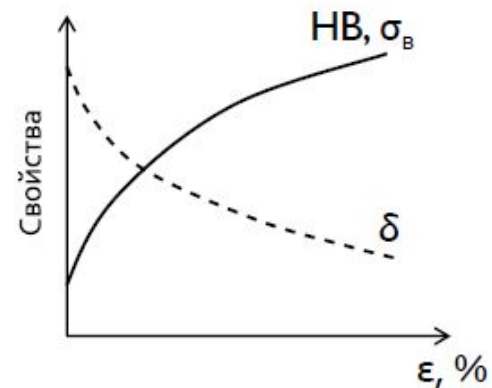


3- Развитие рекристаллизации в холоднодеформированной стали 10пс – образование новых зародышей рекристаллизации и их рост.

4 – Завершение рекристаллизации в холоднодеформированной стали 10 пс.

При больших степенях деформации возникает множество центров новых зерен и после рекристаллизации образуется мелкозернистый поликристалл с хорошими механическими свойствами.

Изменение свойств металла при пластической деформации



- а) наклепанный металл; б) начало первичной рекристаллизации; в) завершение первичной рекристаллизации; г, д) стадии собирательной рекристаллизации

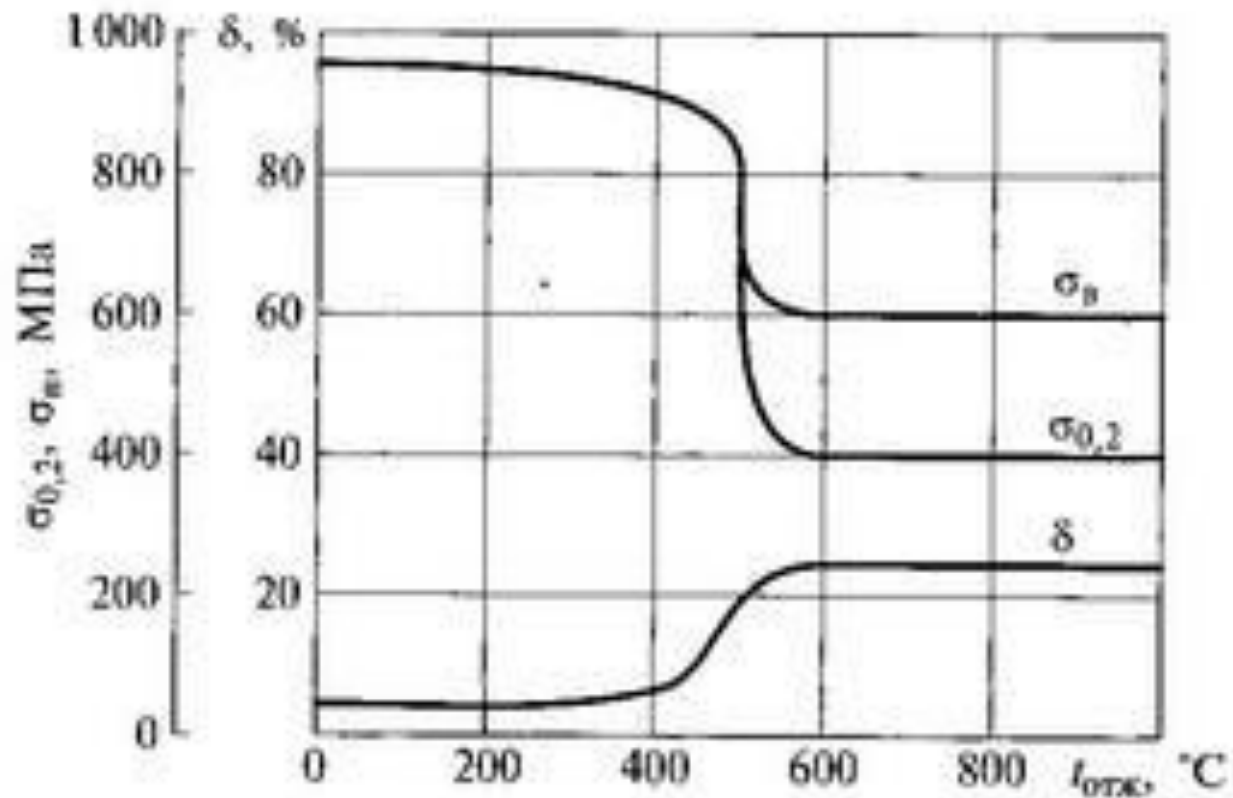


Рис. 2.31. Влияние нагрева на механические свойства наклепанного металла;

σ_B — предел прочности; δ — относительное удлинение; $\sigma_{0,2}$ — напряжение, при котором остаточная деформация равна 0,2% от первоначальной длины образца.

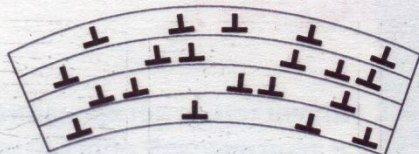
Температура начала рекристаллизации зависит от природы металла — его температуры плавления, а также от того, чистый это металл или сплав. Учитывающий коэффициент — коэффициент, зависящий от чистоты металла и типа сплава, для технически чистых металлов и сплавов он составляет 0,3...0,4, для сплавов типа твердый раствор — 0,5...0,6, а в некоторых случаях достигает 0,8.

