

**Харьковский национальный автомобильно - дорожный
университет**



Конструкционная прочность и методы её повышения

Проф. Дощечкина И.В.

Харьков. ХНАДУ. 2020



Лекция 1

Свойства материалов

Содержание

1. Надежность и долговечность изделий. Факторы на них влияющие.
2. Свойства материалов.
 - 2.1. Механические свойства металлов и сплавов.
 - 2.1.1. Прочность. Характеристики прочности.
 - 2.1.2. Пластичность
 - 2.1.3. Усталостная прочность.
 - 2.1.4. Твердость материалов.

1.Надёжность и долговечность изделий.

Факторы, на них влияющие.

НАДЕЖНОСТЬ – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять необходимые функции в заданных режимах эксплуатации, технического обслуживания, хранения и транспортировки.

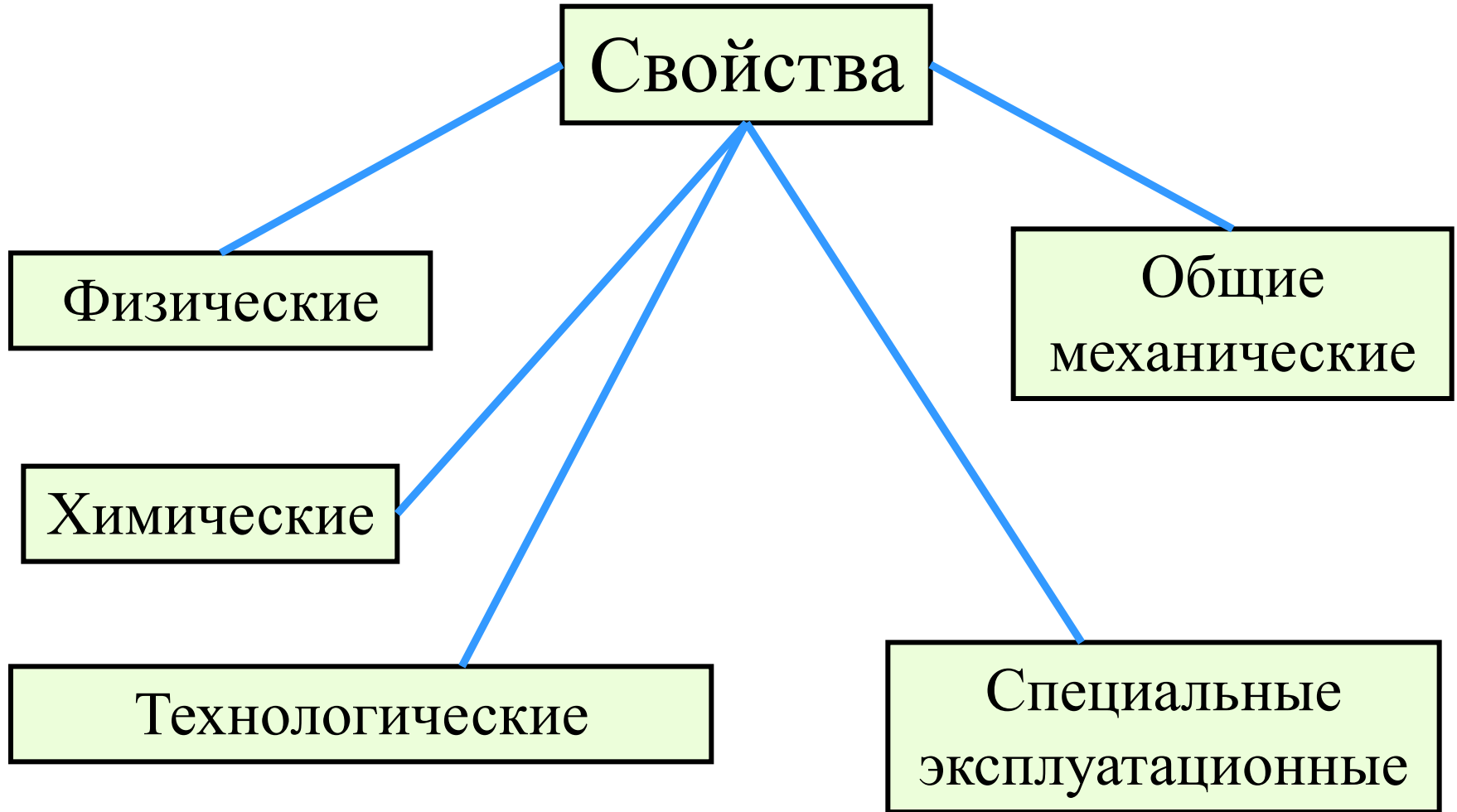
НАДЕЖНОСТЬ характеризует вероятность того, что не возникнет отказ, т.е. нарушение работоспособного состояния объекта вследствие деформации, изнашивания, коррозии, разрушения и т.п.

Факторы, влияющие на надежность и долговечность

1. Правильность конструкторского решения.
2. Технология изготовления изделия и культура производства.
3. Условия эксплуатации и обслуживания машин.
4. Качество и свойства материала.

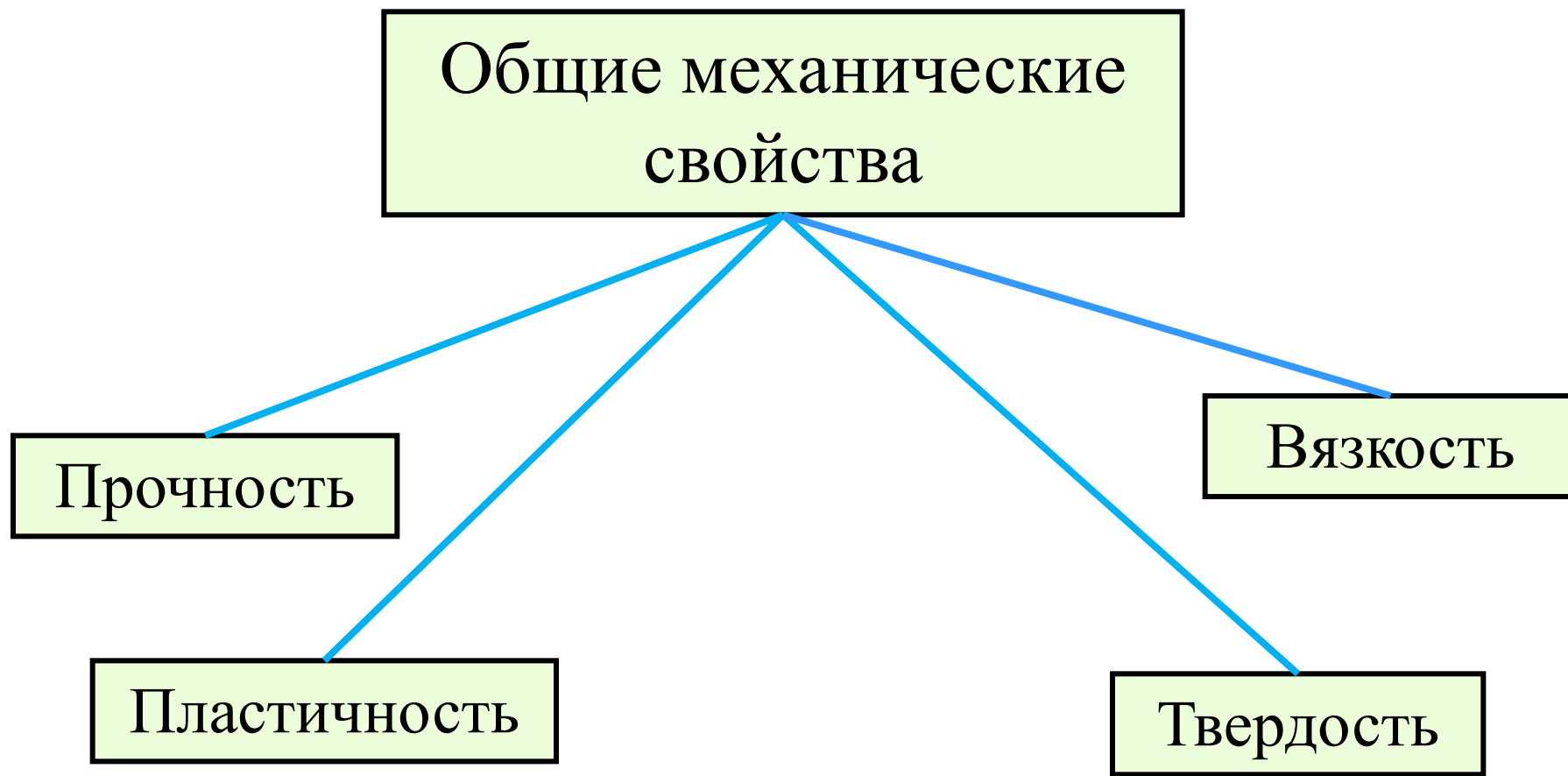
2.Свойства материалов

В зависимости от условий работы материал изделия должен обладать определенными свойствами.

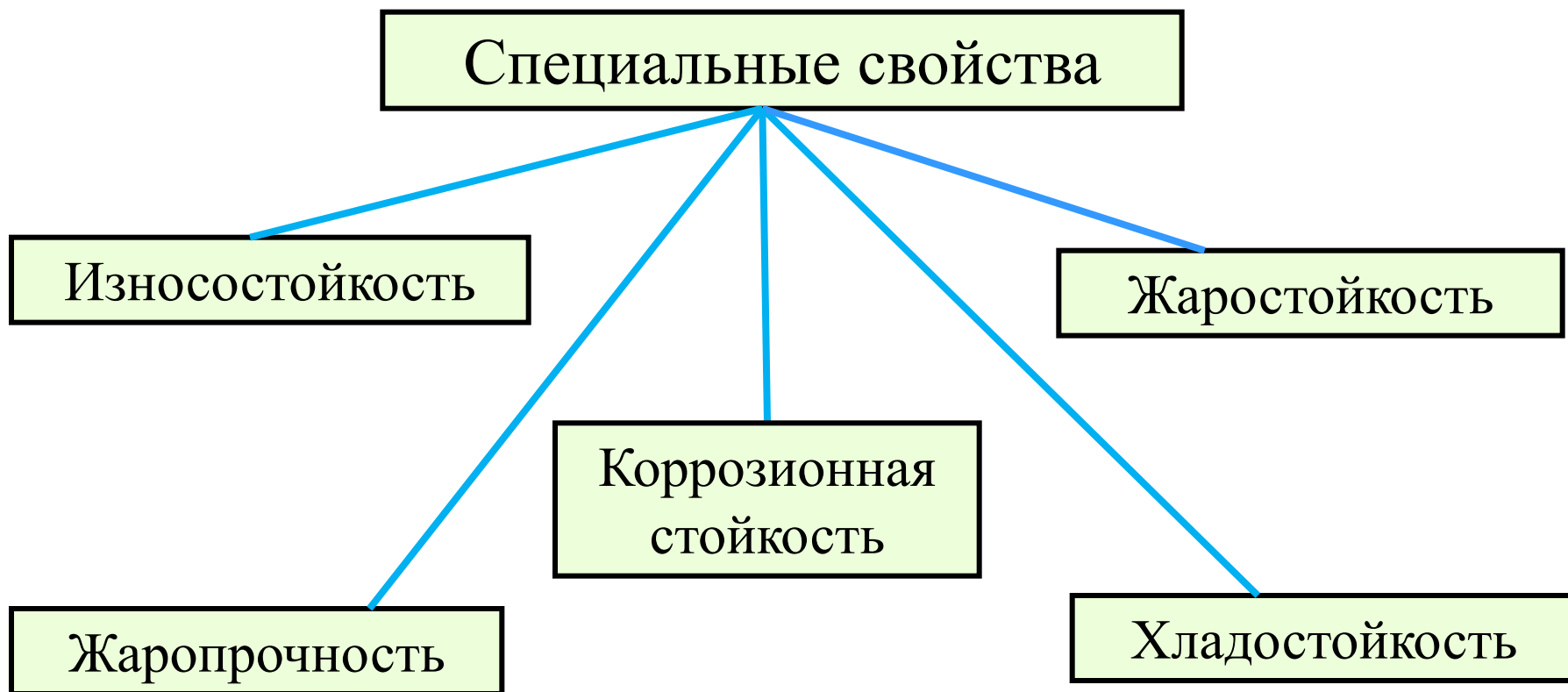


2.1. Механические свойства металлов и сплавов

Общие стандартные механические свойства учитываются для любых изделий независимо от условий эксплуатации.



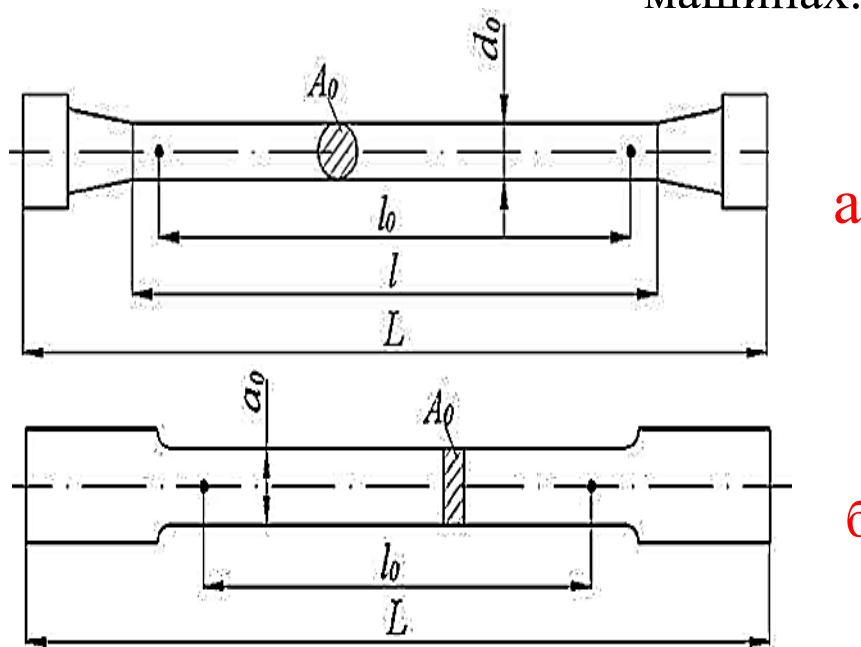
Специальные свойства становятся главными в
конкретных условиях эксплуатации деталей машин



2.1.1. Прочность. Характеристики прочности.

Прочность — это способность материала сопротивляться деформации и разрушению.

Характеристики прочности определяют при статических **испытаниях** образцов **на растяжение** (ДСТУ 2824.94) на специальных разрывных машинах.



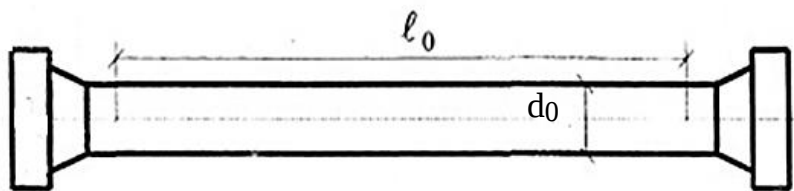
а

б

Стандартные образцы для испытаний на растяжение: **а** — цилиндрический; **б** — плоский.

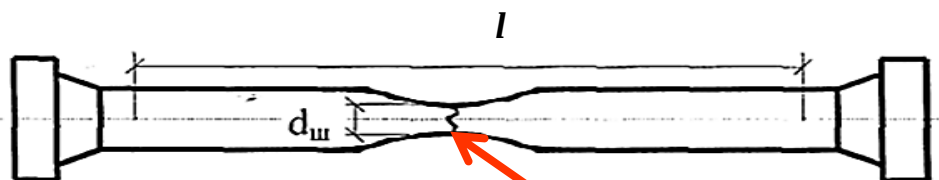


До нагружения с максимальной силой $P_{\max}$ образец деформируется равномерно. При усилиях больших $P_{\max}$ в наиболее слабом месте происходит утонение образца - образуется шейка.



а

а - образец до испытания на растяжение.



б

Шейка

б - образец после испытания

Разрушение образца происходит в шейке.

Испытание на растяжение

Разрывная машина
марки UIT STM с
программным
управлением



Образец
закрепляется в
захватах машины и
подвергается
одноосному
растяжению до
разрушения.



Испытание на разрыв.avi

[1]



Исходный
образец.



Образец после
испытания.

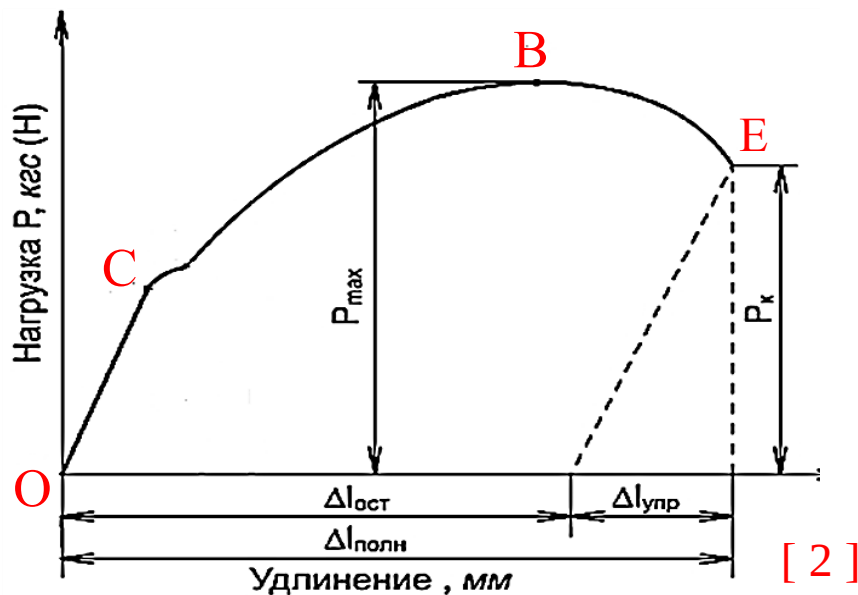


Диаграмма растяжения

При растяжении записывается зависимость между растягивающей силой P и вызванной ею деформацией Δl (абсолютное удлинение образца):

$$P = f(\Delta l)$$

Эта зависимость называется **диаграммой или кривой растяжения**, она характеризует поведение материала при деформировании от момента начала нагружения до разрушения образца.



На диаграмме выделяют **три участка:**

ОС — упругая деформация.

СВ — равномерная пластическая деформация.

ВЕ — сосредоточенная пластическая деформация.

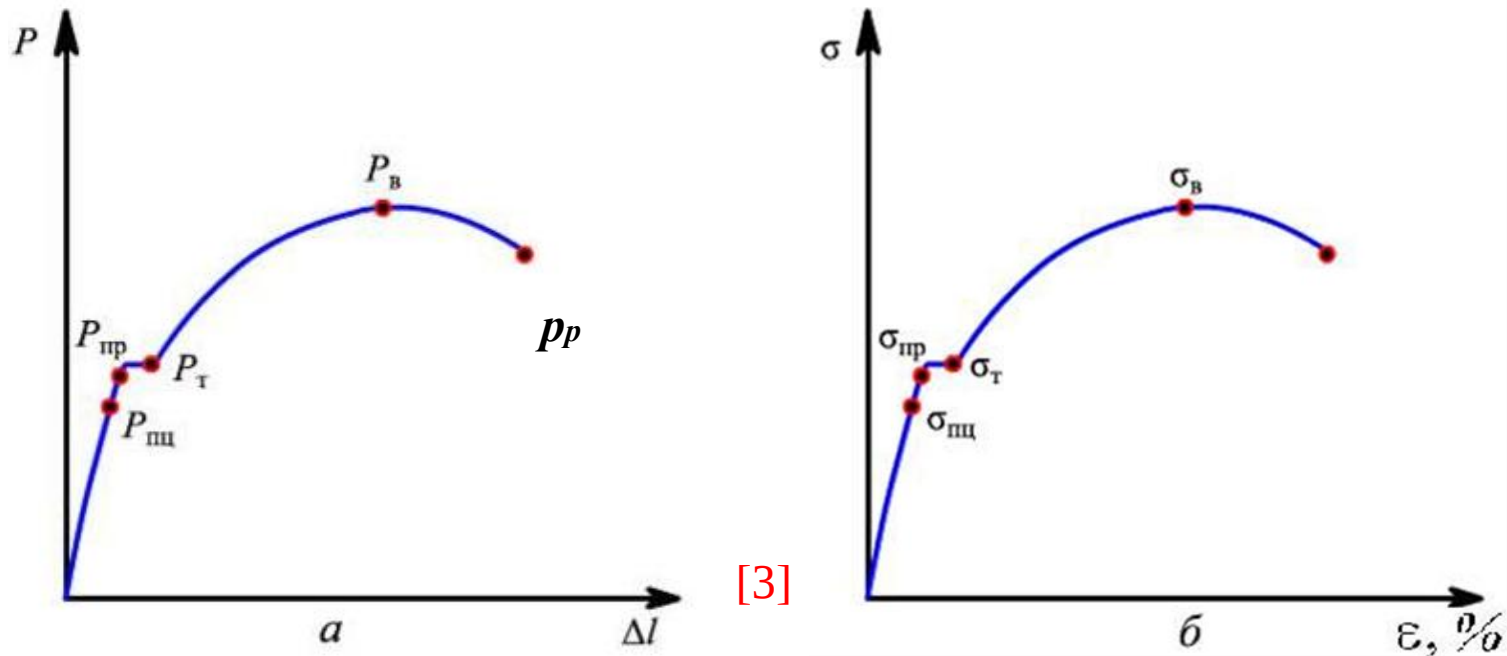
От **В** до **Е** нагрузка уменьшается и при P_k **происходит разрушение образца.**

Напряжение

Во избежание зависимости нагруженности от размеров и формы изделия при расчётах пользуются не силой, а удельной нагрузкой, которая называется напряжением.