Возврат

- **Первая** стадия – возврат, происходит при температурах (0,1 - 0,3 Тпл). При возврате микроструктура не изменяется, уменьшаются внутренние напряжения. Механические свойства изменяются незначительно (на 10 - 15 %). В процессе возврата выделяют 2 стадии отдых и полигонизацию.
- При **отдыхе** ($T = 0,2 T_{пл}$) наблюдается снижение количества точечных дефектов, особенно вакансий.
- При **полигонизации** ($T = 0,3 T_{пл}$) происходит перераспределение дислокаций. Скользя и переползая, они выстраиваются в стенки, образуя внутренние субграницы, разделяющие кристалл на отдельные участки - полигоны. Образующиеся дислокационные структуры отличаются высокой устойчивостью к силовым и температурным воздействиям. Полигонизованная структура применяется для упрочнения материалов

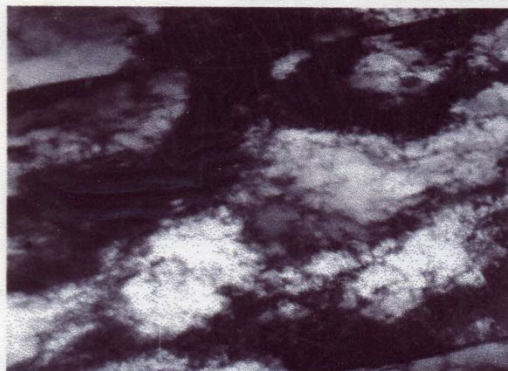
ПОЛИГОНИЗАЦИЯ

Схема полигонизации

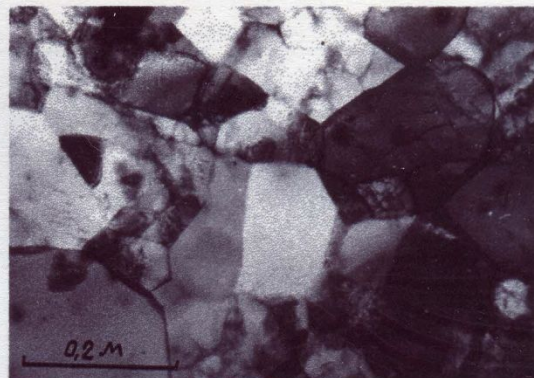


Изменение структуры при нагреве

Структура после
холодной деформации



Структура после
полигонизации

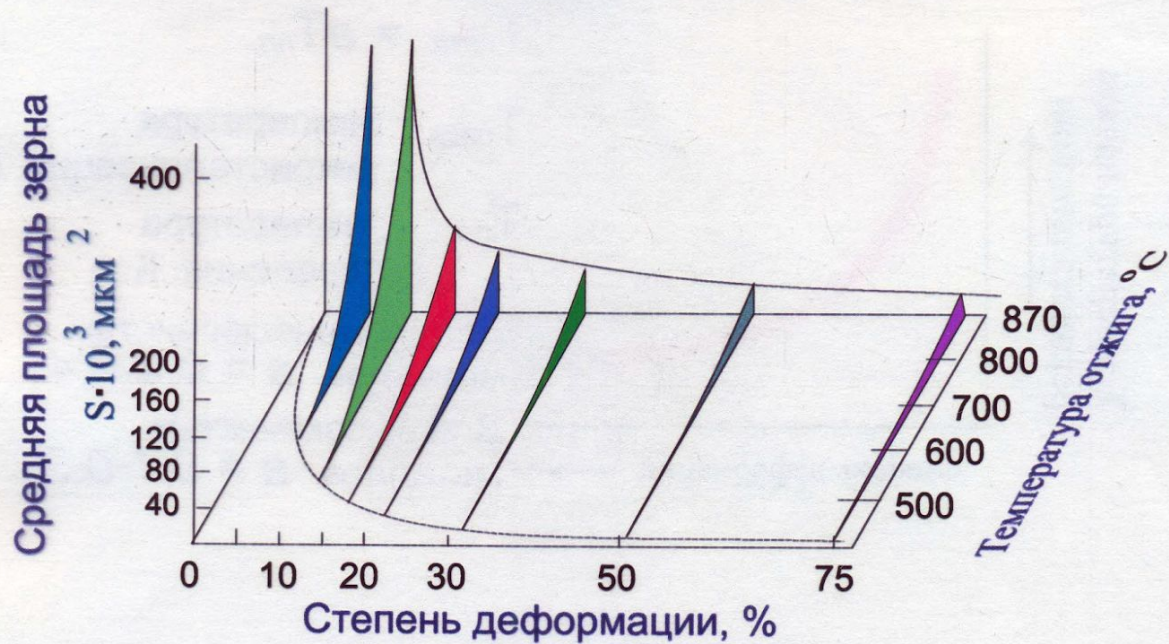


Изменение размера зерна при рекристаллизации

\bar{D} - средний размер рекристаллизованного зерна



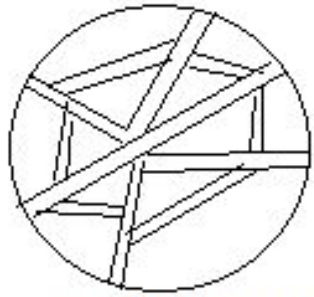
Диаграмма рекристаллизации железа



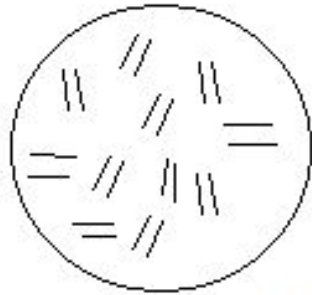
Собирательная

рекристаллизация

- собирательная рекристаллизация идет при высоких температурах по отношению к температуре рекристаллизации. При этом происходит интенсивное укрупнение образовавшихся зерен. Процесс вызван стремлением к уменьшению поверхностной энергии. Крупные зерна растут, поглощая мелкие.
- Собирательная рекристаллизация нежелательна. Укрупнение зерна сопровождается потерей прочности. Свойства металлов после рекристаллизации зависят от размера зерна и наличия текстуры. Размер зерна в свою очередь зависит от температуры нагрева и степени пластической деформации.