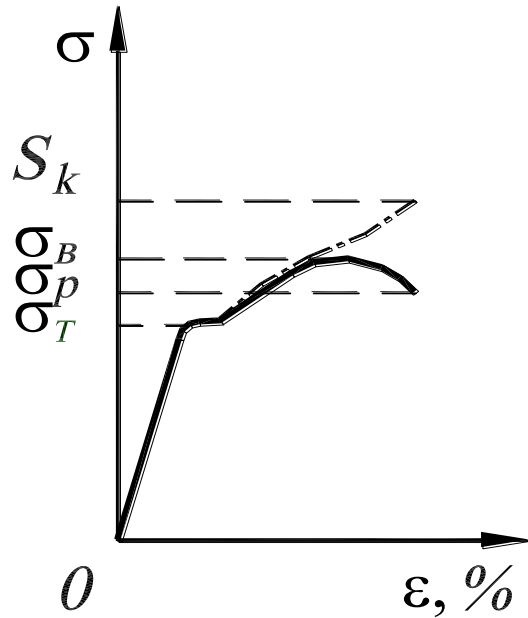
Напряжение σ — это сила P , отнесённая к площади поперечного сечения F .

$$\sigma = P/F, \text{ Н/мм}^2 \text{ (МПа)}$$

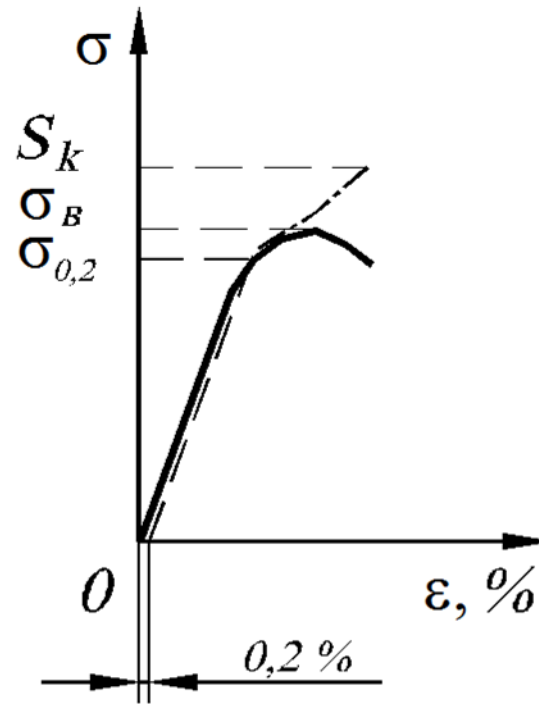


Диаграммы, полученные при испытаниях на растяжение, используют для определения характеристик прочности и пластичности.

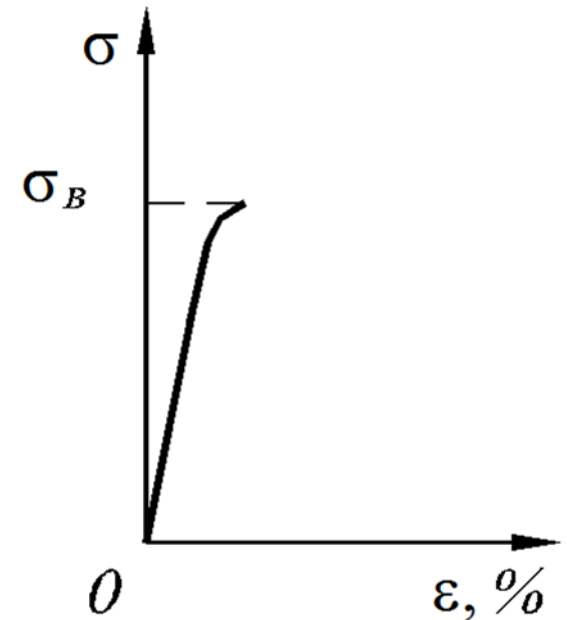
Типичные кривые напряжение - деформация



**Малопрочный
материал с высокой
пластичностью**



**Материал с достаточной
прочностью и
пластичностью**

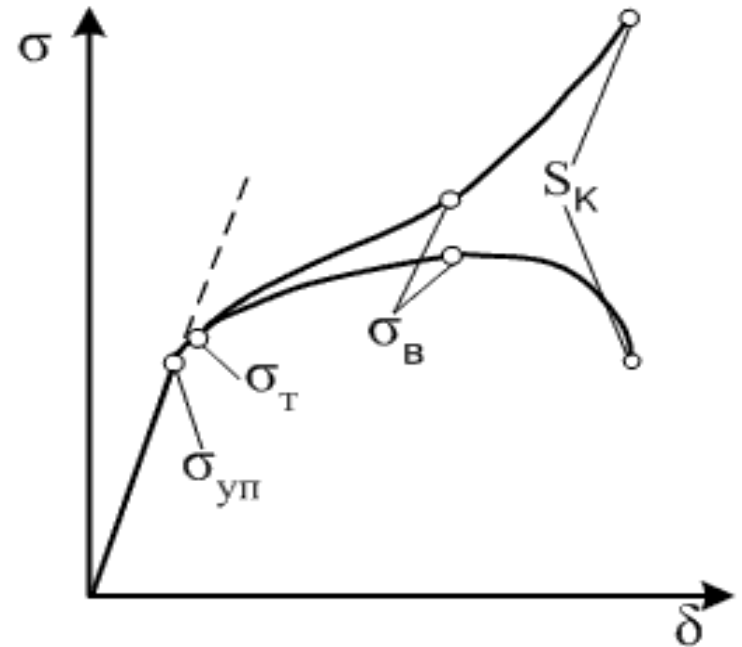


**Хрупкий
материал**

Различают действительные (истинные) S и условные (номинальные) напряжения σ .

Действительное напряжение – отношение действующей в данный момент силы к площади поперечного сечения образца в тот же момент нагружения.

Номинальное напряжение – отношение силы в данный момент нагружения к начальной площади поперечного сечения образца



S_K – действительное сопротивление разрушению

$$S_K = P_p / F, \text{ где}$$

P_p – усилие, при котором происходит разрушение,

F – площадь поперечного сечения в месте разрушения.

Характеристики прочности материала

$\sigma_{0,05}$ и $\sigma_{0,005}$ - условный предел упругости,

$$\sigma_{0,05} = P_{0,05} / F_0 \quad \text{или} \quad \sigma_{0,005} = P_{0,005} / F_0,$$

где F_0 - начальная площадь поперечного сечения образца.

σ_T - физический предел текучести, $\sigma_T = P_T / F_0$

$\sigma_{0,2}$ - условный предел текучести, $\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0$

σ_B - временное сопротивление, $\sigma_B = P_{max} / F_0$

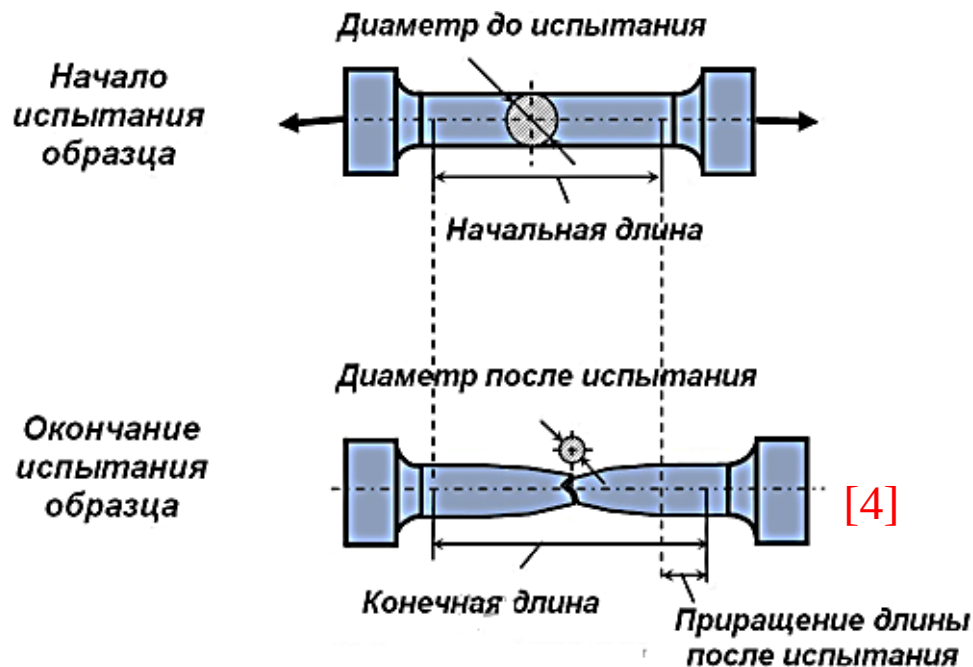
S_K - действительное сопротивление разрушению.

Показатели $\sigma_{0,05}$, $\sigma_{0,005}$, σ_T , $\sigma_{0,2}$ характеризуют сопротивление материала деформации, а σ_B и S_K - сопротивление разрушению.

2.1.2. Показатели пластичности

Это – свойство материала **необратимо** изменять свои размеры и форму без разрушения.

Основными показателями пластичности являются **относительное удлинение δ** и **относительное сужение ψ** .



$$\delta = (l - l_0) / l_0 \cdot 100, \%$$

l_0 - начальная длина,

l - длина после испытания.

$$\psi = (F_0 - F) / F_0 \cdot 100, \%$$

F_0 - начальная площадь поперечного сечения,

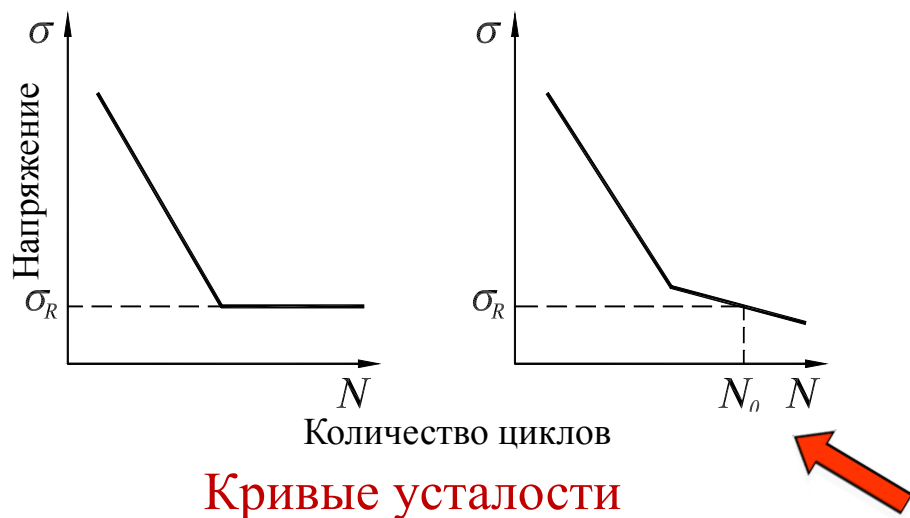
F – после испытания.

Особенно важным является относительное сужение, характеризующее способность металла к местной пластической деформации.

2.1.3. УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ

При эксплуатации в условиях циклических нагрузок (валы, шестерни, оси, колеса, пружины) развивается явление усталости материала при напряжениях ниже предела текучести, которое приводит к снижению эксплуатационной стойкости изделий.

Усталость – процесс постепенного накопления в металле повреждений, которые приводят к появлению и развитию трещины, и к разрушению



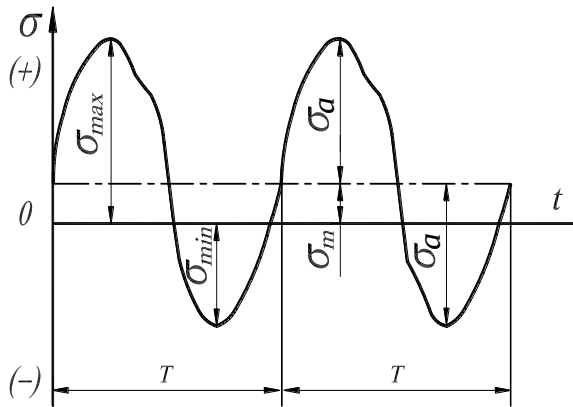
Свойство материала противостоять усталостному разрушению называется сопротивлением усталости или усталостной прочностью.

Важнейшей характеристикой ее является предел выносливости σ_R .

Его определяют по кривым усталости в координатах максимальная величина напряжения цикла – количество циклов, вызвавших разрушение

Более 80% всех случаев эксплуатационных отказов происходит по причине усталостного разрушения.

Предела выносливости



Циклические напряжения,
изменяющиеся по
синусоидальному закону.

Предел выносливости определяют
на вращающемся образце с
приложением изгибающей нагрузки
по симметричному циклу.

Образец испытывают на одном уровне напряжений до разрушения или
до базового количества циклов. По результатам испытаний **строят**
кривые усталости.

$\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$, σ_m - максимальные, минимальные и
средние напряжения.

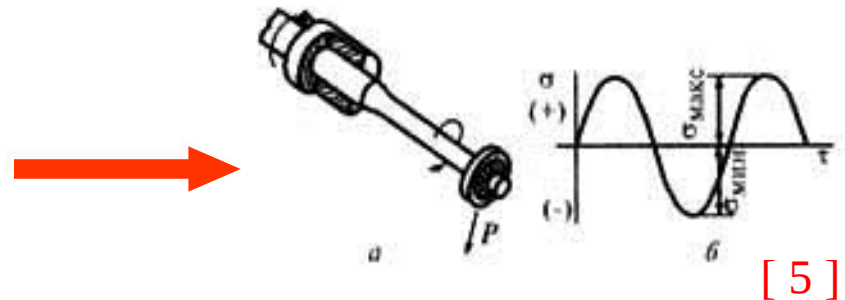
T – период циклов.

Коэффициент асимметрии цикла $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$

При симметричном цикле

$$|\sigma_{\max}| = |\sigma_{\min}| \text{ и } R = -1$$

предел выносливости обозначается σ_{-1}

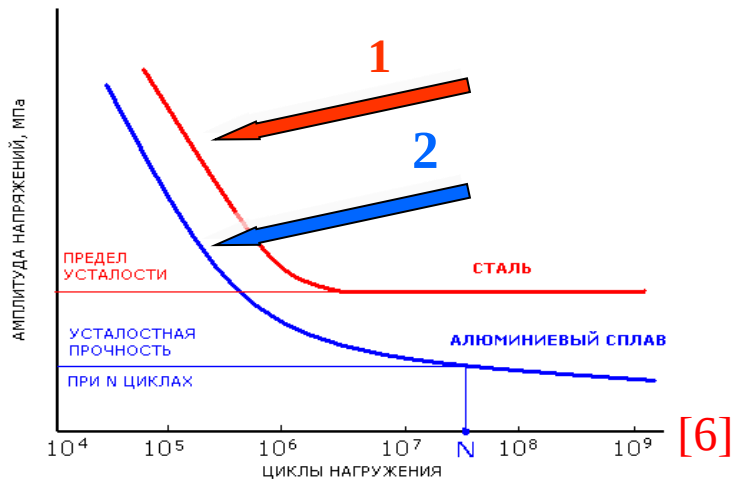


[5]

Определение предела выносливости

Предел выносливости – значение максимального напряжения цикла, при котором не происходит усталостное разрушение после произвольно большого или заданного числа циклов нагружения N .

Кривые усталости могут быть двух видов.



Кривая **2** присуща цветным металлам, сплавам на их основе и неметаллическим материалам. Определяется **ограниченный предел выносливости** при базовом цикле нагружений.

Предел выносливости материала намного ниже его статической прочности.

Горизонтальный участок на кривой **1** - максимальное напряжение, при котором металл не разрушается при бесконечно большом количестве циклов нагружения. Он соответствует пределу выносливости σ_{-1} при симметричном цикле.

Такой вид кривой характерен для сталей, чугунов и титановых сплавов.

Предел выносливости определяется при заданном количестве циклов, которое называют **базой испытаний N_0** .

Для сталей база $N_0 = 5 \cdot 10^6$ циклов.

Для цветных сплавов $N_0 > 10^8$ циклов

Циклическая долговечность – общее количество циклов, которое выдерживает металл до разрушения.

$$N_{\text{общ}} = N_z + N_p$$

N_z – количество циклов до появления трещины.

N_p – количество циклов работы материала с трещиной до разрушения.

$$N_p = N_{\text{ж}}$$

Живучесть $N_{\text{ж}}$ – способность материала работать с усталостной трещиной до разрушения.

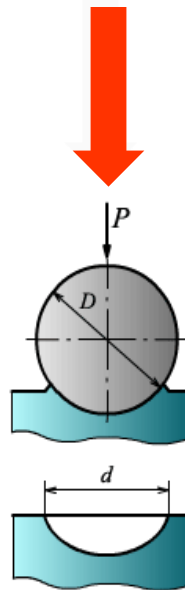
Этот показатель определяет долговечность материала.

2.1.4.Твердость

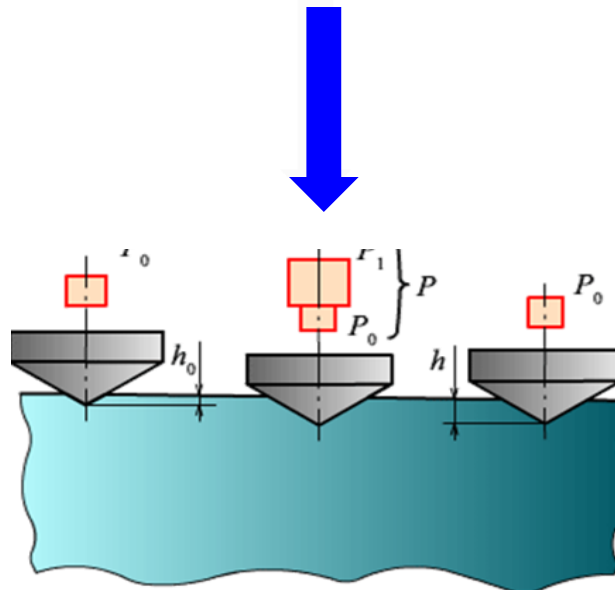
Это способность материала сопротивляться внедрению в него более твердого тела, называемого индентором.

Наиболее распространённые статические методы определения твердости:

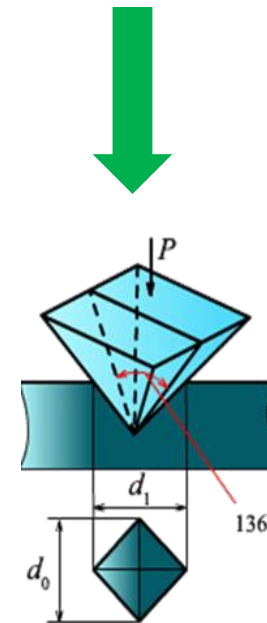
Бринелля



Роквелла



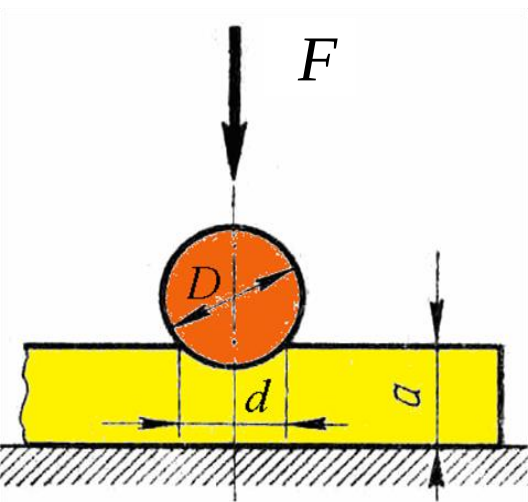
Виккерса



[7]

В качестве инденторов могут быть стальные или твердосплавные шарики разного диаметра, алмазный конус и алмазная четырехгранная (Виккерса) или трехгранная (Берковича) пирамида.