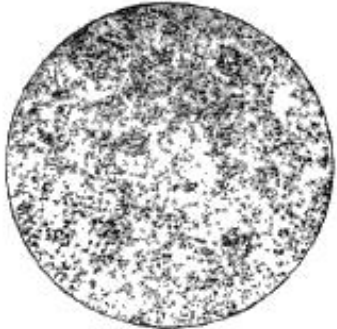
крупноигольчатый



мелкоигольчатый

- **Мартенситное.** Данный способ упрочнение предполагает, что исходная фаза превращается в новую фазу без изменения состава. Механизм обеспечивается бездиффузионными превращениями.

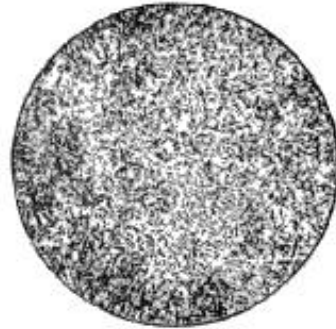
ШКАЛА 3
Мартенсит 1000



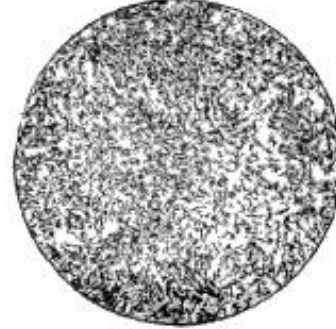
Балл 1



Балл 2



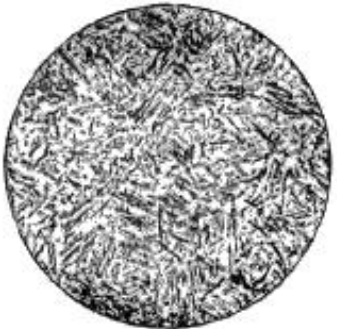
Балл 3



Балл 4



Балл 5



Балл 6



Балл 7



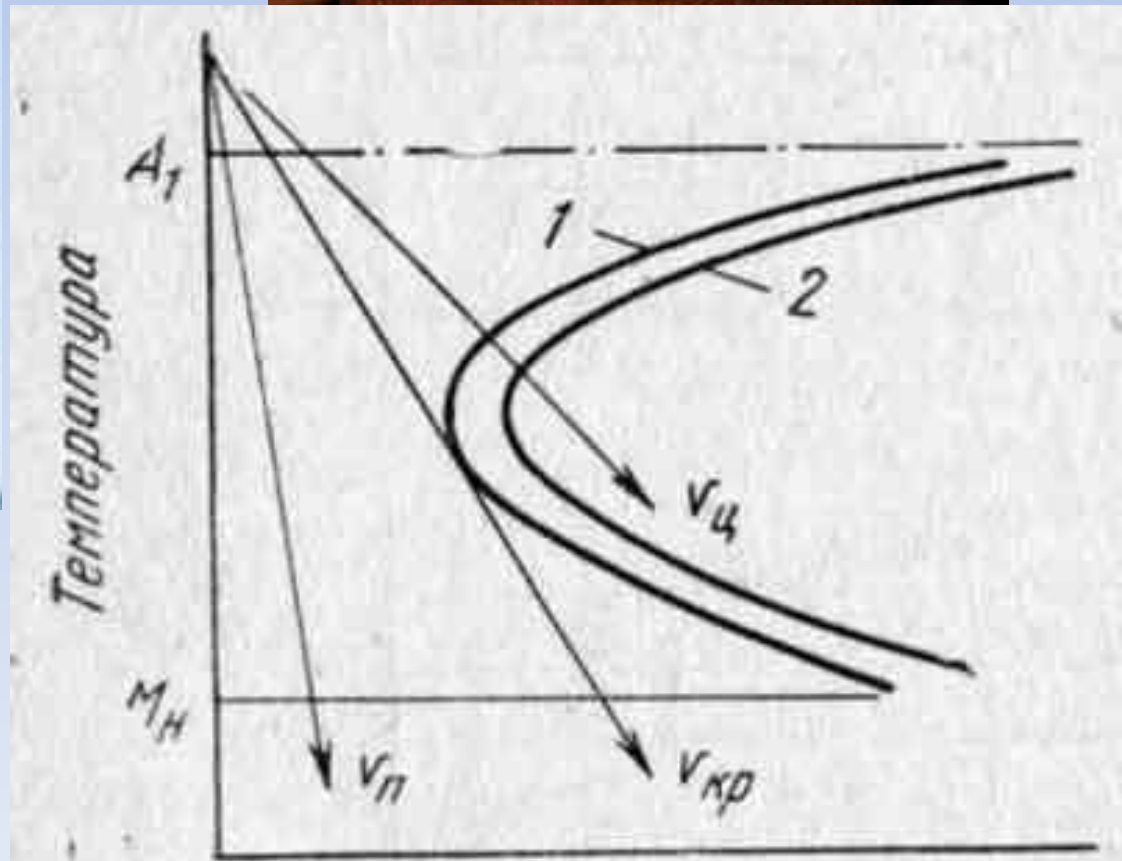
Балл 8



Балл 9

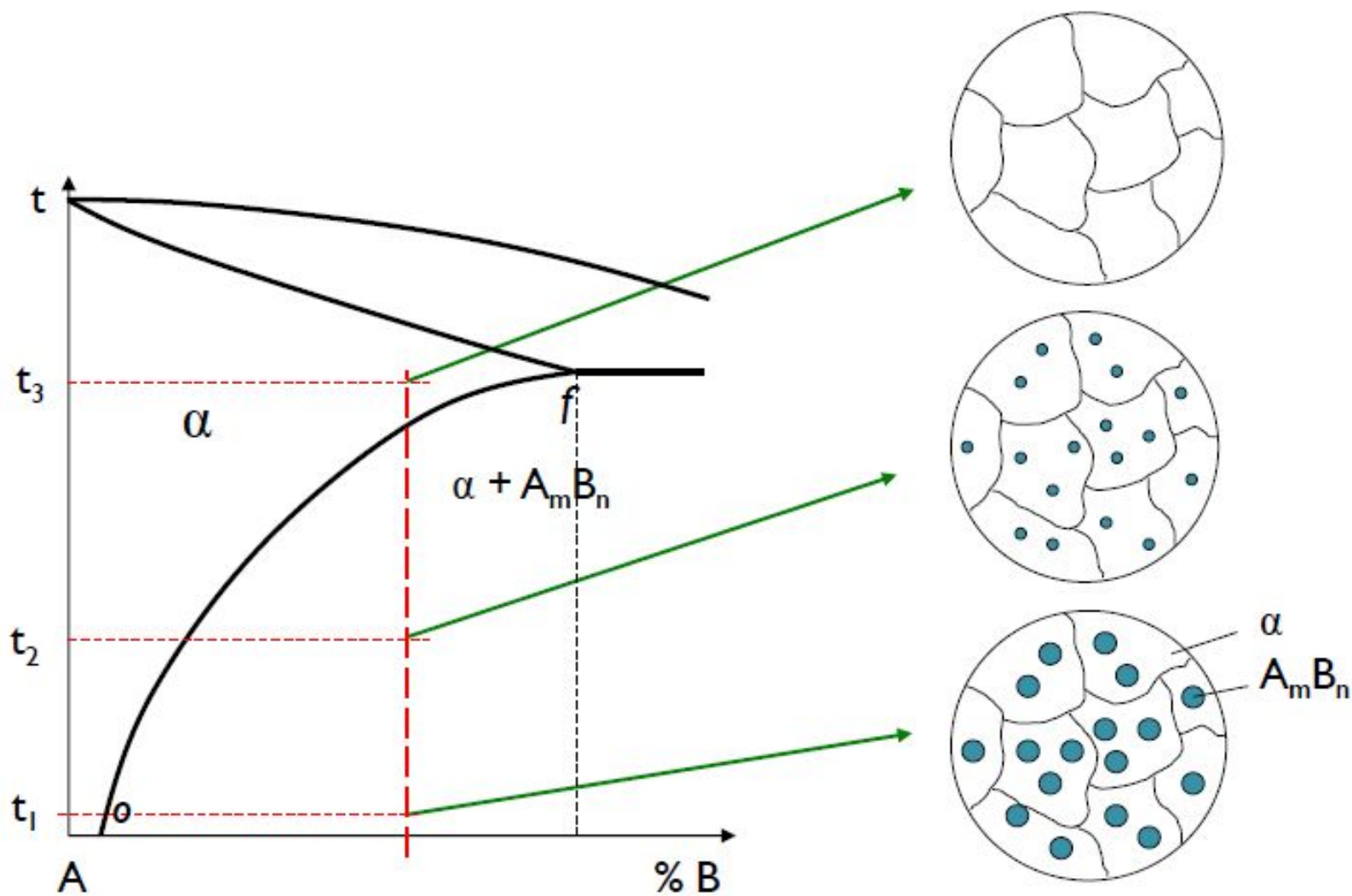


Балл 10



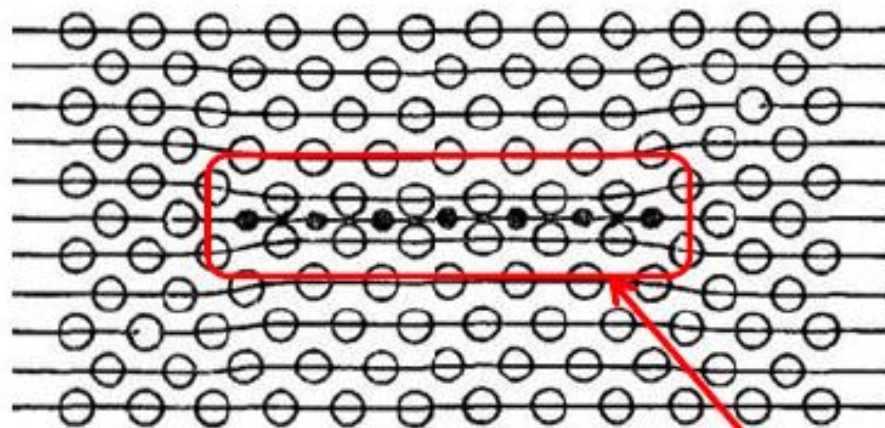
Дисперсионное. Упрочнение частицами избыточных фаз, выделившихся в результате распада пересыщенного твердого раствора. Определяющими факторами является расстояние между выделившимися частицами. Если расстояние мало (от 15 до 30 нм), то для движения дислокаций требуется значительное напряжение. Линии дислокаций вынуждены изгибаться и продавливаться между частицами, оставляя вокруг них дислокационные петли, что уменьшает расстояние между частицами. Оно возможно при введении в сплав элементов, образующих частицы карбидов, нитридов. Характерен для гетерогенных сплавов, подвергаемых старению и закалке.