Определение твердости по Бринеллю согласно ДСТУ ISO 6506-1:2007



Согласно ISO 6506 твердосплавный шарик диаметром (D) 10; 5; 2,5; 1 мм внедряется в поверхность изделия под нагрузкой от 1 до 3000 кгс. Твердость определяется как отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка:

$$HBW = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

F – нагрузка

d – диаметр отпечатка

Твердость по Бринеллю определяется в кгс/мм², обозначается числом без указания размерности.

Верхняя граница измерения твердости по Бринеллю 650 HBW

Для пластичных материалов существует связь между σ и HBW.

Для стали $\sigma \approx (0,34 - 0,35) HBW$

Деление металлов на группы при определении твердости по Бринеллю согласно ДСТУ ISO 6506-1:2007

Диаметр шарика, мм	Сталь, Ni-, Ti - сплавы	Чугун		Медь и сплавы меди			Легкие металлы и их сплавы						Свинец, олово
		HBW<140	HBW≥140	HBW<35	HBW от 35 до 200	HBW>200	HBW<35	HBW от 35 до 80	HBW от 35 до 80	HBW от 35 до 80	HBW>80	HBW>80	
	F=30 D ²	F=10 D ²	F=30 D ²	F= 5 D ²	F=10 D ²	F=30 D ²	F=2,5 D ²	F=5 D ²	F=10 D ²	F=15 D ²	F=10 D ²	F=15 D ²	F=1 D ²
1	294,2	98,07	294,2	49,03	98,07	294,2	24,52	49,03	98,07		98,07		9,807
2,5	1839	612,9	1839	306,5	612,9	1839	153,2	306,5	612,9		612,9		61,29
5	7355	2452	7355	1226	2452	7355	612,9	1226	2452		2452		245,2
10	29420	9807	29420	4903	9807	29420	2452	4903	9807	14710	9807	14710	980,7

Обозначение твердости по Бринеллю

согласно ДСТУ ISO 6506-1:2007

425 HBW 10 / 3000 / 20

Время выдержки, с
(если не равно 10-15 с)

Приложенное усилие, кгс

Диаметр твердосплавного шарика-индентора, мм

Символ твердости по Бринеллю

Число твердости по Бринеллю, кгс/мм²

Обозначение твердости по Бринеллю

425 HBW 10 / 3000 / 20



Длительность
действия усилия (20с)

Приложенное усилие (3000 кгс)

Диаметр твердосплавного шарика, мм

Символ твердости

Число твердости

Определение твердости по Виккерсу согласно ДСТУ ISO 6507-1:2007

Метод основан на
вдавливании в
поверхность изделия
алмазной
четырехгранной
пирамиды при **усилиях**
от 0,1 до 981 Н и
измерении обеих
диагоналей отпечатка
после снятия нагрузки.

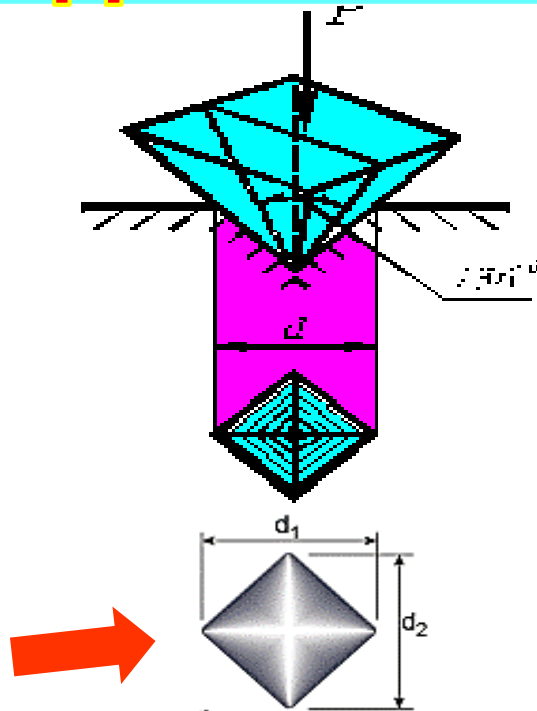


Схема испытания твердости
по Виккерсу

Твердость
рассчитывается
как **отношение**
нагрузки к
площади
боковой
поверхности
отпечатка

$$HV = 1,8544 \frac{F}{d^2}$$

Значения HV как и HBW измеряются в кгс/мм².

Метод используется для **очень твердых материалов, тонких изделий или поверхностей.**

Диапазоны определения твердости по Виккерсу согласно ДСТУ ISO 6507-1:2007

Твердость по Виккерсу ($F \geq 49,03 \text{ N}$)		Твердость по Виккерсу при малых нагрузках ($1,961 \text{ N} \leq F < 49,03 \text{ N}$)		Микротвердость по Виккерсу ($0,098 \text{ N} \leq F < 1,961 \text{ N}$)	
Символ твердости	Значение F, N	Символ твердости	Значение F, N	Символ твердости	Значение F, N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

Обозначение твёрдости по Виккерсу согласно ГОСТУ ISO 6507-1:2007

750 HV 30 / 20

Время выдержки, с
(если не равно 10-15 с)

Приложенное усилие, кгс

Символ твёрдости по Виккерсу

Число твёрдости по Виккерсу, кгс/мм²

Обозначение твердости по Виккерсу

750 HV 30 / 20



Длительность действия усилия (20 с)

Приложенное усилие (30 кгс = 294,2 Н)

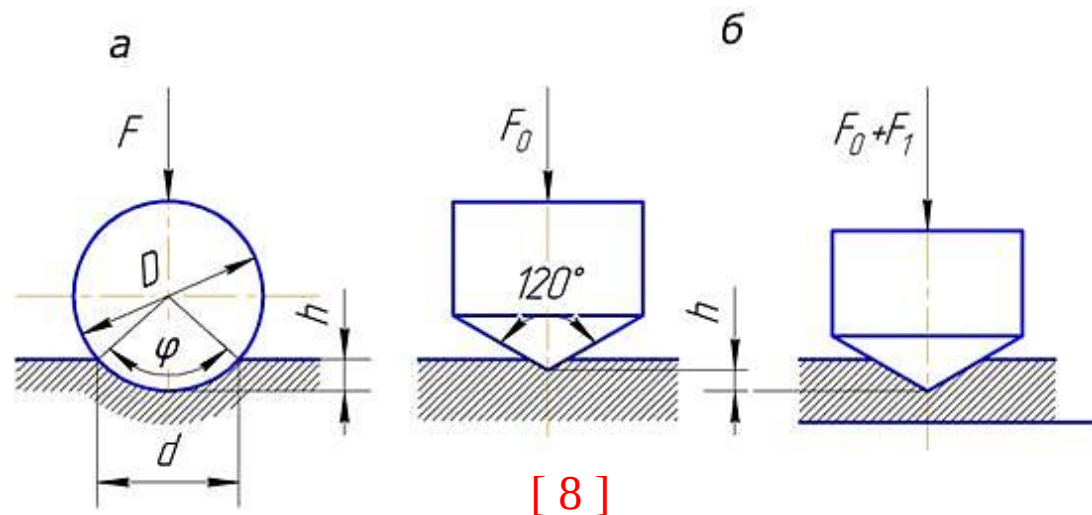
Символ твердости

Число твердости

Определение твердости по Роквеллу согласно ISO 6508-1:2005; ASTM E18-08a

Метод универсальный, имеет 54 шкалы измерений, но наиболее часто используются три шкалы А, В, С

В зависимости от свойств материала индентором может быть **стальной закаленный шарик** (а) диаметром 1,588 мм **или алмазный конус** (б) с углом при вершине 120° .



Шкала	Индентор	Усилия, кГс	Обозначения твердости	Использование
А	Алмазный конус	60	<u>HRA</u>	Для твердых тонких слоев
В	Стальной закаленный шарик	100	HRB	Для мягких материалов
С	Алмазный конус	150	HRC	Для твердых материалов

Число твердости определяется по шкале твердомера и является безразмерной величиной.

Условия определения

твёрдости по Роквеллу

согласно ISO 6508-1:2005; ASTM E18-08a

Шкала	Индентор	F ₀ ,N	F ₁ ,N	F,N	Шкала	Индентор	F ₀ ,N	F ₁ ,N	F,N	Шкала	Индентор	F ₀ ,N	F ₁ ,N	F,N
HRA	Конус алм	98,07	490,35	588,42	HRLW	Ø6,35тв	98,07	490,35	588,42	HRHS	Ø3,175ст	98,07	490,35	588,42
HRD	Конус алм	98,07	882,6	980,7	HRMW	Ø6,35тв	98,07	882,6	980,70	HRES	Ø3,175ст	98,07	882,6	980,70
HRC	Конус алм	98,07	1373	1471,07	HRPW	Ø6,35тв	98,07	1373	1471,07	HRKS	Ø3,175ст	98,07	1373	1471,07
HR15N	Конус алм	29,42	117,68	147,1	HR15XW	Ø6,35тв	29,42	117,68	147,10	HR15WS	Ø3,175ст	29,42	117,68	147,10
HR30N	Конус алм	29,42	264,8	294,22	HR30XW	Ø6,35тв	29,42	264,8	294,22	HR30WS	Ø3,175ст	29,42	264,8	294,22
HR45N	Конус алм	29,42	411,89	441,31	HR45XW	Ø6,35тв	29,42	411,89	441,31	HR45WS	Ø3,175ст	29,42	411,89	441,31
HRFW	Ø1,588тв	98,07	490,35	588,42	HRRW	Ø12,7тв	98,07	490,35	588,42	HRLS	Ø6,35ст	98,07	490,35	588,42
HRBW	Ø1,588тв	98,07	882,6	980,7	HRSW	Ø12,7тв	98,07	882,6	980,70	HRMS	Ø6,35ст	98,07	882,6	980,70
HRGW	Ø1,588тв	98,07	1373	1471,07	HRVW	Ø12,7тв	98,07	1373	1471,07	HRPS	Ø6,35ст	98,07	1373	1471,07
HR15TW	Ø1,588тв	29,42	117,68	147,1	HR15YW	Ø12,7тв	29,42	117,68	147,10	HR15XS	Ø6,35ст	29,42	117,68	147,10
HR30TW	Ø1,588тв	29,42	264,8	294,22	HR30YW	Ø12,7тв	29,42	264,8	294,22	HR30XS	Ø6,35ст	29,42	264,8	294,22
HR45TW	Ø1,588тв	29,42	411,89	441,31	HR45YW	Ø12,7тв	29,42	411,89	441,31	HR45XS	Ø6,35ст	29,42	411,89	441,31
HRHW	Ø3,175тв	98,07	490,35	588,42	HRFS	Ø1,588ст	98,07	490,35	588,42	HRRS	Ø12,7ст	98,07	490,35	588,42
HREW	Ø3,175тв	98,07	882,6	980,7	HRBS	Ø1,588ст	98,07	882,6	980,70	HRSS	Ø12,7ст	98,07	882,6	980,70
HRKW	Ø3,175тв	98,07	1373	1471,07	HRGS	Ø1,588ст	98,07	1373	1471,07	HRVS	Ø12,7ст	98,07	1373	1471,07
HR15WW	Ø3,175тв	29,42	117,68	147,1	HR15TS	Ø1,588ст	29,42	117,68	147,10	HR15YS	Ø12,7ст	29,42	117,68	147,10
HR30WW	Ø3,175тв	29,42	264,8	294,22	HR30TS	Ø1,588ст	29,42	264,8	294,22	HR30YS	Ø12,7ст	29,42	264,8	294,22
HR45WW	Ø3,175тв	29,42	411,89	441,31	HR45TS	Ø1,588ст	29,42	411,89	441,31	HR45YS	Ø12,7ст	29,42	411,89	441,31

Обозначение

твёрдости по Роквеллу

согласно ISO 6508-1:2005; ASTM E18-08a

55

HR

30T

W

Материал индентора:

W – шарик из твёрдого сплава;

S – шарик из стали;

пусто – алмазный конус

Шкала твёрдости по Роквеллу

1,588

Символ твёрдости по Роквеллу

Число твёрдости по Роквеллу

Обозначение твердости по Роквеллу

55

HR

30T

W



Индентор – твердосплавный шарик

Шкала твердости

Символ твердости

Число твердости

Обозначение твердости по Роквеллу

55

HR

C



Алмазный конус

Шкала твердости

Символ твердости

Число твердости

Вопросы для самостоятельной работы

1. Контактная усталость. Предел контактной выносливости.
2. Твердость ндентирования. Масштабный эффект при измерении твердости.
3. Износостойкость, износ и их оценка.
4. Эффект безызносности.

Литература

1. Мощенок В.И. Новые методы определения твердости материалов : монография / В.И. Мощенок .- Х.: ХНАДУ.2013.- 324с.(стр. 36 – 46).
2. Дьяченко С.С. Материаловедение : учебник / С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, А.А. Мовлян, Э.И. Плешаков.- Харьков: Издательство ХНАДУ, 2010.- 464 с. (стр.7 – 45).
3. Гладкий И.П. Технология конструкционных материалов и материаловедение: учебное пособие / И.П. Гладкий, В.И. Мощенок, В.П. Тарабанова, Н.А. Лалазарова, Д.Б. Глушкова.- Харьков: ХНАДУ, 2011.- 460 с.(стр.7 – 18).



Лекция 2

**Вязкость и трещиностойкость
материала.**

Конструкционная прочность.

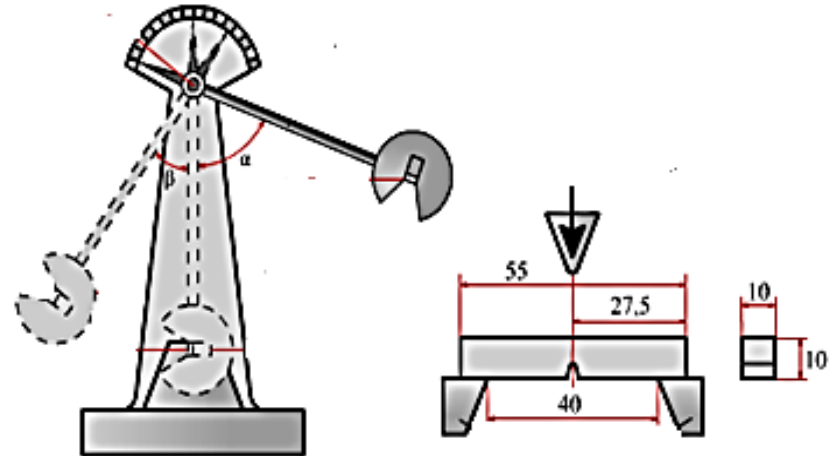
Содержание

1. Ударная вязкость.
2. Порог хладноломкости.
3. Разрушение.
4. Трещиностойкость.
5. Критерии надежности и долговечности.
6. Конструкционная прочность.
7. Связь между свойствами.

1. Ударная вязкость материала

Основным показателем вязкости материала является **ударная вязкость** — это удельная работа разрушения материала под динамической нагрузкой.

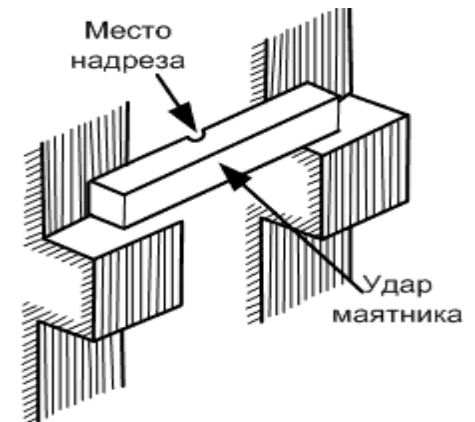
Маятниковый копёр



[9]

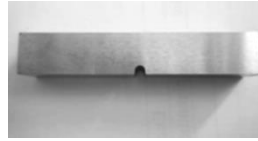
Производят испытания на ударный изгиб стандартных образцов с концентраторами напряжений 3 — х видов: **U — образным и V — образным надрезами**, а также с **V — образным надрезом и усталостной трещиной**.

Испытания хрупких материалов проводят на гладких образцах без надреза.

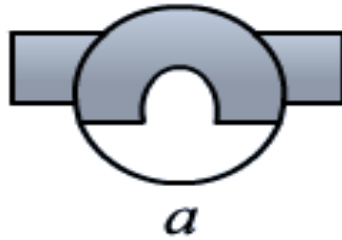


Определение ударной вязкости материала

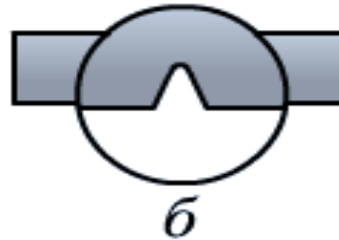
Призматический образец



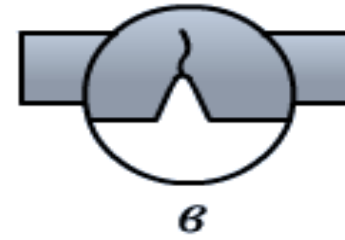
с разной формой надреза .



KCU



KCV



KCT

[9]

$$KC = A / S_0; \text{ Дж/см}^2, \text{ МДж/м}^2$$

A — работа разрушения,
S₀ — площадь сечения в месте надреза.

$$KC = KC_3 + KC_p$$

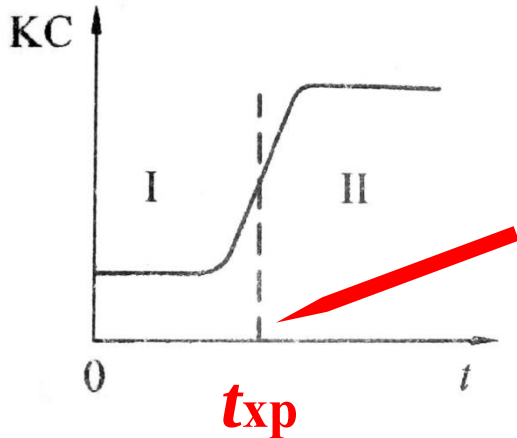
KC₃ - работа зарождения трещины

KC_p - работа развития трещины

Чем выше ударная вязкость, тем меньше склонность
металла к хрупкому разрушению, тем выше его
надежность.

2. Порог хладноломкости

Для большинства сталей ударная вязкость при охлаждении ниже определенной температуры понижается.



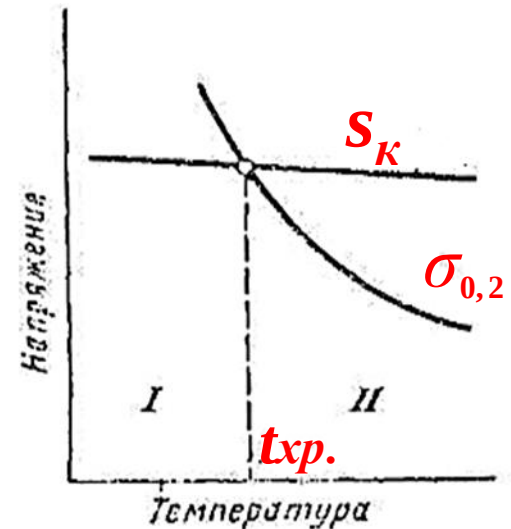
Свойство материала терять вязкость и хрупко разрушаться при снижении температуры называется **хладноломкостью**.

Температура при которой материал охрупчивается – **это порог хладноломкости**.

При этой температуре материал из вязкого состояния (область I) переходит в хрупкое состояние (область II).