6.2. Термическая обработка сплавов с переменной растворимостью компонентов



I стадия – стадия образования зон Гинье-Престона (ГП)

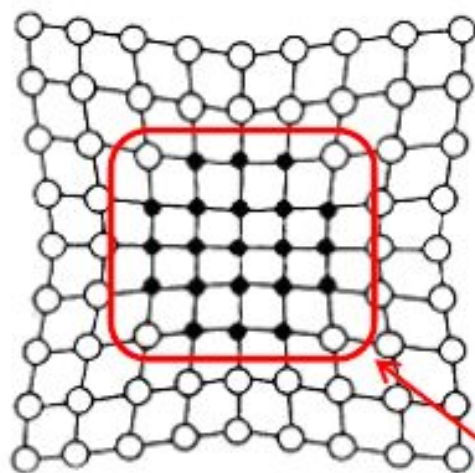
Зоны ГП – скопления атомов пересыщающего компонента (В) в виде дисков, сфер, игл и т.п. размером 20...30Å.



Свойства зон ГП:

- вокруг зон ГП решетка твердого раствора **искажена**, что вносит **упрочнение**, т.к. затрудняет перемещение дислокаций;
- упрочнение тем больше, чем больше разница размеров атомов А и В;
- чем сильнее пересыщен раствор, тем больше образуется зон ГП, и тем больше упрочнение.

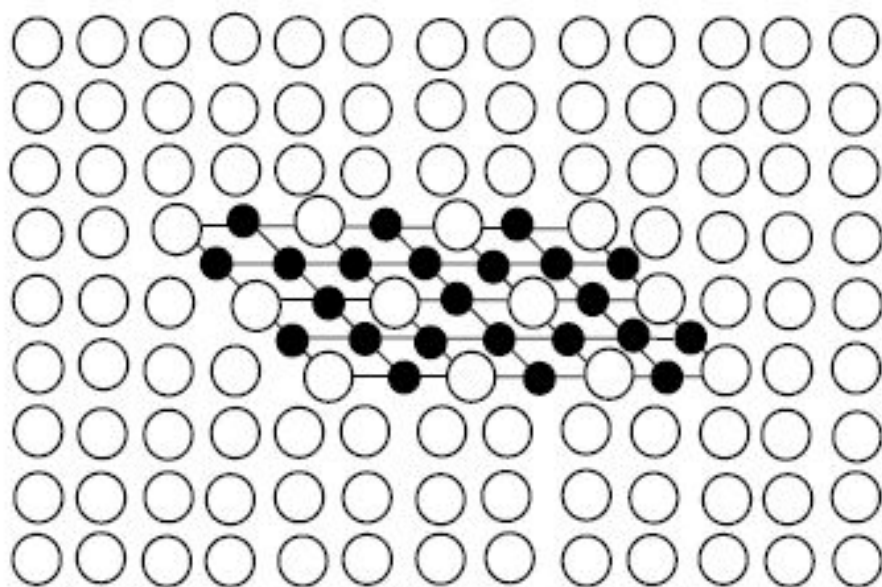
II стадия – образование частиц метастабильной фазы (МФ).
Размер частиц МФ 50...150 Å.



Свойства частиц метастабильной фазы:

- решетки твердого раствора и частиц МФ **когерентны**;
- вблизи частиц МФ решетка твердого раствора искажена, сплав с такими частицами становится **прочнее**.

III стадия - образование частиц стабильной фазы $A_m B_n$.
Размер частиц 200...500 Å

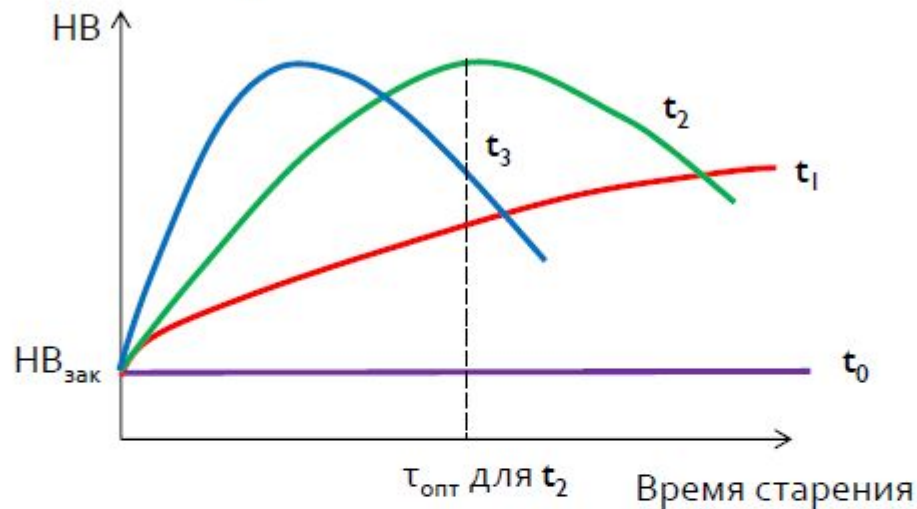


Свойства частиц стабильной фазы:

- решетки твердого раствора и частиц $A_m B_n$ **некогерентны**;
- вблизи частиц $A_m B_n$ решетка твердого раствора не искажена, при образовании таких частиц сплав **разупрочняется** (перестаривание).

Выбор режима старения

Режим старения выбирают так, чтобы достичь максимального упрочнения сплава (добиться образования зон ГП и/или частиц метастабильной фазы)



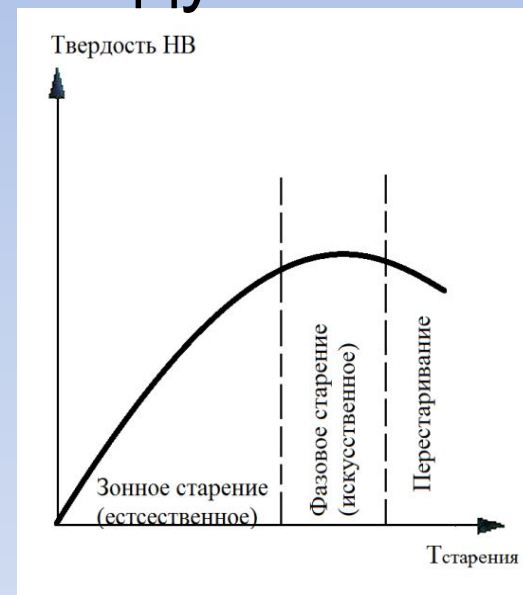
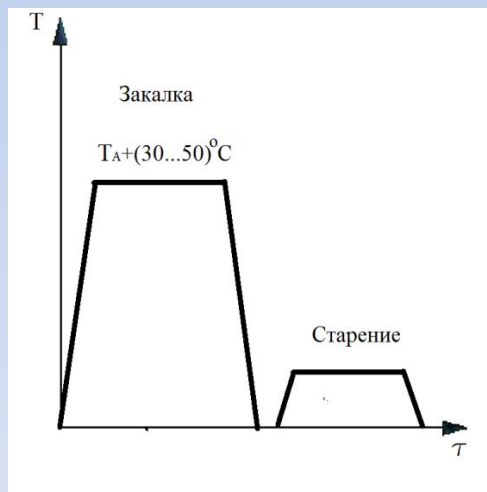
Примеры стареющих (дисперсионотвердеющих) сплавов

Сплав	Т-ра закалки, °С	Режим старения
Al + Cu (дуралюмины)	500	180 °С 4...6 ч 20 °С 4 суток (естественное старение)
Cu + Be (бериллиевые бронзы)	770	300 °С 4...6 ч
Ni + Al + Cr (нимоники)	1100	750 °С 10...16 ч

Дисперсионное упрочнение

Это упрочнение частицами избыточных фаз, выделившихся в результате распада пересыщенного твердого раствора.

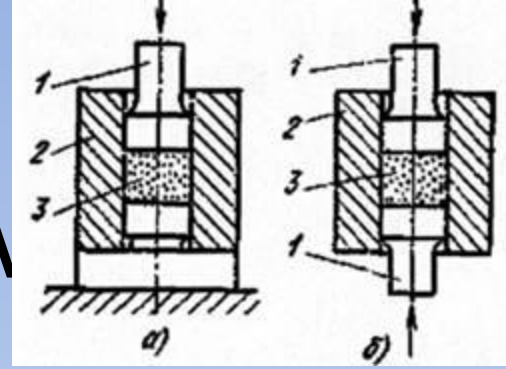
Определяющий фактор- расстояние между выделившимися частицами.



Если данная фаза выделяется без подготовительных процессов, то обработка называется **дисперсионным твердением**. Если выделению упрочненной фазы предшествуют сложные подготовительные процессы, то такая обработка называется **старением**.

Дисперсное.

Спеченные порошки. КМ

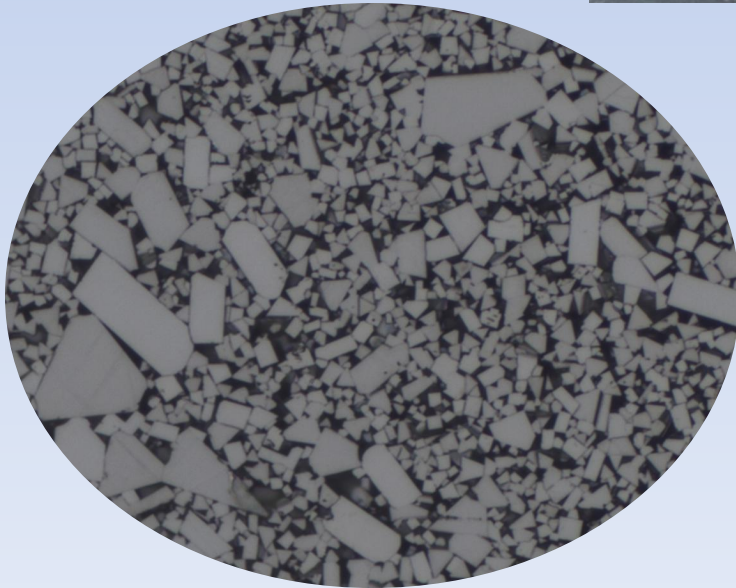


- В связующий компонент которых (матрицу) включены в армирующие элементы в виде специально вводимых частиц.
- Оптимальным образом подобранным распределением включений достигается значительное **повышение прочности** такого материала по сравнению с материалом матрицы.





- **Порошковая металлургия** — технология получения порошков и изготовления изделий из них (или их композиций с неметаллическими порошками). Применяется как экономически выгодная замена механической обработки при массовом производстве. Технология позволяет получить высокоточные изделия. Также применяется для достижения особых свойств или заданных характеристик, которые невозможно получить каким-либо другим методом.



Порошковая металлургия развивалась и позволила получить новые материалы — псевдосплавы из несплавляемых литьём компонентов с управляемыми характеристиками: механическими, магнитными, и др. Изделия порошковой металлургии сегодня используются в широком спектре отраслей, от автомобильной и аэрокосмической промышленности до электроинструментов и бытовой техники. Технология продолжает развиваться.



- Таким образом, достаточно высокого уровня прочности благодаря использованию комбинаций различных механизмов упрочнения не представляет большей трудности. **Проблема повышения конструкционной прочности** в том, как при высоких прочностных показателях обеспечить высокое сопротивление хрупкому разрушению.