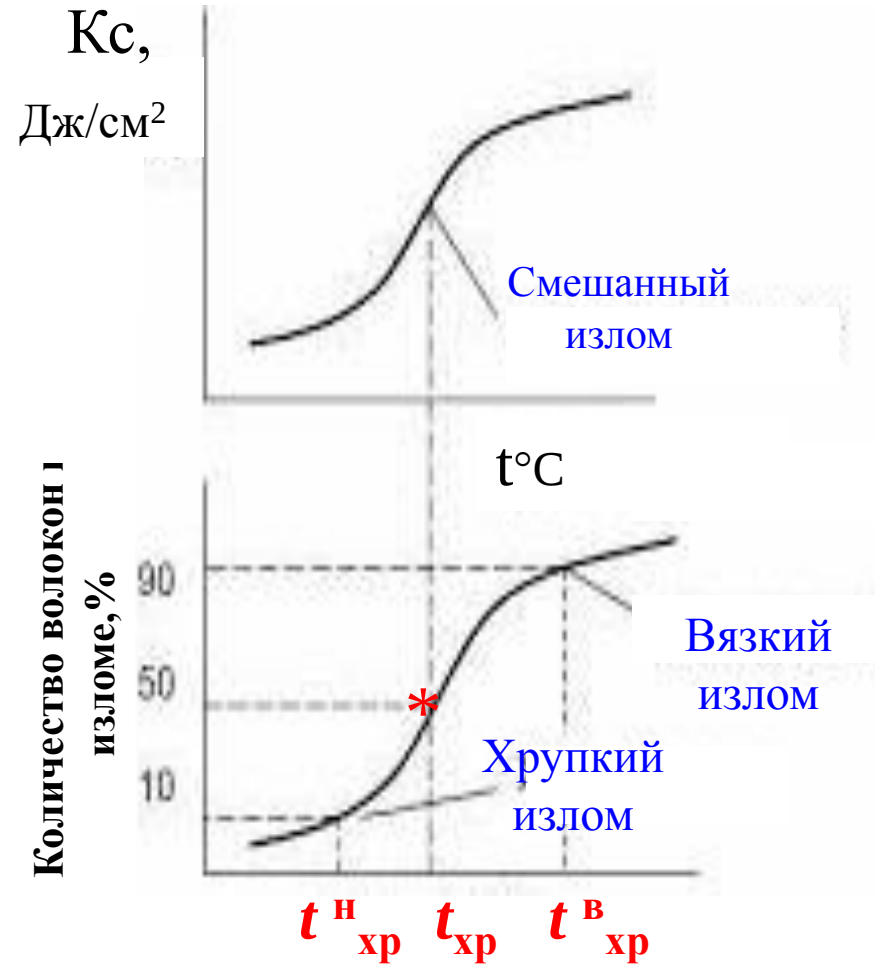
Если $\sigma_{0,2} < s_k$ (область II) разрушению предшествует пластическая деформация и оно происходит вязко.

При $\sigma_{0,2} > s_k$ (область I) разрушение осуществляется без деформации хрупко.



Определение порога хладноломкости

Порог хладноломкости определяют разными способами



Влияние температуры на ударную вязкость и вид излома.

1. Как среднюю температуру между температурой начала снижения K_c ($t^{\text{В}}_{\text{хр}}$) и температурой её минимального значения ($t^{\text{H}}_{\text{хр}}$).
2. За $t_{\text{хр}}$ принимают температуру, при которой % 50 % площади излома имеет вязкое волокнистое состояние (*).

В заводской практике наиболее распространен метод определения $t_{\text{хр}}$ по 50 % вязкой составляющей в изломе.

Факторы, влияющие на порог хладноломкости

1. Химический состав стали, структура, размер зерна, наличие неметаллических включений.
2. Температура, условия и скорость нагружения.
3. Масштабный фактор и концентраторы напряжений.
4. Состояние поверхности и остаточные напряжения.

Для надежной эксплуатации изделий необходимо учитывать еще один важный параметр – **температурный запас вязкости Δt** .



Порог хладноломкости.avi



[10]

$$t_{\text{эксн}} - t_{\text{xp}} = \Delta t$$

Температура эксплуатации изделия.

Для уменьшения вероятности хрупкого разрушения температура эксплуатации изделия $t_{\text{эксн}}$ всегда должна быть выше порога хладноломкости t_{xp} материала, из которого оно изготовлено.

Из всех видов разрушения наиболее опасно хрупкое, наступающее внезапно, поэтому порог хладноломкости должен быть как можно ниже, а рабочая температура была гораздо выше порога хладноломкости.

Однако:

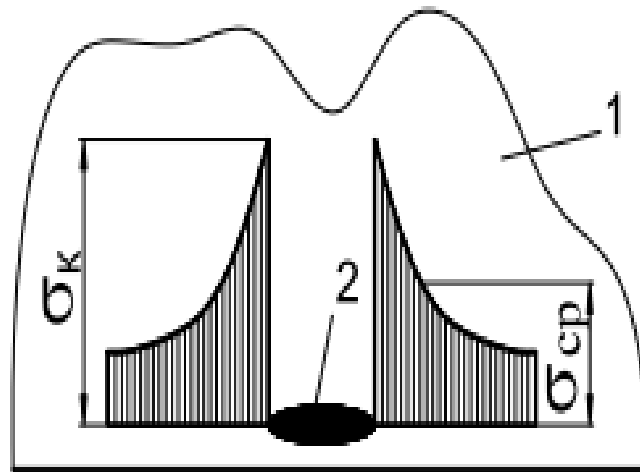
- каждая десятая процента углерода **повышает $t_{кр}$** на 20 %;
- вредные примеси **увеличивают** порог хладноломкости;
- чем больше металлических включений и они острее, тем **выше $t_{кр}$** ;
- чем мельче зерно, тем **больше $t_{кр}$** ;
- затруднение пластической деформации может **повысить $t_{кр}$** на 30 -40 %;
- увеличение размеров изделия **повышает $t_{кр}$** на 100 -150 %;
- **Ni** при любом содержании и **Cr до 1,5 – 2 % снижают $t_{кр}$** , остальные легирующие элементы повышают его

Увеличивают порог хладноломкости также интенсивность нагружения, остаточные напряжения в изделии, агрессивная среда.

3.Разрушение

Это **разделение тела** (образца, детали) **на части** под действием внешних сил или остаточных напряжений. Наступает разрушение **вследствие возникновения и развития трещины**.

Появление трещины приводит к резкой локальной концентрации напряжений σ_k .



1-металл; 2-трещина;
 σ_{cp} – среднее номинальное напряжение; σ_k – напряжение у концов трещины.

σ_k вызывает дальнейшее распространение трещины.

Промышленный металл всегда содержит макро -, микро - и субмикроструктурные дефекты (неметаллические включения, микротрещины, поры) – **концентраторы напряжений**.

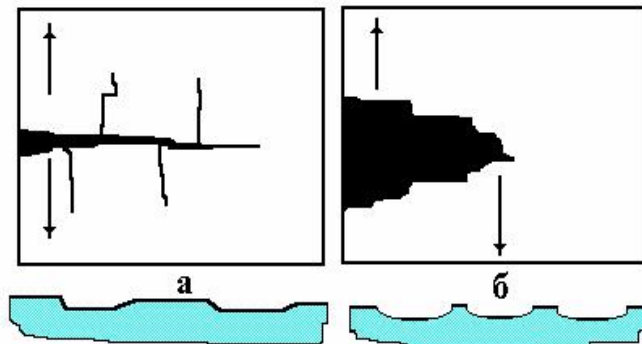
Виды разрушения

Разрушение всегда осуществляется в три этапа: зарождение трещины, её развитие до критического размера и закритическое развитие, которое приводит к разделению тела на части.

По скорости перемещения трещины в металле различают хрупкое, квазихрупкое и вязкое разрушение.

При хрупком разрушении высокая скорость развития трещины - $0,9V_{\text{зв}}$ при малой работе разрушения - до 5 Дж. Пластическая деформация не более 1,5 %.

Трещина острая (а). Излом хрупкий, блестящий, кристаллический



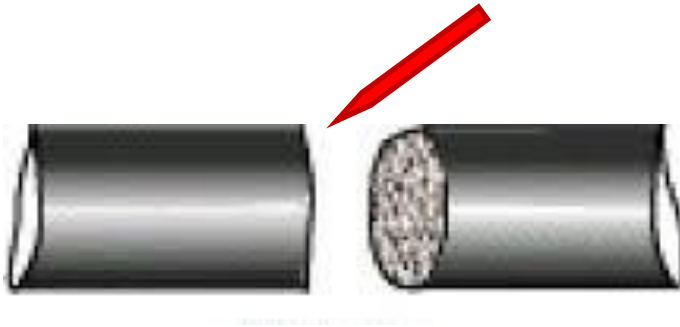
[9]

При вязком разрушении скорость развития трещины мала – до $0,15V_{\text{зв}}$ при работе разрушения более 20 Дж. Пластическая деформация выше 15%.

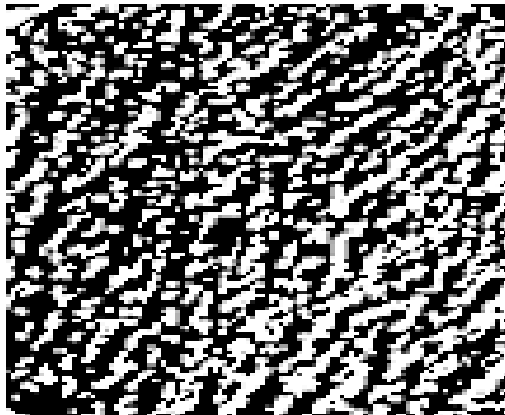
Трещина тупая (б). Излом волокнистый, вязкий, матовый.

При квазихрупком разрушении скорость развития трещины $0,15-0,4 V_{\text{зв}}$, работа разрушения 5-20 Дж. Пластическая деформация не выше 15 %. Излом смешанный с областями хрупкого и вязкого разрушения.

Хрупкое разрушение

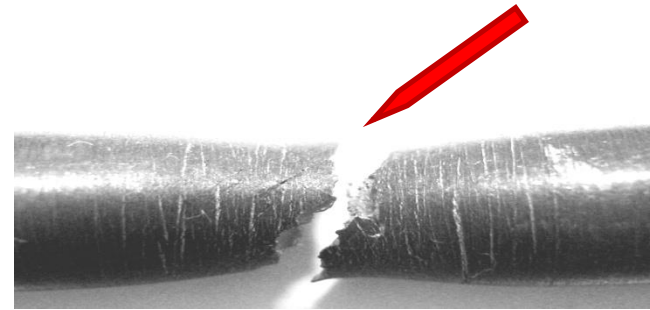


Разрушение отрывом, **без** видимой деформации.



Излом **кристаллический,** блестящий.

Вязкое разрушение



Разрушению предшествовала деформация – образовалась шейка.

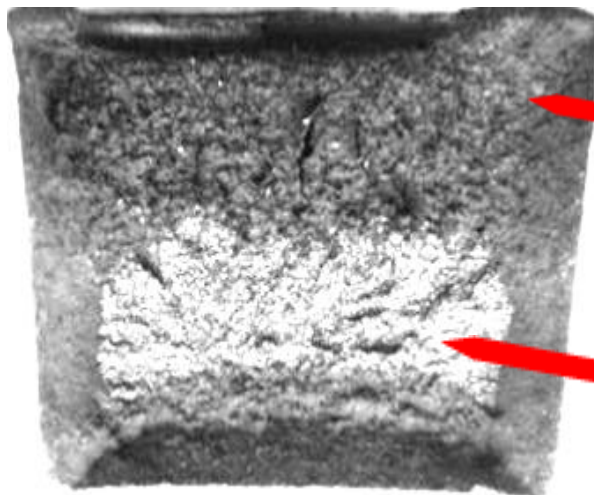


Излом **волокнистый,** матовый.

Квазихрупкое (смешанное) разрушение

Поверхностный слой вала
хрупкий - упрочненный,
обладает высокой
твердостью и
износостойкостью.

Сердцевина – **вязкая** с
запасом пластичности,
чтобы воспринимать
ударные и циклические
нагрузки.



Хрупкая
составляющая.

Вязкая
составляющая.

Смешанный излом.

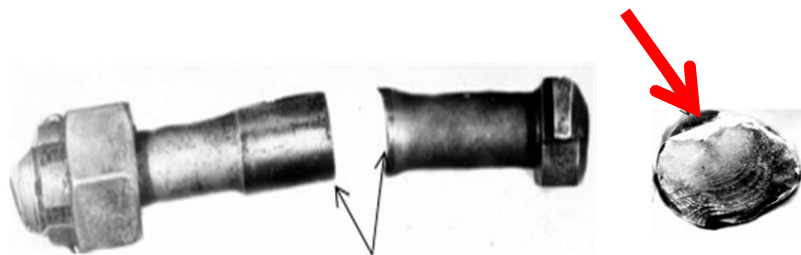
Соотношение хрупкой и вязкой составляющих в изломе является
показателем склонности материала к хрупкому разрушению, т.е.
косвенной оценкой его надежности.

Усталостное разрушение

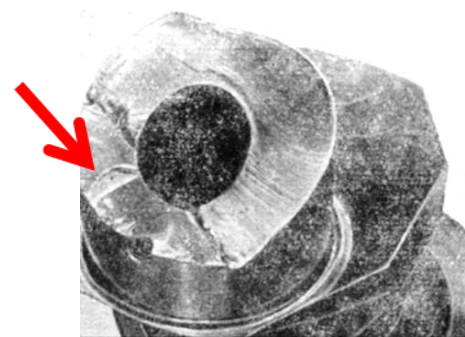
Имеет место при циклических нагрузках.

Для усталостных изломов характерно несколько зон, соответствующих разным стадиям зарождения и развития усталостной трещины до ее критической длины, после чего наступает мгновенное разрушение.

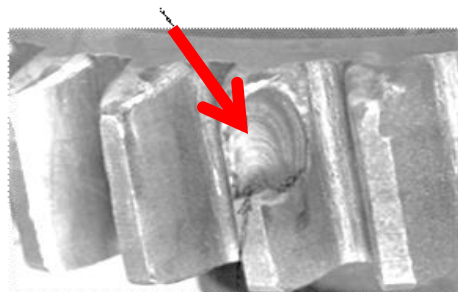
Усталостные изломы деталей автомобиля.



Шатунный болт.



Коленчатый вал.



Зуб шестерни.

Причина усталостного разрушения - усталость металла, возникающая при эксплуатации изделия в условиях циклических нагрузок.

Из всех видов разрушения наиболее опасно хрупкое, наступающее внезапно и его невозможно остановить!!!

4. Трещиностойкость

Это **свойство материала** с трещиной противостоять разрушению, т.е. **оказывать сопротивление продвижению трещины**.

Параметры трещиностойкости:

**Вязкость
разрушения**

$$G_{1c} = \frac{\pi \cdot l \cdot \sigma^2}{E}$$

G_{1c} [Н/м] – сила, необходимая для продвижения трещины на единицу длины.

$$l_{кр} = \frac{E \cdot G_{1c}}{\pi \sigma^2}$$

$$\sigma_{кр} = \sqrt{\frac{G_{1c} \cdot E}{\pi \cdot l}}$$

**Коэффициент
интенсивности
напряжений**

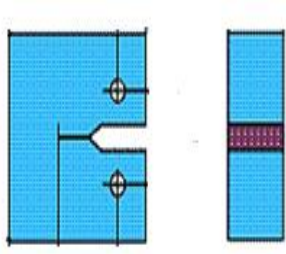
$$K_{1c} = \sqrt{\pi l}$$

$$K_{1c} = \frac{E \cdot G_{1c}}{(1 - \mu)} \left[\text{МПа/м}^{1/2} \right]$$

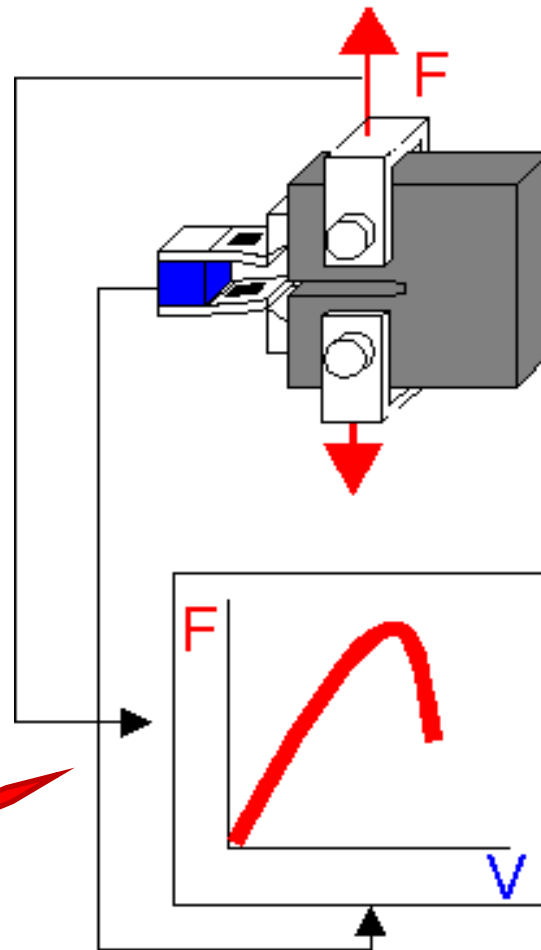
Показатели трещиностойкости позволяют установить критическую длину трещины **$l_{кр}$** , которая вызовет разрушение при действующем напряжении **σ** , или критическое максимальное напряжение **$\sigma_{кр}$** , которое выдержит изделие без разрушения при данной длине трещины.

Определение вязкости разрушения

Испытания на вязкость разрушения проводятся на образцах с концентратором напряжений



Записывают диаграмму «приложенная сила F – скорость раскрытия трещины V ».



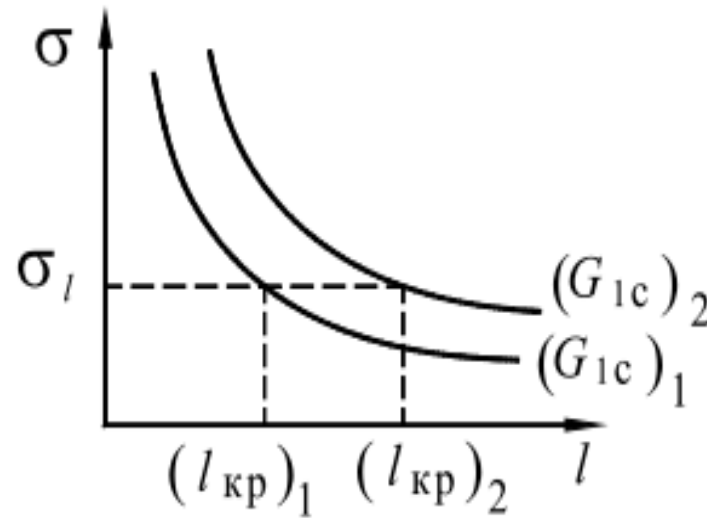
Трещиностойкость определяют для ответственных конструкций, работающих в сложно-напряженном состоянии под высокими ударными и циклическими нагрузками.

[11]

На качественном уровне оценить способность материала сопротивляться хрупкому разрушению можно по значению работы развития трещины КСр.

Связь между разрушающим напряжением и длиной трещины

Один материал имеет вязкость разрушения G_{IC1} и при напряжении σ_1 трещина достигает длины $l_{кр1}$.



Второй материал имеет вязкость разрушения G_{IC2} и при напряжении σ_1 трещина достигает длины $l_{кр2}$.



Чем выше вязкость разрушения, тем больше критическая длина трещины при данном уровне напряжений и меньше её длина при больших напряжениях, а следовательно менее вероятно разрушение.

5. Критерии надежности и долговечности

Надежность материала определяется его способностью противостоять возникновению внезапного отказа, который является следствием хрупкого разрушения.

Критерии надежности: трещиностойкость, работа развития трещины и температура вязко – хрупкого перехода:

$$G_{1c}, K_{1c}, K_{IC}, T_{KH}$$

Долговечность определяется способностью материала сопротивляться постепенному отказу, когда изделие теряет свою работоспособность. Главным образом, это сопротивление изнашиванию, усталостному разрушению и коррозии.

Критерии долговечности: износостойкость, предел выносливости, циклическая долговечность, живучесть и коррозионная стойкость:

$$I, \sigma_{-1}, N, N_{ж}, K$$

6. КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ (КП) МАТЕРИАЛА

Конструкционная прочность – комплекс показателей, определяющих работоспособность материала конкретного изделия в данных условиях эксплуатации.

КП характеризует как свойства самого материала, так надежность и долговечность его работы в данной конструкции.

$\sigma_{\text{в}} \uparrow$; $\sigma_{0,2} \uparrow$; $\sigma_{-1} \uparrow$; $\delta \uparrow$; $\psi \uparrow$; $K_{\text{С}} \uparrow$; $K_{\text{С}3} \uparrow$;
 $K_{\text{С}p} \uparrow$; $t_{\text{хр}} \downarrow$; $N \uparrow$; $N_{\text{ж}} \uparrow$; $G_{1c} (K_{1c}) \uparrow$; $I \uparrow$.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Прочность – свойство материала сопротивляться деформации и разрушению.

Конструкционная прочность – комплекс свойств, определяющих работоспособность материала конкретного изделия в данных условиях эксплуатации.