Например: в *углеродистой стали с содержанием углерода 0,4% закалкой на M и низким отпуском достигается $\sigma_{\epsilon} = 2800$ МПа.*

- *При такой прочности стали показатель КСТ~0.*

Методы отделочно-упрочняющей обработки деталей машин подразделяются на 6 основных классов:

- **-упрочнение с образованием пленки на поверхности** оксидирование, сульфидирование, фосфатирование, нанесение упрочняющего смазочного материала, катодно-ионная бомбардировка, прямое электронно-лучевое испарение, реактивное электроннолучевое испарение, электронно-химическое испарение, электролитическое осаждение
- **-с изменением химического состава поверхностного слоя** диффузионное насыщение, ионная имплантация, электроискровая обработка
- **-с изменением структуры поверхностного слоя** лазерная закалка, плазменная закалка, электрофизическая обработка (электроконтактная, электроэрозионная, магнитная обработка); фрикционно-упрочняющая обработка, дробеструйная, обработка взрывом, термомеханическая, электромеханическая
- **-с изменением энергетического запаса поверхностного слоя** обработка в магнитном поле (термомагнитная обработка, импульсным магнитным полем, магнитным полем); обработка в электрическом поле.
- **-с изменением микрогеометрии поверхности и наклепом** обработка резанием, пластическое деформирование (накатывание, обкатывание, раскатывание, выглаживание, вибронакатывание, вибровыглаживание, калибрование, центробежно-ударное упрочнение, виброударное и комбинированные методы (анодно-механическая, поверхностное легирование с выглаживанием, резание с воздействием ультразвуковых колебаний, магнитно-абразивная обработка...
- **-с изменением структуры по всему объему материала** термомагнитная обработка; криогенная обработка: термоциклирование

Структурные факторы повышения прочности

Структурные факторы		Зависимость предела текучести от структурных факторов	Способы повышения прочности
Повышение плотности дислокаций		$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha b G \sqrt{\rho}$ <p>где σ_0 - предел текучести материала после отжига (с малой плотностью дислокаций $\rho \approx 10^6 \text{ см}^{-2}$); α – константа; b – вектор Бюргерса дислокации; G – модуль сдвига.</p>	Холодная пластическая деформация и термическая обработка при мартенситном превращении
Создание дислокационных барьеров	Уменьшение диаметра зерна	$\sigma_T = \sigma_0 + k/\sqrt{d}$ <p>где σ_0 - предел текучести матрицы (сопротивление движению дислокаций без границ); k – коэффициент; d – диаметр зерна.</p>	Модифицирование сплавов при выплавке, повышение скорости охлаждения при кристаллизации; отжиг при фазовой перекристаллизации сталей, рекристаллизационный отжиг металлов и сплавов
	Упрочнение частицами второй фазы	$\sigma_T = \sigma_0 + (\alpha\sqrt{f})/d$ <p>где σ_0 - предел текучести матрицы (сопротивление движению дислокаций без частиц второй фазы); α - коэффициент; f – объемная доля частиц второй фазы; d – диаметр частиц второй фазы</p>	Термическая обработка сплавов с переменной растворимостью в твердом состоянии: закалка и старения
Образование полей упругих напряжений		$\sigma_T = 2,5G \cdot \epsilon_p^{4/3} \cdot C$ <p>где G – модуль сдвига; ϵ_p - степень искажения решетки растворителя; $\epsilon_p = (r_b - r_a)/r_a$, где r_a - радиус атома растворителя; r_b - радиус атома растворенного компонента; C - концентрация растворенных атомов</p>	Легирование твердых растворов

Формированию благоприятной структуры и обеспечению надежности способствует

- **Повышение металлургического качества материалов** (удаление вредных примесей, газообразных элементов (H, O, N) и зависящих от их содержания неметаллических включений)
- **Рациональное легирование** (Рациональное легирование предусматривает введение нескольких элементов при невысокой концентрации каждого из них)
- **Механическая обработка**
- **Термическая обработка**
- **Формирование КМ**

Современное машиностроение- обширная и многоплановая отрасль , характерной особенностью, которой является огромное разнообразие машин и механизмов различным по конструкциям , различным средам, температурным условиям работы.

Машиностроительные материалы можно разделить:

1)конструкционные (95%);

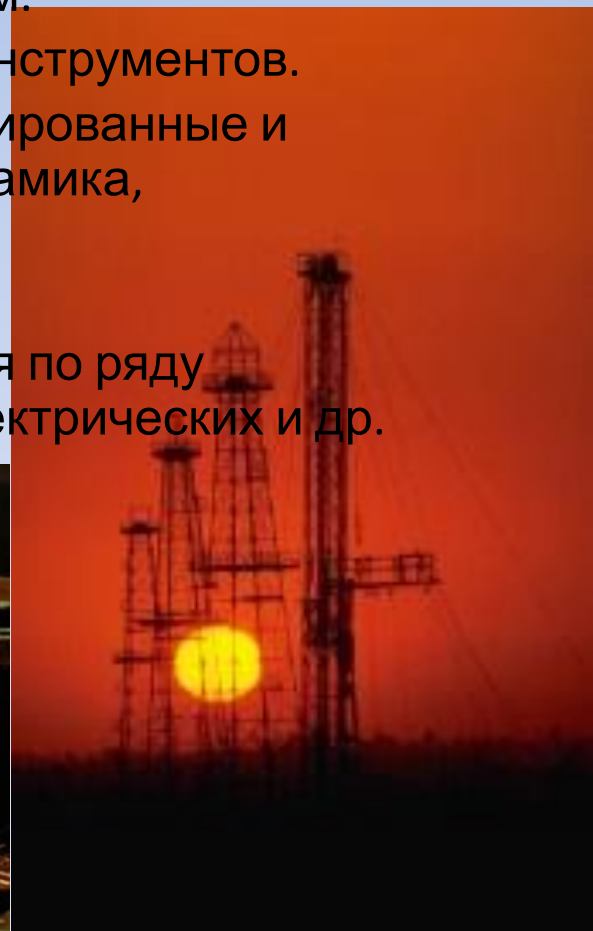
Применяются для изготовления деталей машин , приборов, инженерных конструкций, подвергающихся механическим нагрузкам.