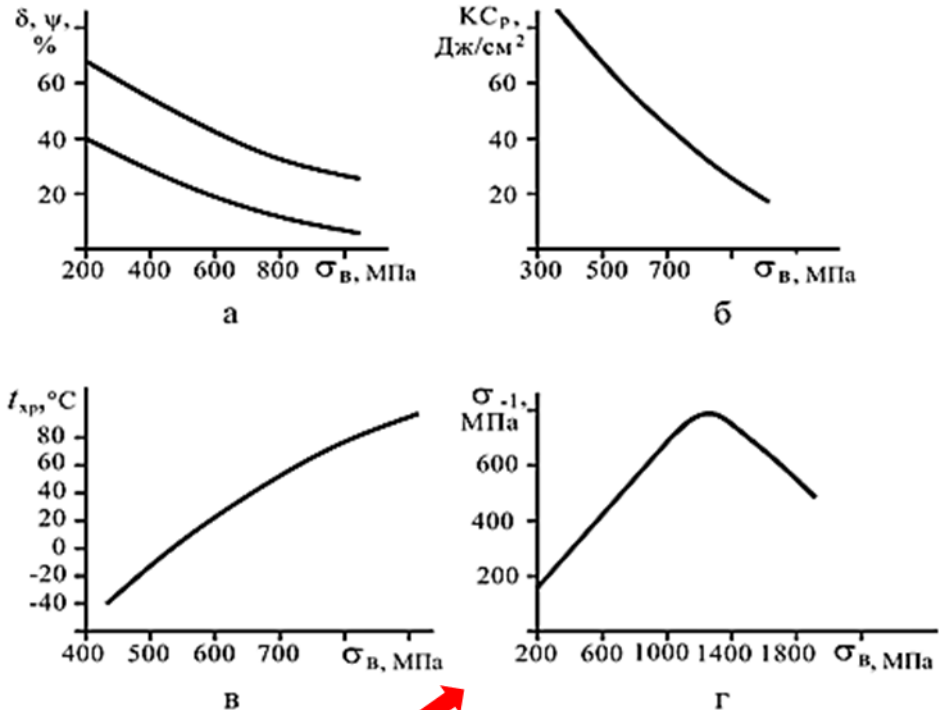
Конструктивная прочность – это свойства изделия, определяющие его работоспособность.

Термины «прочность» и «конструкционная прочность» – это характеристики свойств материала.

Термин «конструктивная прочность» – это характеристики конкретного изделия из данного материала.

7. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ СВОЙСТВАМИ

Одновременно достичь высоких показателей прочности, пластичности, ударной вязкости, циклической долговечности, живучести, критериев трещиностойкости, износостойкости и низкого порога хладноломкости очень сложно. Для этого нужны специальные методы обработки материала.



Такой характер изменения свойств обусловлен наличием в реальном материале дефектов кристаллического строения и их различным влиянием на показатели конструкционной прочности.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Существующие методы оценки порога хладноломкости.
2. Температурный запас вязкости конкретного изделия.
3. Порог хладноломкости стали и температура перехода в хрупкое состояние конкретного изделия.

Литература

1. Дьяченко С.С. Материаловедение : учебник / С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, А.А.Мовлян, Э.И. Плешаков.- Харьков: Издательство ХНАДУ, 2010.- 464 с. (стр.24— 29, 96 - 106).
2. Гладкий И.П. Технология конструкционных материалов и материаловедение: учебное пособие / И.П. Гладкий, В.И. Мощенок, В.П. Тарабанова, Н.А. Лалазарова, Д.Б. Глушкова.- Харьков: ХНАДУ, 2011.- 460 с.(стр.16 – 18, 408 - 411).



Лекция 3

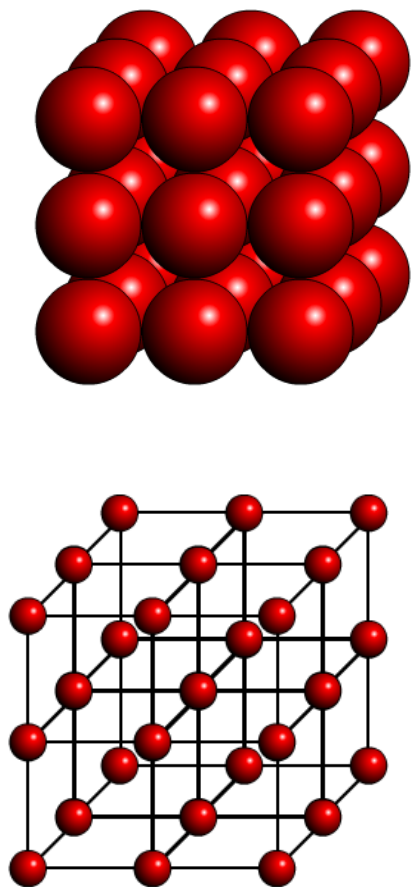
**Дефекты кристаллического
строения металлов.
Механизм пластической
деформации.**

Содержание

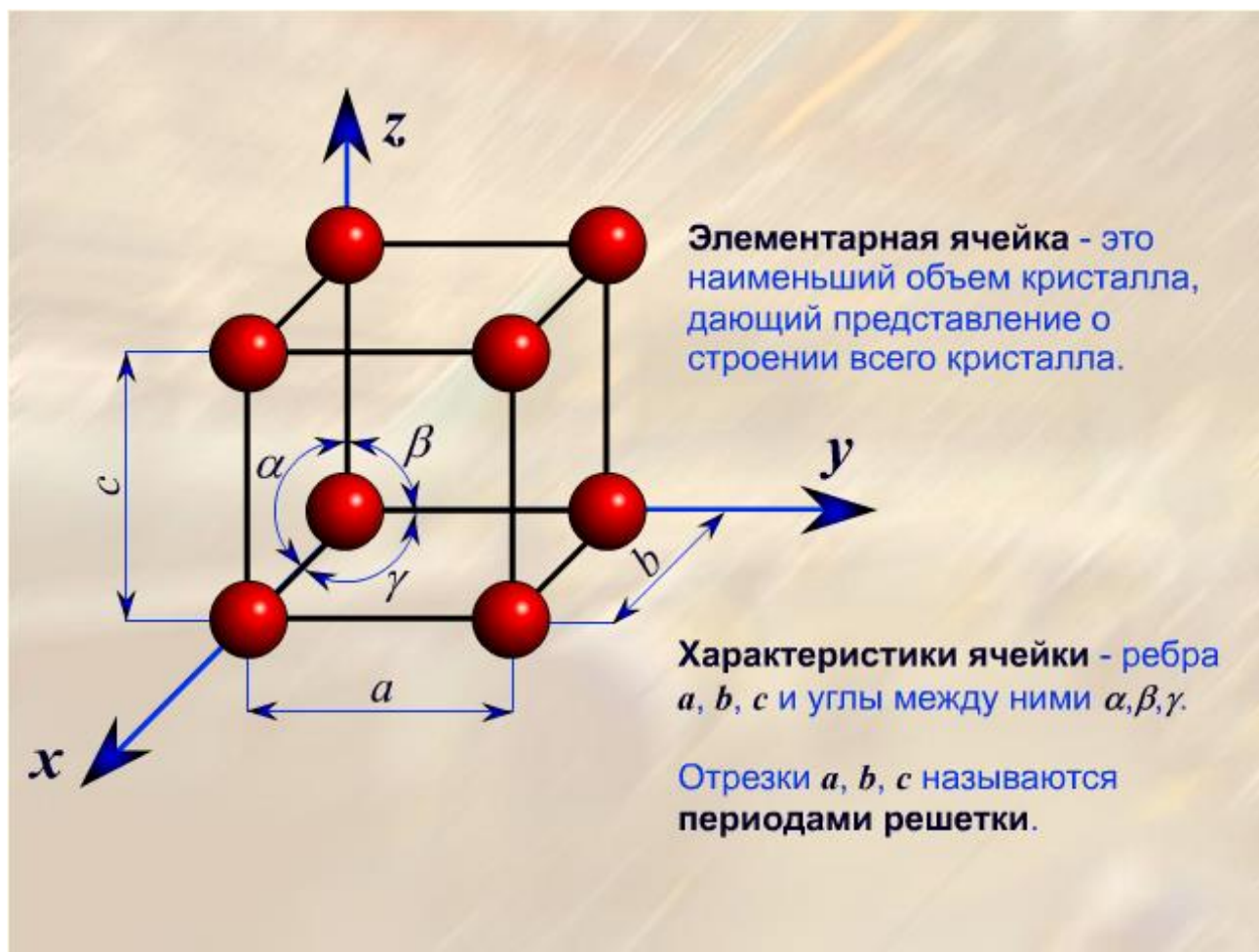
- ▣ 1.Атомно – кристаллическое строение металлов.
- 2.Дефекты кристаллического строения.
 - ▣ 2.1 Точечные дефекты.
 - 2.2. Линейные дефекты и их свойства
- 3.Микроструктура реальных металлов.
- 4. Механизм пластической деформации.

1. Атомно – кристаллическое строение металлов.

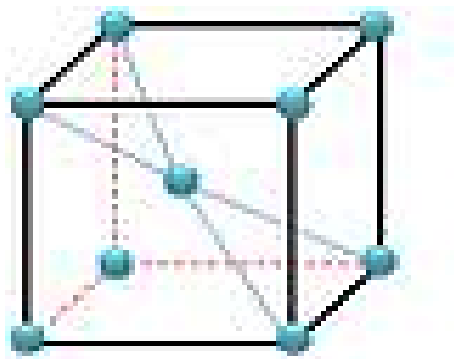
В процессе кристаллизации в металлах (сплавах) формируется определенная **кристаллическая решетка**, которую образуют геометрически закономерно расположенные атомы (ионы) в пространстве.



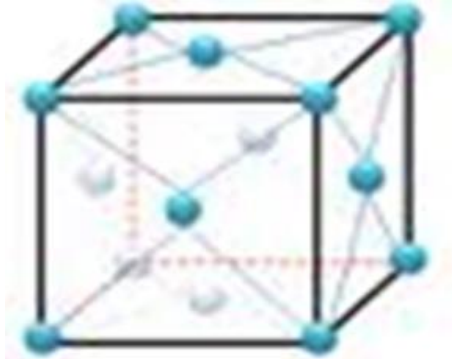
[12]



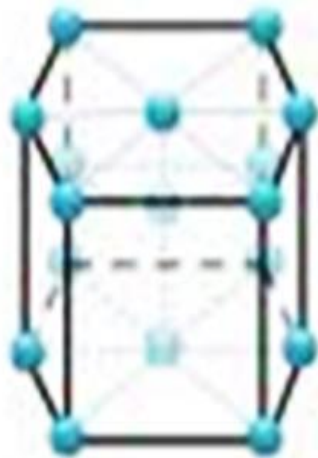
Наиболее распространенные виды кристаллических решеток



1



2



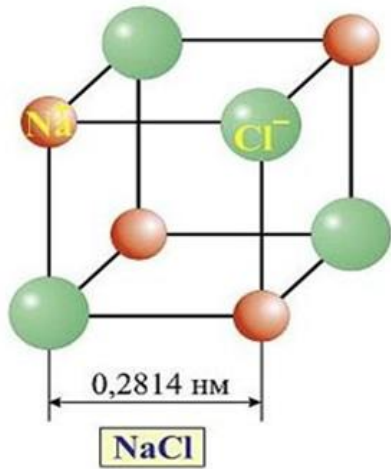
3

1 – Объемно-центрированная
кубическая решетка (ОЦК) -
Fe α , Cr, Mo, W.

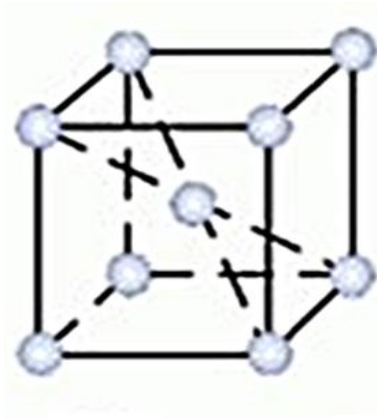
2 – Гранецентрированная
кубическая решетка (ГЦК) –
Fe γ , Al, Ni, Cu.

3 – Гексагональная
плотноупакованная
решетка (ГПУ) – Zn, Mg,
Co, Ti.

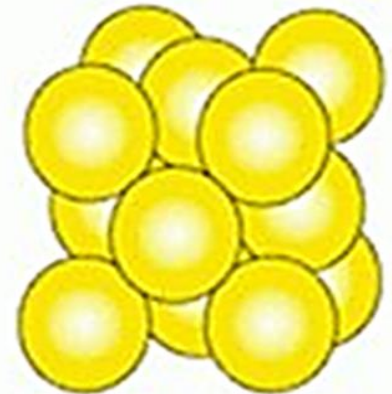
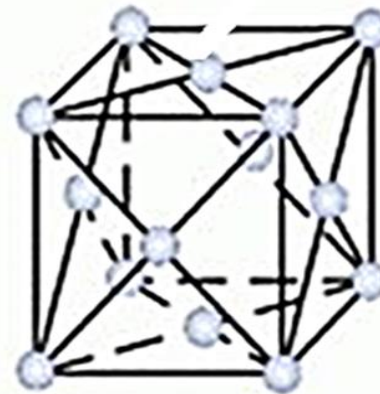
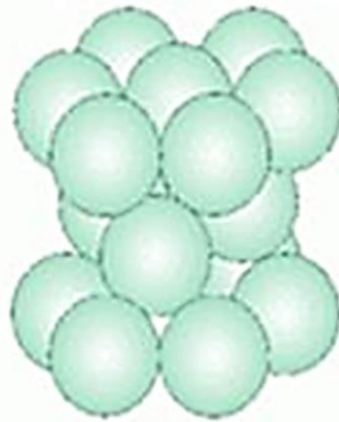
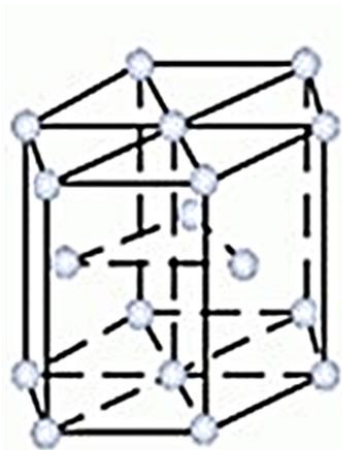
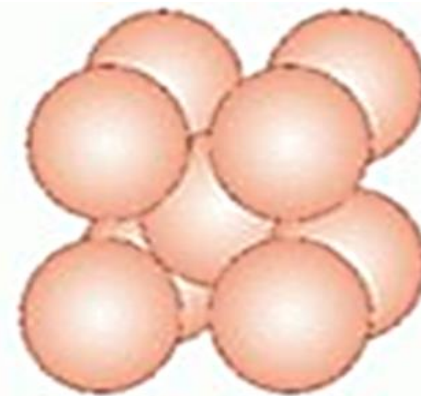
Типы кристаллических решеток



Кубическая

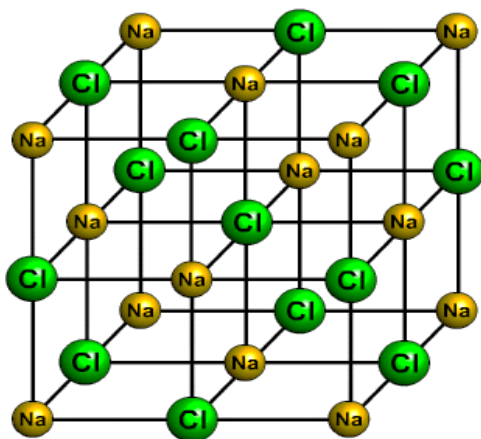


Объёмноцентрированный куб (ОЦК).



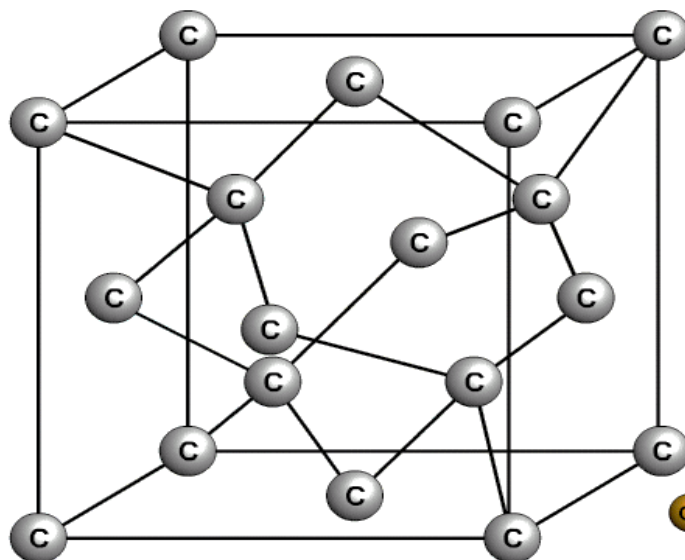
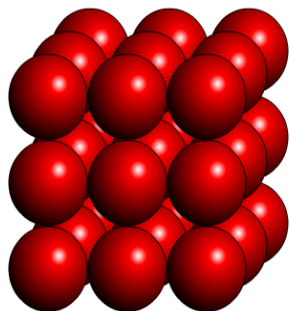
Гексагональная плотноупакованная (ГПУ) Гранецентрированный куб (ГЦК)

Сложные кристаллические решетки



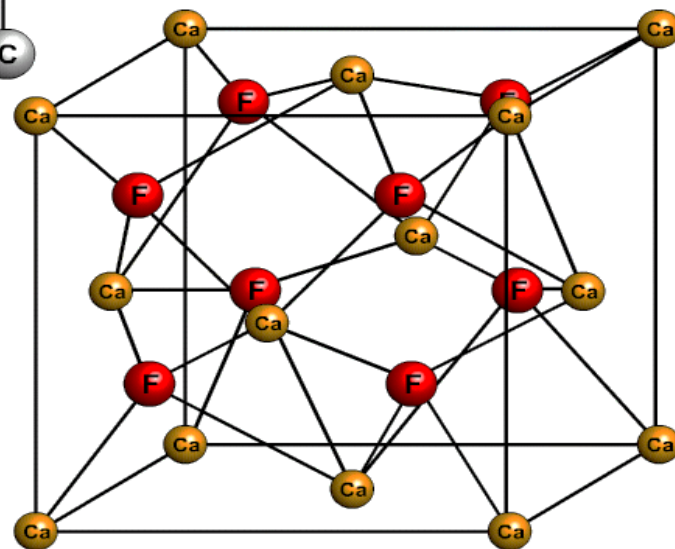
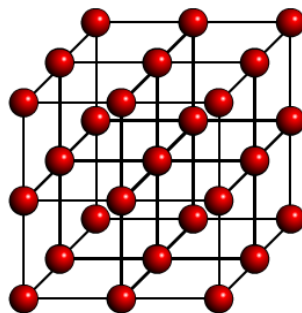
Галит (поваренная соль).

Атомы натрия в вершинах кубической ячейки и в центрах всех граней; атомы хлора в центре ячейки и в серединах всех ее ребер.



Алмаз.

Атомы углерода в вершинах кубической ячейки, в центрах ее граней и в центрах четырех из восьми октантов (в шахматном порядке).



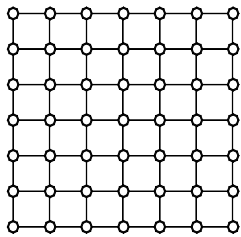
Флюорит.

Атомы кальция в вершинах кубической ячейки и в центрах всех ее граней; атомы фтора в центрах всех восьми октантов.

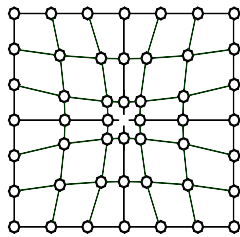
2. Дефекты кристаллического строения металлов

В идеальном кристалле решетка (а) не имеет дефектов кристаллического строения. В реальном металле всегда есть дефекты: точечные, линейные, поверхностные.

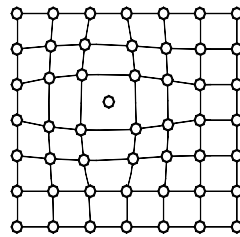
2.1. Точечные дефекты



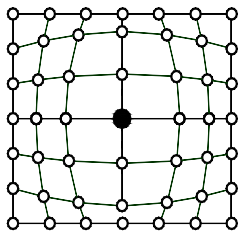
а



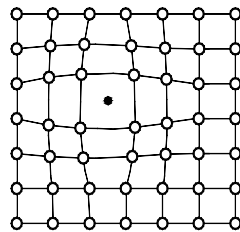
б



в



Г



Д

К точечным дефектам относятся:

б – вакансии – незаполненное атомом место в кристаллической решетке;

в – межузельный атом, который переместился из узла решетки в междоузлие;

Г – примесной атом в узле решетки – атом замещения;

Д – примесной атом в междоузлии – атом внедрения

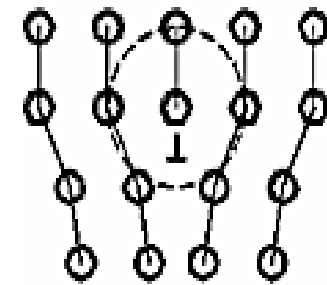
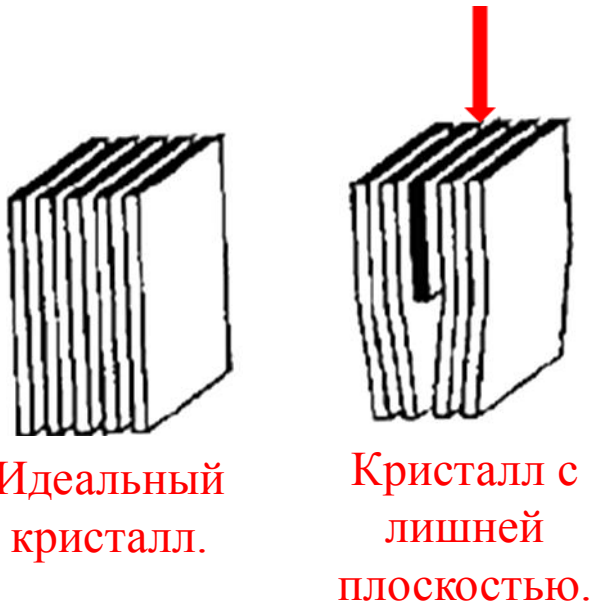
Точечные дефекты практически не изменяют механических свойств, но существенно влияют на физические характеристики металла.

2.2. Линейные дефекты и их свойства

Дислокации (лат. dislocatio смещение) – нарушения правильности кристаллического строения материала, обусловленные наличием лишней атомной плоскости в части кристалла или смещением одной плоскости относительно другой.

Дислокации могут быть двух видов – **краевые** и **винтовые**.

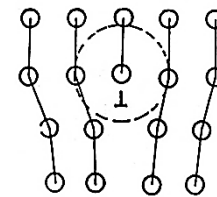
Краевые дислокации



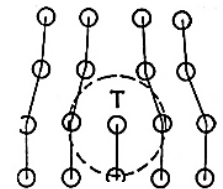
Дислокация в кристаллической решетке.

Дополнительная атомная плоскость в верхней части кристалла называется **экстраплоскостью**.

Дислокации условно делятся на **положительные** (а) и **отрицательные** (б):



а

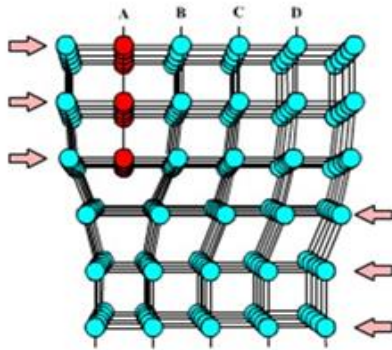


б

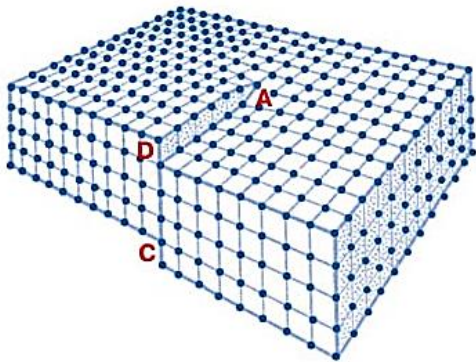
Дислокации возникают при кристаллизации, во время пластической деформации или при термической обработке металла.

Краевая и винтовая дислокации

Краевая дислокация [13]

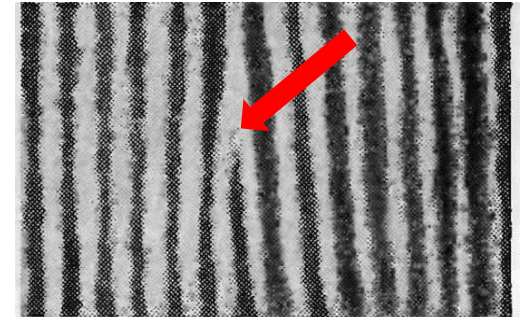


Винтовая дислокация [14]



Образование **краевой дислокации** связано с появлением в одной части кристалла **лишней плоскости (экстраплоскости)**, которая образовалась вследствие сдвига.

Краевая дислокация в кристалле CuS



Винтовая дислокация возникает, если в кристалле сделать надрез и сдвинуть одну часть кристалла вниз на одно межатомное расстояние. При этом образуется ступенька, проходящая по части кристалла. Кристалл как бы закручивается винтом вокруг линии воображаемого разреза. **Искажённая зона** вокруг линии DC **называется винтовой дислокацией**.

Образование винтовой дислокации носит очень сложный характер.

Современные методы позволяют вырастить монокристаллы, практически не имеющие дислокаций – **это нитевидные кристаллы или усы** (диаметр их не превышает 2 мкм при длине - от 10 мкм до 10мм).

Плотность дислокаций

Количество дислокаций в кристалле характеризуется
плотностью дислокаций ρ .

$$\rho = \Sigma l / V, \text{ см/см}^3 \text{ или } \text{см}^{-2}$$



→ В монокристалле $\rho = 10^3 - 10^4 \text{ см}^{-2}$.



→ В поликристаллическом металле
 $\rho = 10^6 - 10^9 \text{ см}^{-2}$

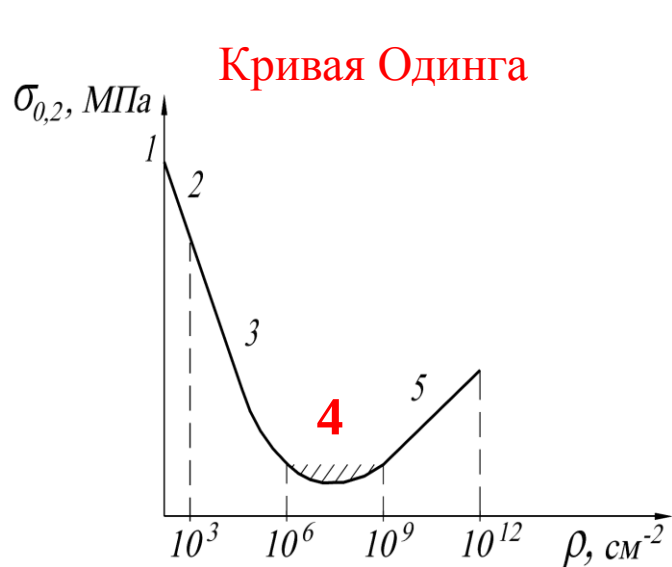


→ В деформированном или термически
упрочненном металле $\rho = 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$

Наличие дислокаций и их плотность существенно влияют на показатели
механических свойств металлов и сплавов.

Зависимость прочности от плотности дислокаций

Теоретическая прочность железа – 30000 МПа, а в реальном железе прочность изменяется от 50 до 200 МПа (в зависимости от количества примесей), что объясняется присутствием дислокаций.



- 1 – идеальный кристалл ($\sigma_{\text{теор.}}$);
- 2 – нитевидный кристалл;
- 3 – монокристалл;
- 4 – реальный поликристаллический металл (сплав);
- 5 – металл (сплав) упрочнённый.

Причина такой сложной зависимости - способность дислокаций двигаться под влиянием действующих напряжений, возникающих от воздействия внешней силы.

Упрочнение металла можно достичь как уменьшением, так и повышением плотности дислокаций:

- применением практически бездислокационных нитевидных материалов (область 1-2);
- использованием материалов с высокой плотностью дислокаций после ХПД или после термообработки (область 5).

Вектор Бюргерса

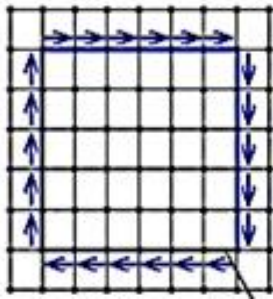
Это одна из важнейших характеристик дислокаций.

Вектор Бюргерса является **мерой искажения кристаллической решетки**, обусловленной присутствием в ней дислокации.

Для определения вектора строят контур Бюргерса.

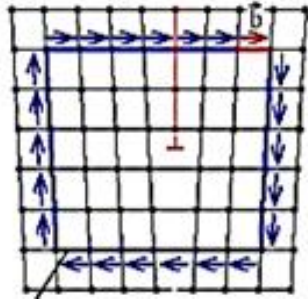
Контур и вектор Бюргерса
краевой дислокации [15]

Идеальный
кристалл



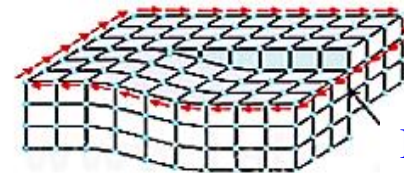
Контур Бюргерса

Кристалл с краевой
дислокацией

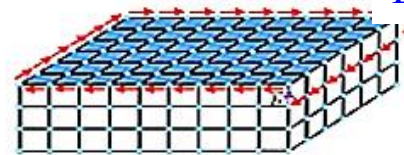


$\vec{b}$ вектор Бюргерса

Контур и вектор Бюргерса
краевой дислокации [15]



Контур
Бюргерса



Вектор Бюргерса

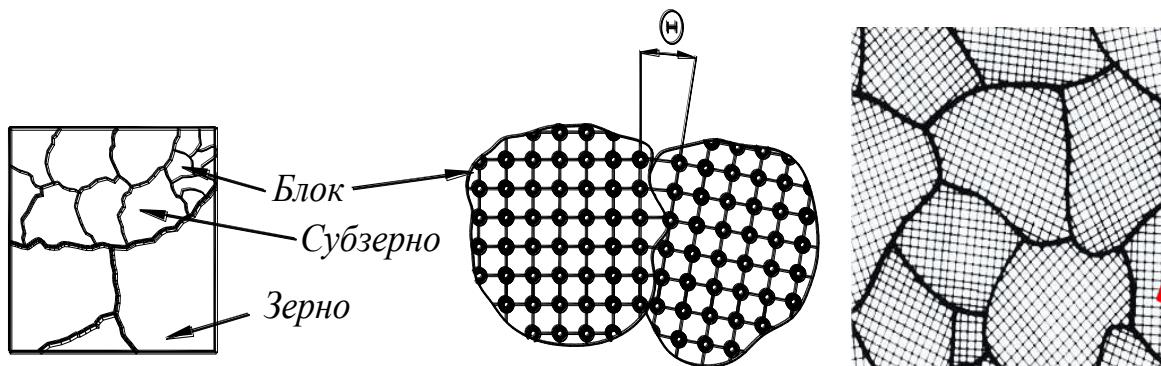
Вектор Бюргерса краевой дислокации
равен межатомному расстоянию и
перпендикулярен линии дислокации.

Вектор Бюргерса винтовой дислокации
равен межатомному расстоянию и
параллельный линии дислокации.

Величина вектора Бюргерса входит во все расчёты – при определении энергии дислокаций, сил, которые действуют на дислокации, при их взаимодействии между собой и с поверхностью кристалла.

3. Микроструктура реального металла

Реальный металл имеет сложную микроструктуру (внутреннее строение, изучаемое под микроскопом).



Каждое **зерно** состоит из **субзерен** (фрагментов), образующих субструктуру.

Субзерна состоят из **блоков мозаики**, которые содержат 30-40 **кристаллических решеток**.

Размер зерна реального металла – **20-50 мкм**, субзерен – 3 - 5 мкм, блоков – 0,02 - 0,03 мкм.

Зерна **разориентированы** между собой на **углы 12 - 15°**, субзерна – 3 -12°, блоки - **< 3°**.

Границы между зернами называют **большеугловыми**, между субзернами – **среднеугловыми**, между блоками – **малоугловыми**.

Чем мельче зерно, тем выше комплекс механических свойств.

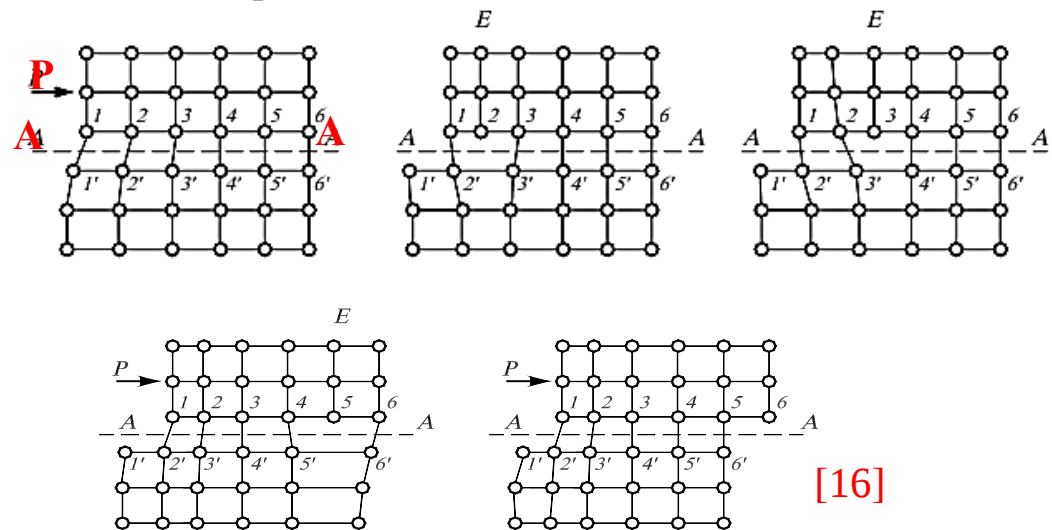
4. Механизм пластической деформации

Под действием **внешней силы** в материале возникают напряжения, которые **приводят** или к **пластической деформации** (при достаточной пластичности).

Пластическая деформация осуществляется **путём сдвига** одной части кристалла **относительно другой** под действием касательных напряжений.

Дислокации облегчают **сдвиг плоскостей**. Основной вклад в процесс пластической деформации вносят очень подвижные **краевые дислокации**.

Экстраплоскость А-А не связана с нижней частью кристалла и является довольно подвижной. Под воздействием **внешней силы P** она легко перемещается вправо на одно межатомное расстояние пока не выйдет на поверхность и произойдёт сдвиг частей кристалла на период кристаллической решетки.



[16]

Плоскость, вдоль которой перемещаются дислокации — **плоскость скольжения А - А.**

В реальном металле **пластическая деформация** — это **результат движения дислокаций**.

Если **дислокации** под напряжением **еще не двигаются** происходит лишь **упругая деформация**.

Пластическая деформация в металлах

Пластическая деформация происходит в первую очередь вдоль так называемых плоскостей скольжения (атомных плоскостей, наиболее густо заселенных атомами). Под влиянием тангенциального усилия F , приложенного к верхней плоскости, атомы сместятся и появится сила упругости, равная приложенной с этой силой связана энергия деформации Ux , которая будет возрастать до тех пор, пока атомы верхней плоскости не окажутся "над" атомами нижней плоскости - в точке B . При дальнейшем смещении атомам будет уже выгоднее "спуститься" в положения C . Таким образом верхняя плоскость проскальзывает на новое положение.

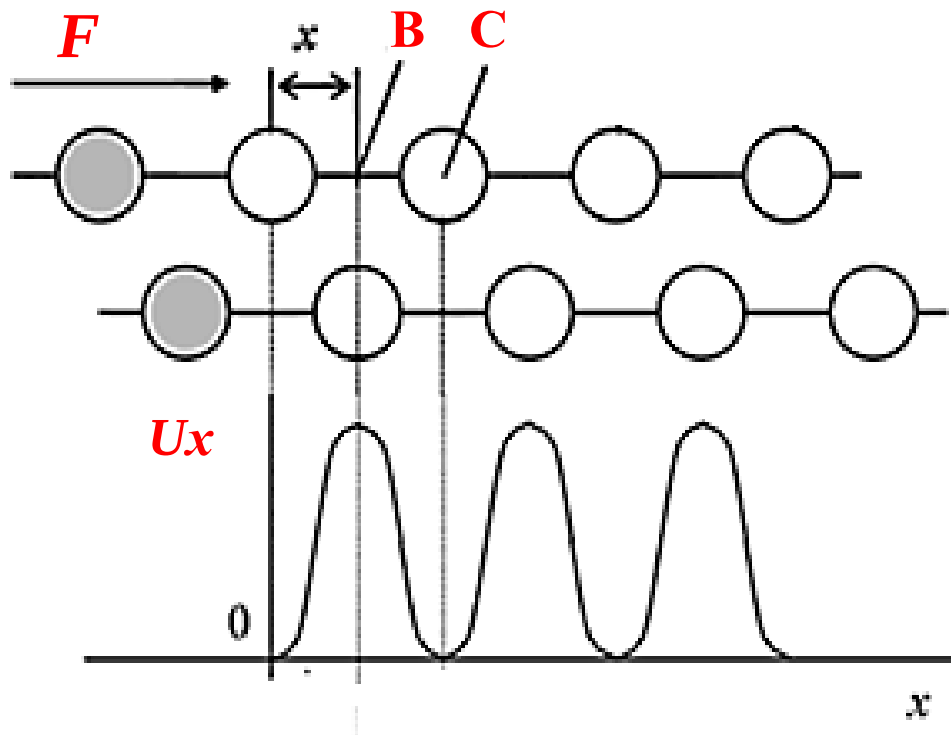


Схема деформации кристалла за счет скольжения верхней плоскости атомов относительно нижней [17]

Основные положения

Предел текучести – это напряжение, соответствующее началу движения дислокаций. Его значения тем выше, чем больше в металле плотность дислокаций.

Физический предел текучести σ_T – следствие массового движения дислокаций во всех зернах пластичных малопрочных материалов.

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ соответствует началу движения дислокаций в отдельных зернах по плоскостям лёгкого скольжения.

Для повышения пластичности необходимо облегчить движение дислокаций.

Для увеличения прочности надо препятствиями тормозить движение дислокаций.

Если взаимное торможение дислокаций очень сильное, то металл охрупчивается.

Для получения высоких значений прочности при сохранении требуемой пластичности необходимо иметь полупроницаемые препятствия на пути движения дислокаций. Такими барьерами являются среднеугловые границы, примесные атомы, дисперсные частицы.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Условия возникновения дислокаций.
2. Методы выявления дислокационной структуры.
3. Как зависит энергия тела с дислокациями от их плотности?

Литература

1. Дьяченко С.С. Материаловедение : учебник / С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, А.А. Мовлян, Э.И. Плешаков.- Харьков: Издательство ХНАДУ, 2010.- 464 с. (стр.58– 65, 74 - 76).



Лекция 4

**Влияние механизмов
упрочнения на
конструкционную прочность
металлов и сплавов**

Содержание

- 1.Торможение дислокаций. Основные механизмы упрочнения металлических сплавов.
- 2.Вклад механизмов упрочнения в общий уровень предела текучести.
- 3.Взаимосвязь между конструкционной прочностью и механизмом упрочнения.
- 4.Влияние механизмов упрочнения на порог хладноломкости.

1. Торможение дислокаций. Основные механизмы упрочнения металлических сплавов

Уровень характеристик прочности определяется торможением дислокаций.

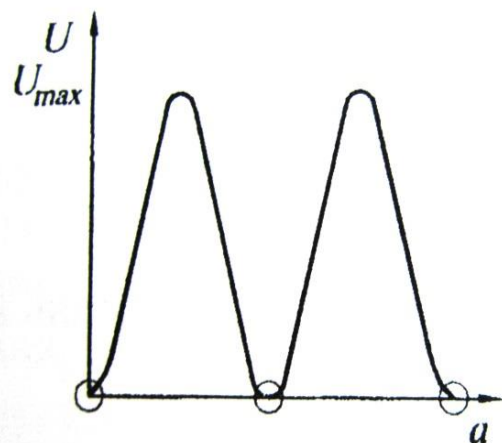
Чем больше торможение дислокаций, тем выше уровень прочности.

Существует 5 основных видов препятствий движению дислокаций, и как следствие 5 механизмов упрочнения материалов:

- Трение решетки (сила Пайерлса - Наборро);
- Взаимодействие с другими дислокациями (дислокационное упрочнение);
- Торможение за счет примесных атомов (твердорастворное упрочнение);
- Взаимодействие с границами зерен, субзерен (зернограничное упрочнение);
- Торможение дисперсными частицами (дисперсионное упрочнение).

Сила Пайерлса - Наборро

При перемещении дислокация должна преодолеть сопротивление решетки – **потенциальный барьер U** . Это сопротивление называется **силой трения решетки** или **силой Пайерлса – Наборро ($F_{п-н}$)**.



Сила действующая на единицу длины

дислокации $f_{п-н} = \tau_{п-н} \cdot b$,

где $f_{п-н}$ и $\tau_{п-н}$ – сила и напряжение Пайерлса – Наборро,
 b – вектор Бюргерса

Напряжение для краевой дислокации равно:

$$\tau_{п-н} = B \cdot G / (1 - \mu)$$

B - коэффициент, зависящий, от типа
связи между атомами в решетке.