2)инструментальные- оснащение рабочей части инструментов.

К ним относятся инструментальные углеродистые, легированные и быстрорежущие стали, твердые сплавы, минералокерамика, сверхтвердые материалы.

3)с особыми физическими свойствами.

Относятся те, работоспособность которых оценивается по ряду физических свойств: теплофизических, магнитных, электрических и др.

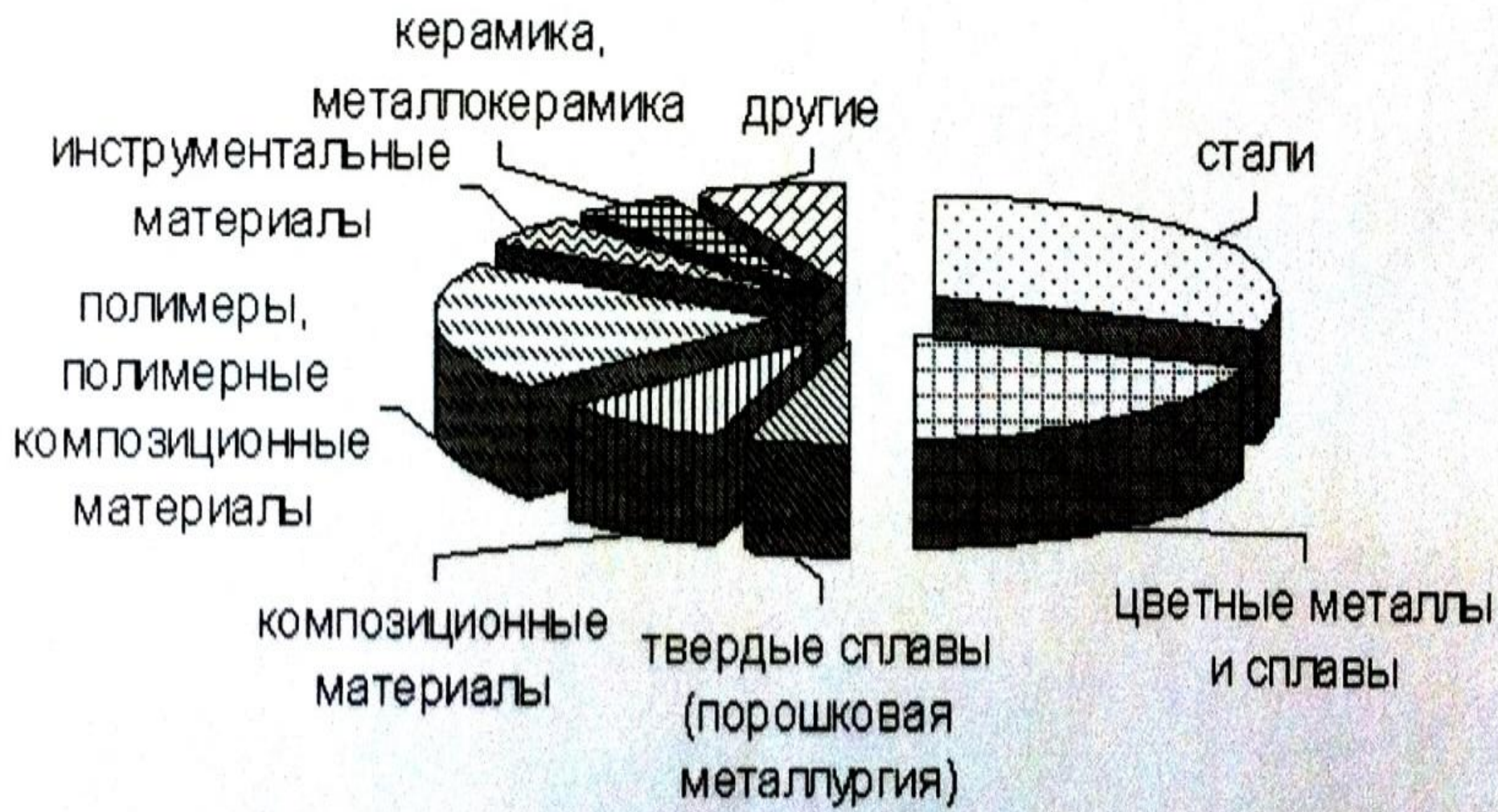


Применение в машиностроении тех или иных материалов определяется:

- доступностью исходного сырья;
- трудоемкостью получения полуфабрикатов и изделий;
- многообразием возможностей изменения свойств.



Железорудный концентрат, экспорт



- **Классификация конструкционных материалов**
- Конструкционные материалы классифицируют по химическому составу и по назначению и преобладающим свойствам.
- По химическому составу конструкционные материалы разделяют по основному элементу на: стали (сплавы на основе железа), медные сплавы, алюминиевые сплавы, титановые сплавы, магниевые сплавы и другие.
- По назначению и преобладающим свойствам конструкционные материалы разделяют на следующие группы: стали, обеспечивающие жесткость, статическую и циклическую прочность; материалы с особыми технологическими свойствами; износостойкие материалы; материалы с высокими упругими свойствами; материалы с малой плотностью; материалы с высокой удельной прочностью; материалы устойчивые к воздействию