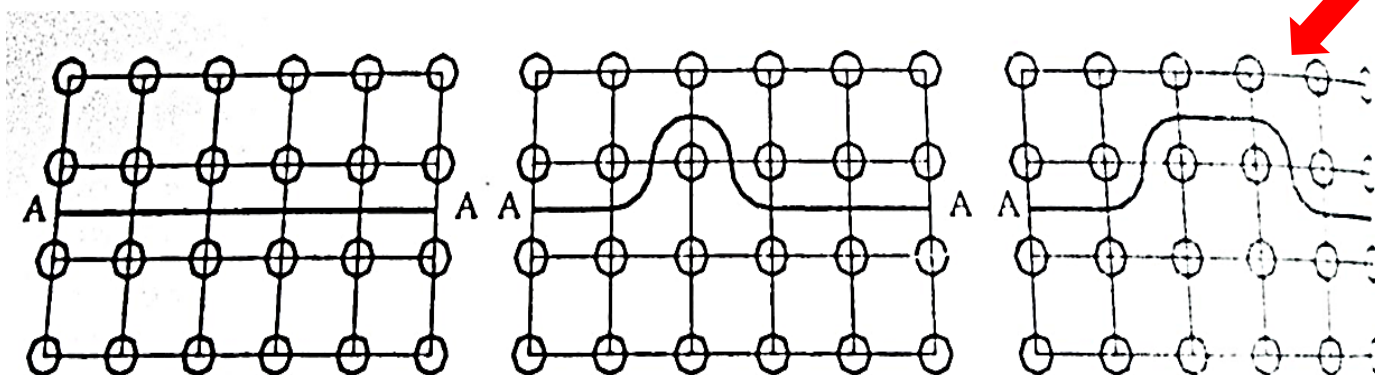
Наибольшая сила трения решетки у кристаллов с ковалентной связью.

У металлов, имеющих кристаллы с металлической связью, которая характеризуется коллективизированными электронами, она минимальна.

По расчетной оценке $\tau_{n-n} = 10^{-2} - 10^{-3} G$.

Учитывая, что теоретическая прочность $\tau_{\text{теор}} = 0,15 G$, вклад силы Пайерлса – Наборро в прочность очень небольшой.

В реальном металле эта сила ещё меньше, так как дислокация не сразу преодолевает барьер решетки, а двигается поэтапно, образуя перегибы (ступеньки) – «выкидывая языки».



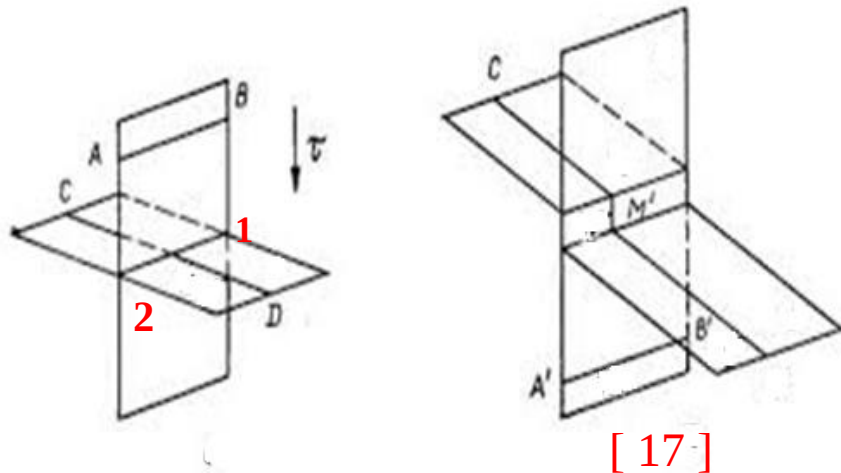
[16]

Так как перемещение скольжением каждой экстраплоскости в следующее положение происходит путём поочерёдного « эстафетного » сдвига атомов на часть межатомного расстояния, то вклад напряжения трения решетки в значение границы текучести металлов мал.

Для решетки Fe_{α} τ_{n-n} в пределах 20 - 30 МПа.

Взаимодействие дислокаций

При движении дислокаций в кристалле происходит взаимодействие их друг с другом



Образование порогов при взаимодействии краевых дислокаций

В плоскости 1- неподвижная дислокация CD.

В плоскости 2 – дислокация АВ двигается вниз и когда дойдёт до плоскости 1 произойдёт её сдвиг на величину вектора Бюргерса. На дислокации CD образуется ступенька – порог M' , а дислокация $A'B'$ продолжит движение вниз.

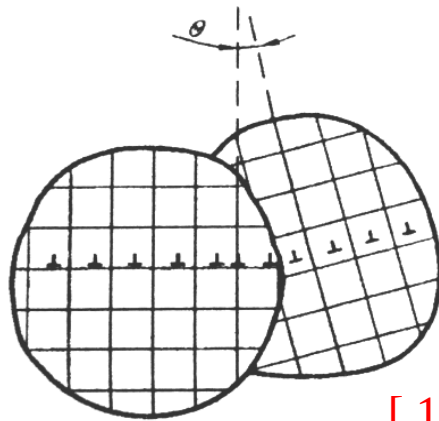
Переползание дислокации состоит в зарождении порогов и движении их вдоль линии дислокации.

На образование порогов расходуется энергия дислокаций, задерживается их движение и происходит оно значительно сложнее. При встрече дислокаций, двигающихся в произвольных плоскостях, может произойти их полная остановка.

В реальном металле с высокой плотностью дислокаций их торможение за счет взаимодействия и образования порогов существенно упрочняет металл.

Взаимодействие дислокаций с границами зёрен

Эффективным барьером для движения дислокаций является **межзеренная граница**. Эффект торможения зависит от угла разориентации соседних зерен.



[16]

Дислокации **легко преодолевают малоугловые границы**, продолжая скольжение в соседнем зерне



[18]

Средне - или большеугловые границы **тормозят** движение дислокаций. Возле границы **возникает скопление дислокаций**.

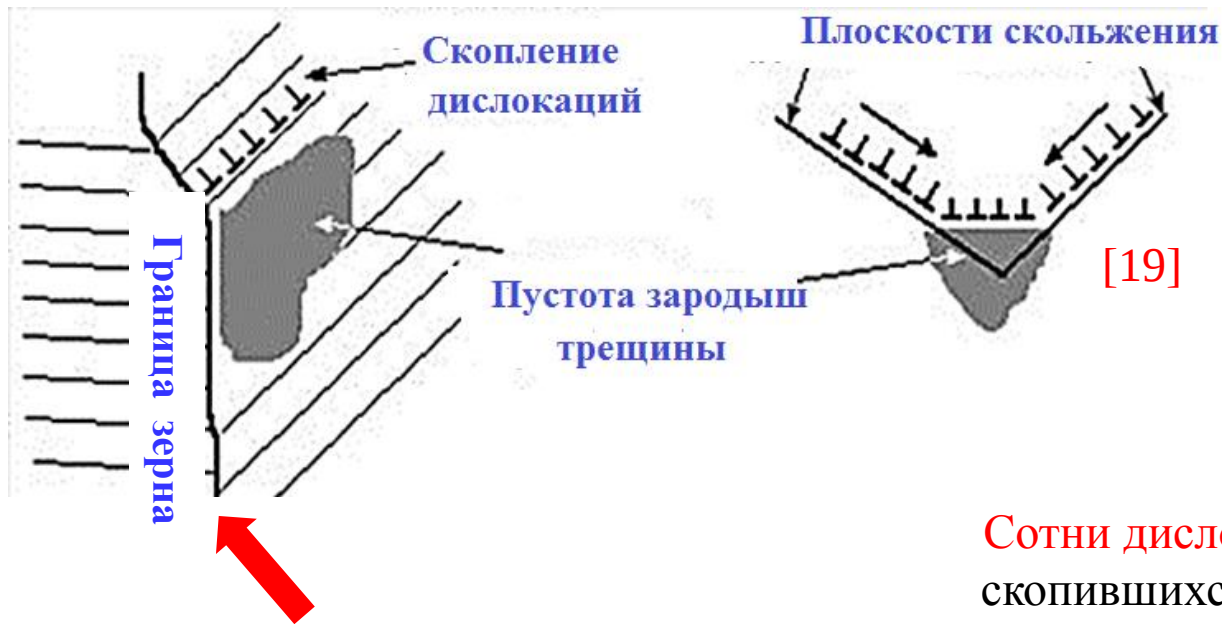
При скоплении дислокаций коэффициент концентрации напряжений равен количеству дислокаций в скоплении, которые затормозились:

$$\tau_{ск} = \tau_d + n$$

τ_d — внешнее напряжение, действующее на дислокацию,

n — количество дислокаций в скоплении их.

Взаимодействие дислокаций с границами зёрен



Дислокации движутся в определенных атомных плоскостях и не могут продолжать скольжение **сквозь границу**, так как в соседнем зерне атомные плоскости ориентированы по-другому.

Сотни дислокаций, скопившихся перед препятствием, **создают напряжение у границы зерна на 3 порядка больше среднего** напряжения в данном сечении.

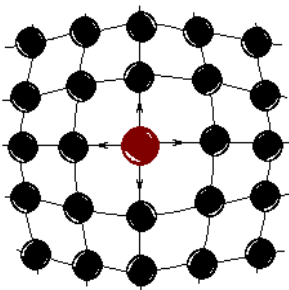
Напряжения зависят от количества затормозившихся дислокаций.

Перенапряжение приводит к возникновению трещины.

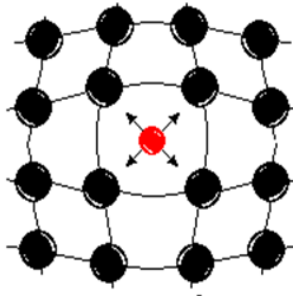
Торможение дислокаций примесными атомами

Торможение дислокаций происходит полями упругих искажений, возникающих в кристаллической решетке возле примесных атомов.

Кроме того, примесные атомы внедрения накапливаются у ядра дислокаций и образуют атмосферы примесных атомов, которые являются препятствиями движению дислокаций.

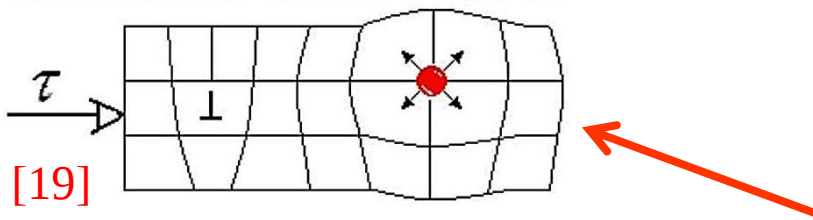


Примесь замещения



Примесь внедрения

Упрочнение сильно зависит от разности в размерах атомов основного и примесного элемента. Чем больше эта разница, тем больше энергия связи атмосферы и дислокации.



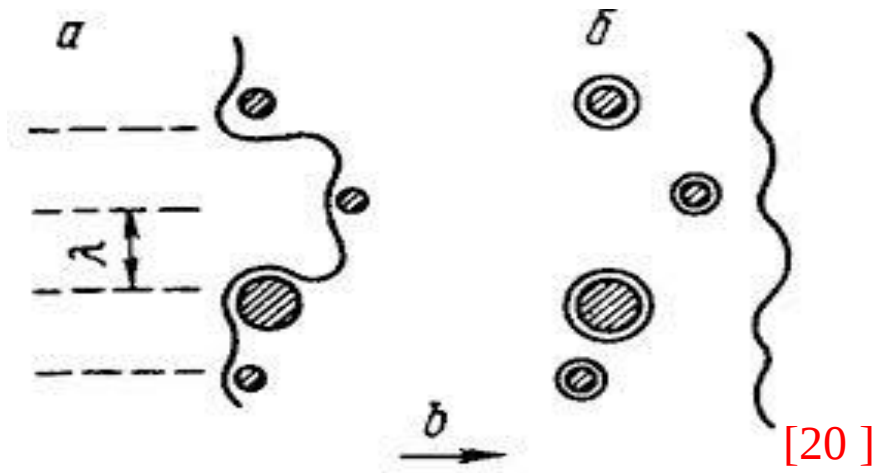
Наибольшее влияние на торможение дислокаций оказывают атомы внедрения, находящиеся в междоузлиях. Мигрируя в решетке, они оседают на дислокациях и заметно затрудняют их перемещение или делают их неподвижными (сидячими). Именно эти дислокации вносят существенный вклад в упрочнение материала.

Торможение дислокаций дисперсными частицами

Мелкие частицы второй фазы в матрице основного металла взаимодействуют с дислокацией и **являются барьерами** на пути ее движения, упрочняя металл.

Реализуются два процесса : обход частицы дислокацией и перерезание частицы.

Огибание частицы дислокацией



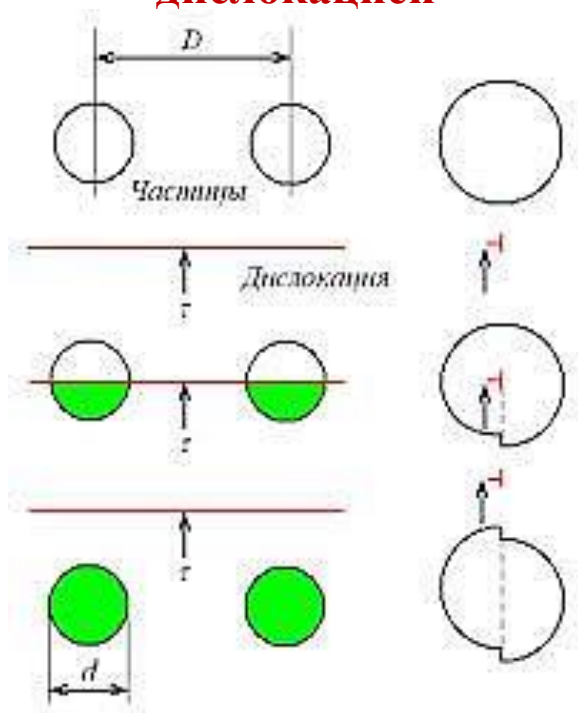
Возле недеформируемых частичек дислокация **тормозится** и выгибается между ними (а), **образуя петлю**. Оставив петлю, дислокация продолжает скользить (б), а петли препятствуют движению новых дислокаций.

Дислокационные петли вокруг частичек создают упругие напряжения, которые затрудняют движение дислокаций. **Напряжение проталкивания дислокации обратно пропорционально расстоянию между частицами.**

Влияние природы частиц на торможение дислокаций

Большие некогерентные частицы, находящиеся на значительном расстоянии одна от другой, обычно огибаются дислокациями с образованием петель.

Перерезание частицы дислокацией



Деформируемые частички с малым модулем упругости G могут перерезаться дислокацией. Чем частица прочнее, тем труднее ее перерезать. Упрочнение металла происходит за счет работы, совершаемой дислокацией при перерезании частицы.

[21]

Упрочнение дисперсными частицами достигает $10^{-2} G$ кгс/мм², но при нагреве до температуры $0,5 - 0,75 T_{пл}$ оно резко уменьшается.

Вклад дисперсных частиц в упрочнение материала

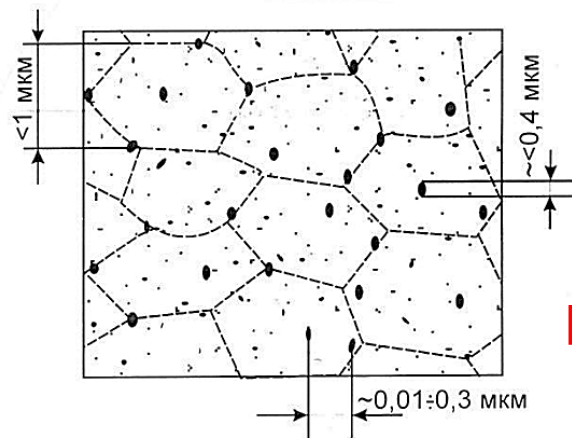
Значительное **торможение дислокаций** и, следовательно, **упрочнение металла** достигается при размере частиц $< 5 \text{ мкм}$ и малом расстоянии между ними.

Влияние частиц на прирост прочности:

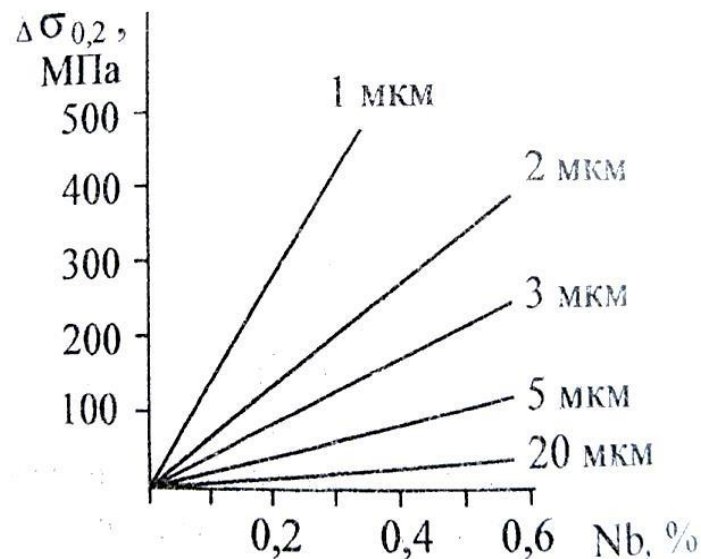
$$\Delta \sigma_{\text{дч}} \sim f^{1/2} / r,$$

f – объемное содержание частиц;

r – средний размер частиц.



[22]



[16]

2. Вклад механизмов упрочнения в общий уровень предела текучести

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{n-n} + \Delta\sigma_{\delta} + \Delta\sigma_{tr} + \Delta\sigma_{zg} + \Delta\sigma_{\delta\chi}$$

σ_{n-n} — напряжение трения решетки;

$\Delta\sigma_{\delta}$ — прирост за счет дислокационного механизма;

$\Delta\sigma_{tr}$ — прирост за счет твёрдорастворного механизма;

$\Delta\sigma_{zg}$ — прирост за счет зернограничного механизма;

$\Delta\sigma_{\delta\chi}$ — прирост за счет дисперсионного упрочнения.

Вклад σ_{n-n} очень мал и его можно не учитывать.

Все механизмы существенно влияют на прочность и другие свойства, в частности на трещиностойкость, и определяют конструкционную прочность сплавов.

Если в стали присутствует перлитная составляющая, то добавляется ещё прирост $\Delta\sigma_n$.

Вклад каждого механизма можно оценить, используя соотношение между плотностью препятствий на пути движения дислокаций и приростом прочности

Для дислокационного механизма – $\Delta\sigma_d \sim \rho^{1/2}$

Для твёрдорастворного механизма – $\Delta\sigma_{TR} \sim G\epsilon^2C$

G – модуль сдвига материала основы сплава; C – концентрация примесного элемента; ϵ – параметр размерного несоответствия $(r - r_0) / r_0$, где r_0 – размер атомов основного металла; r – размер атома примеси.

Для зернограничного механизма – $\Delta\sigma_{zg} \sim d^{-1/2}$

Количественно зависимость предела текучести от размера зерна описывает уравнение Холла - Петча

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + kd^{1/2}$$

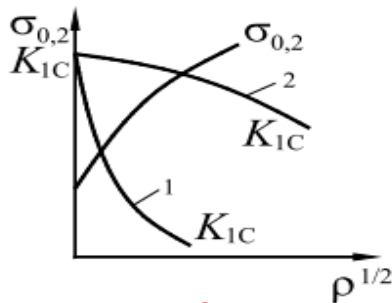
σ_0 – предел текучести монокристалла; k – коэффициент, зависящий от природы материала; d – размер зерна, субзерна.

Для дисперсионного механизма – $\Delta\sigma_{dc} \sim \frac{\sqrt{f}}{r}$

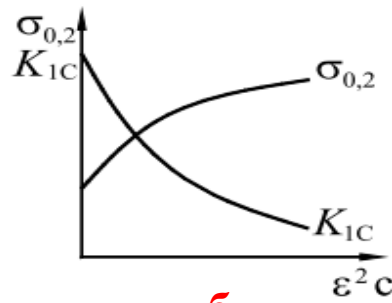
f - объёмное содержание частиц; r –средний размер частиц

3. Взаимосвязь между конструкционной прочностью и механизмом упрочнения

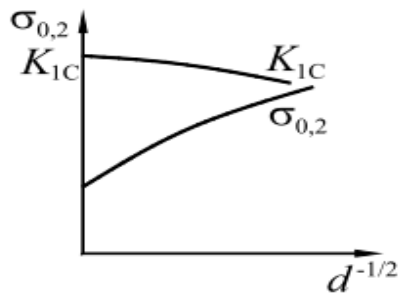
Трещиностойкость в значительной степени обуславливает конструкционную прочность.



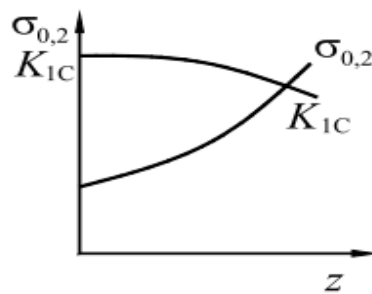
а



б



в



г

При хаотичном расположении дислокаций (кривая 1 на рис. **а**) трещиностойкость резко снижается. Перестройка дислокаций в ячеистую субструктуру существенно повышает трещиностойкость (кривая 2 на рис. **а**)

[16]

При всех механизмах упрочнения повышение предела текучести сопровождается уменьшением трещиностойкости, но темп ее снижения различный.

Наилучшими механизмами являются зернограничный (в) и дисперсионный (г).

Требования к микроструктуре для обеспечения надежности изделий

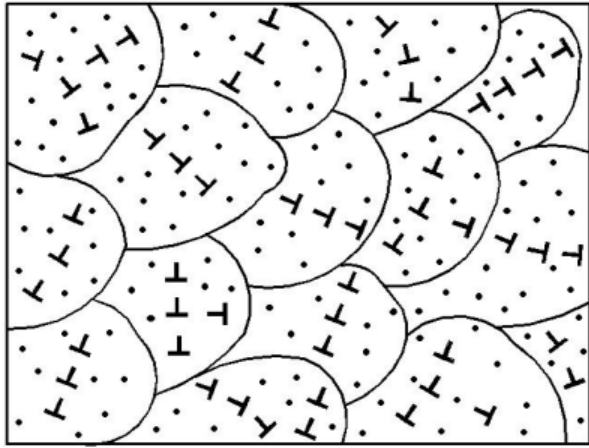


Схема структуры, [16]
обеспечивающей высокую
конструкционную прочность.

Наличие **мелкого зерна** с развитой внутренней **субструктурой** и с равномерно распределенными в нём **высокодисперсными прочными частицами** — это **полупроницаемые барьеры для движущейся дислокации.**

Повышается конструкционная прочность. При этом достигается и наиболее низкий порог хладноломкости.

Такая структура при заданном уровне прочности **обеспечит** необходимую пластичность и высокую трещиностойкость, а следовательно, **надежность изделия.**

4. Влияние механизмов упрочнения на порог хладноломкости

Рост прочности, как правило, сопровождается повышением порога хладноломкости. Однако не все механизмы упрочнения влияют одинаково.

Изменение порога хладноломкости упрочненной стали :

$$\Delta t_{xp} = 0,5 \Delta \sigma_{TP} + 0,4 \Delta \sigma_{\partial} + 0,3 \Delta \sigma_{\partial ч} - 0,7 \Delta \sigma_{зг}$$

Множитель перед $\Delta \sigma$ – это коэффициент охрупчивания при упрочнении.

Только зернограницный механизм упрочнения приводит к снижению температуры вязко – хрупкого перехода.

Малый коэффициент охрупчивания ещё достигается упрочнением дисперсными частицами.

Сочетание зернограницного и дисперсионного механизмов упрочнения способствует повышению конструкционной прочности и надежности изделий.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Дать объяснение почему в металлических сплавах трудно одновременно достичь повышения прочности и трещиностойкости.
2. Физический смысл параметров трещиностойкости.
3. Объяснить природу механизмов упрочнения.

Литература

1. Дьяченко С.С. Материаловедение : учебник / С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, А.А. Мовлян, Э.И. Плешаков.- Харьков: Издательство ХНАДУ, 2010.- 464 с. (78 - 81).



Лекция 5

**Пути повышения
конструкционной прочности
традиционных сталей**

Содержание

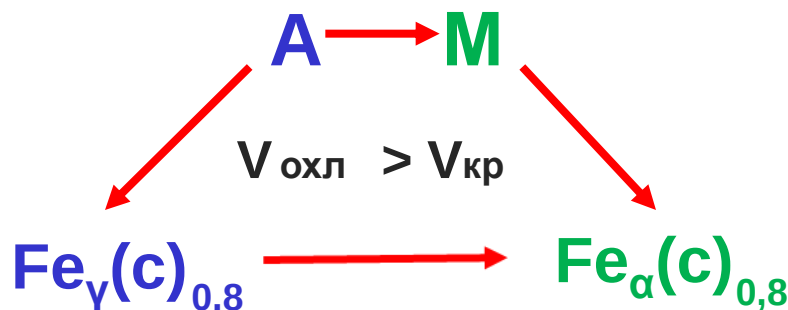
1. Механизмы упрочнения стали при закалке.
2. Стали с карбонитридным упрочнением.
3. Влияние чистоты стали на конструкционную прочность.
4. Измельчение зерна - эффективный метод повышения конструкционной прочности.
5. Поверхностная пластическая деформация – способ повышения долговечности изделий.

1. Механизмы упрочнения стали при закалке.

Цель закалки – получение структуры мартенсита.

Происходит бездиффузионное превращение.

Мартенсит –
пересыщенный
твердый раствор
углерода в Fe α .
Упрочнение
обусловлено
твёрдорастворным
эффектом.



Закалка приводит
к резкому
повышению
плотности
дислокаций в
стали

$$\rho \sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$$

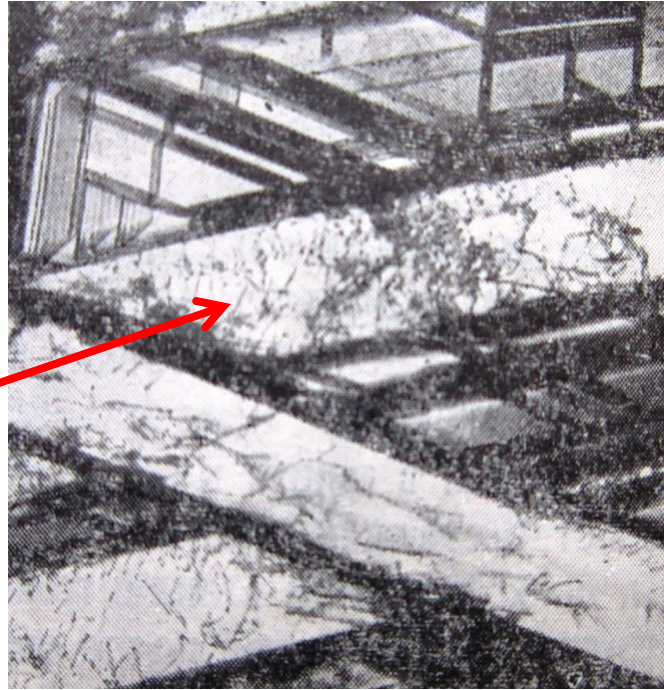
Вклад твёрдорастворного механизма $\Delta\sigma_{\text{тр}}$ 40 - 45% от общего
уровня прочности $\sigma_{0,2}$.

Вклад дислокационного механизма $\Delta\sigma_{\text{д}}$ до 30%.

Мартенситное превращение

При превращении аустенита в мартенсит в аустенитном зерне появляются поверхности, разграничивающие мартенситные кристаллы и имеющие сложную субструктуру.

Реализуется зернограничный механизм.



В процессе мартенситного превращения часть его распадается с образованием карбидных частиц.

Работает дисперсионный механизм.

Вклад зернограничного и субструктурного превращений $\Delta\sigma_{зг}$ 15-20%.

Вклад высокодисперсных частиц $\Delta\sigma_{дч} \sim 10-15\%$.

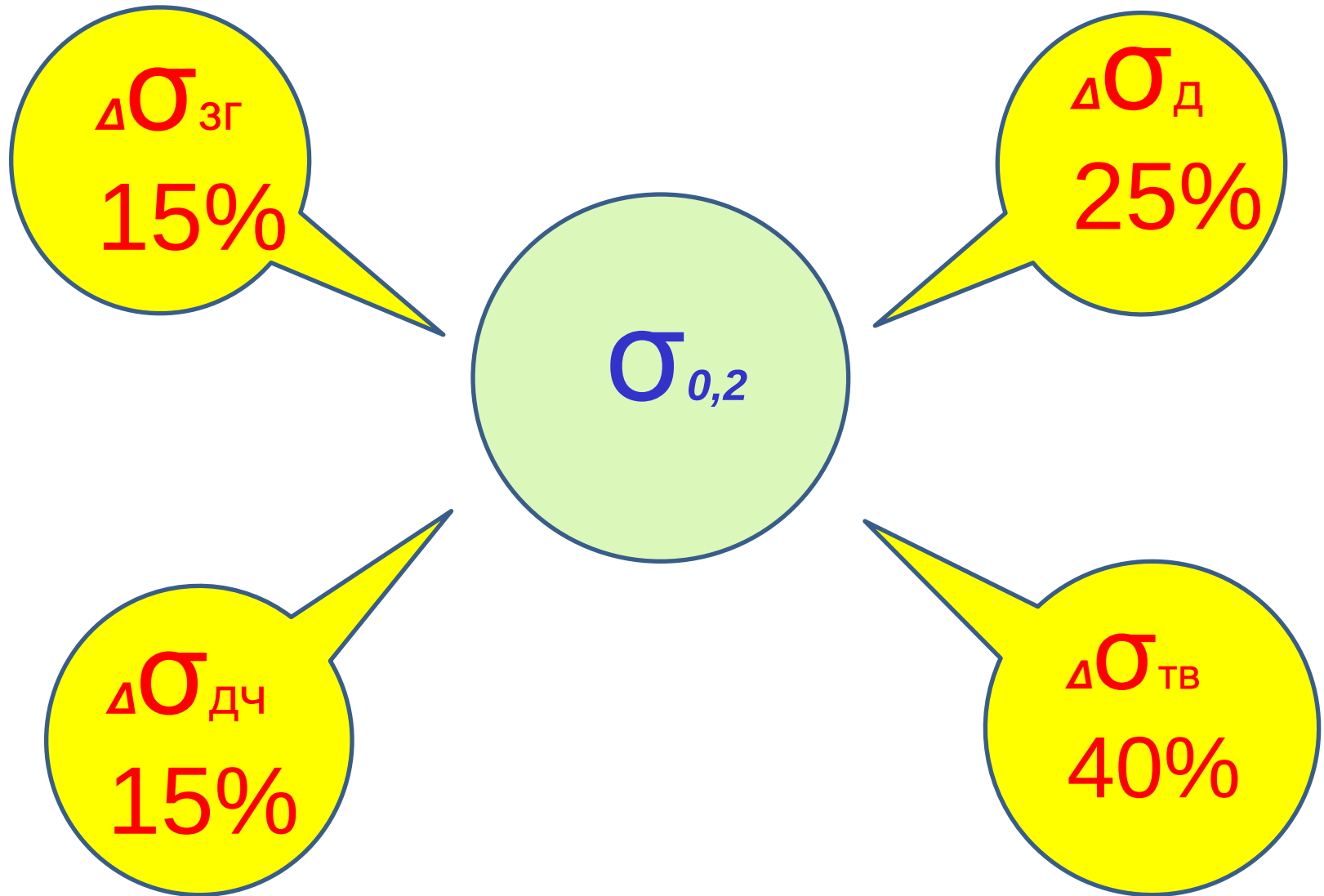
После закалки у стали высокопрочное хрупкое состояние с большими внутренними напряжениями

Механические свойства стали 40 после различной термической обработки

Термическая обработка	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	КС, Дж/см ²	K _{1с} , МПа·м ^{1/2}
Закалка	1300	950	1 !	3!	10!	60
Закалка + отпуск 600 °С	700	550	20 !	60 !	120 !	110

Закалённую сталь нельзя эксплуатировать в условиях сложных нагрузок, особенно циклических и ударных. Для обеспечения пластичности и ударной вязкости в сочетании с прочностью нужен высокий отпуск, при котором мартенсит распадается на смесь $\phi + \psi$ зернистого строения.

Вклад механизмов упрочнения при закалке



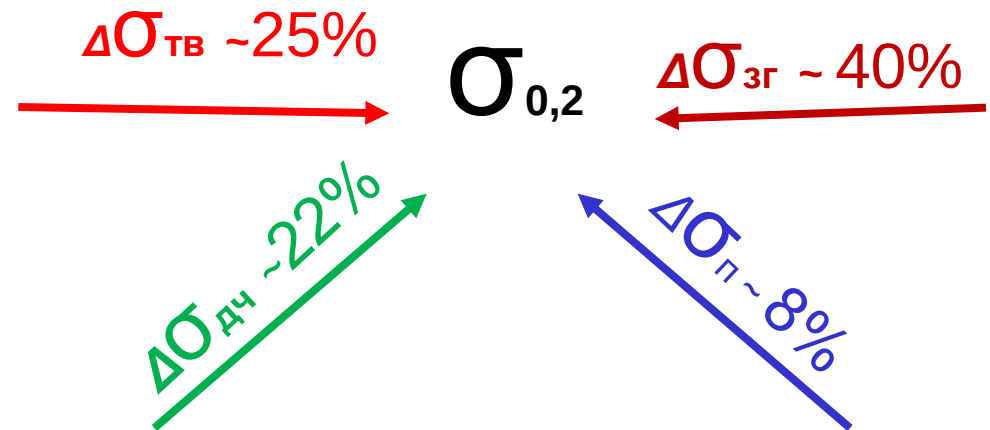
2.Стали с карбонитридным упрочнением

Это стали легированные N, V, Nb, Ti.

15 ГФ, 14Г2АФ, 20ГФБ

Легировующие элементы с углеродом и азотом образуют **высокодисперсные карбиды и карбонитриды** размером 30-40нм. Они **измельчают зерно** и существенно **повышают прочность за счёт дисперсионного упрочнения**. В стали присутствует ~ 15% перлита.

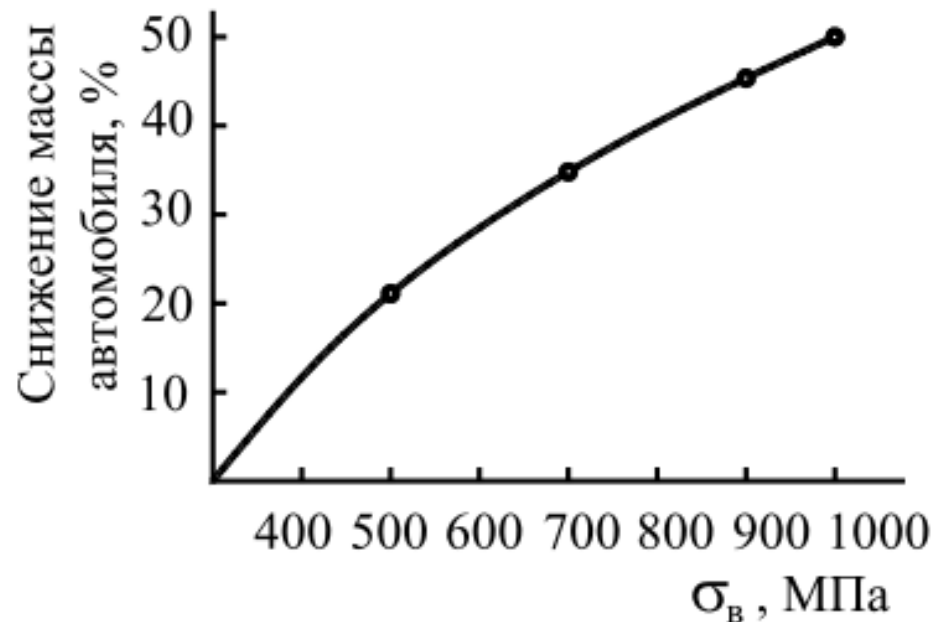
Сталь 14Г2АФ



Сталь 14Г2АФ в **нормализованном состоянии** при **$\sigma_{\text{в}} \sim 800 \text{ МПа}$** имеет **$\delta \sim 25\%$, $\text{КСУ} \sim 40 \text{ Дж/см}^2$**

Применение низколегированных высокопрочных сталей с карбонитридным упрочнением

Стали широко
используются в
машиностроении,
особенно в
автомобилестроении,
для несущих
элементов сварных
конструкций.



Повышение σ_B до 800-900 МПа позволит снизить массу автомобиля на 30-40%, а до 1000-1100 МПа – на 50%.

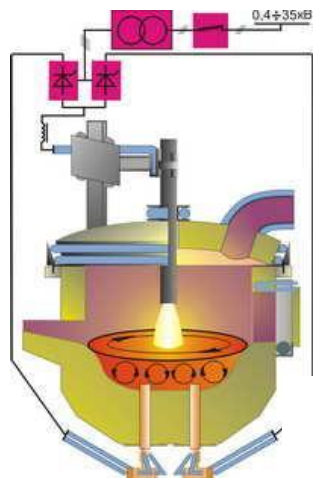
Металл с большой конструкционной прочностью увеличивает надежность машин т.к. повышает трещиностойкость



Компания “Volvo”
около 50%
различных деталей
изготавливает из
высокопрочных
низколегированных
сталей.

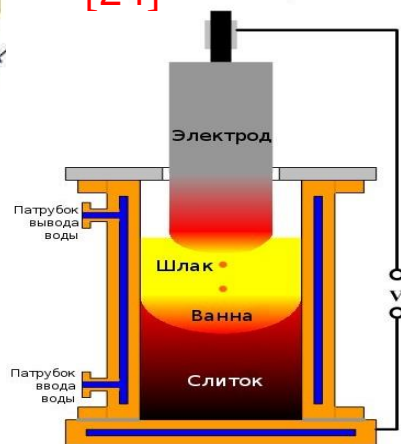
Они нашли
применение и в
различных марках
японских машин.

3. Влияние чистоты стали на конструкционную прочность

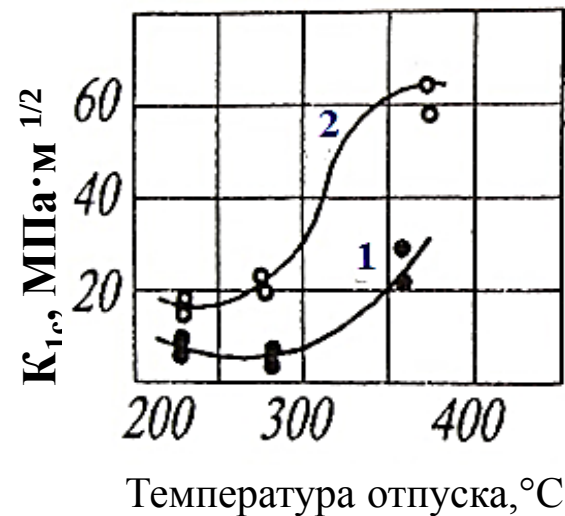


Основные методы очистки стали от вредных примесей - вакуумный и электрошлаковый переплав.

[24]



[25]



1 - обычная электросталь;
2 - выплавка в вакууме.

[23]

Вредные примеси мало влияют на прочность и пластичность, но существенно снижают ударную вязкость, работу развития трещины, повышают порог хладноломкости и трещиностойкость.

Влияние вредных примесей (ppm) на свойства стали 40Х2Н после улучшения (А.П. Гуляев)

Степень чистоты стали	Общее количество примесей, ppm	Свойства						
		σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	KCr, Дж/см ²	t _{хр} , °C
Обычная	1642	1080	960	19	59	97	55	-40
чистая	1214	1040	930	19	58	112	68	-80
Высоко-чистая	547	1060	940	19	59	191	155	-110

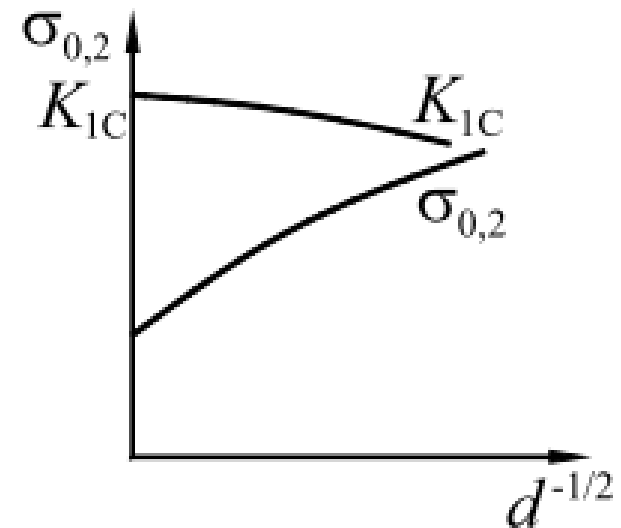
Очистка (рафинирование) стали — важный фактор повышения конструкционной прочности стали.

4. Измельчение зерна – эффективный метод повышения конструкционной прочности.

Закон Холла-Петча $\sigma_{0,2} = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$

Методы получения мелкого зерна:

1. Наследственно мелкозернистые стали
2. Стали с карбонитридным упрочнением.
3. Модифицирование.
4. Быстрая кристаллизация.
5. Скоростной нагрев при термообработке (ТВЧ, пропусканием электрического тока).



Зернограничное упрочнение
не сопровождается заметным
снижением трещиностойкости

Сверхмелкое зерно (2 - 3 мкм) обеспечивает сочетание прочности, пластичности, вязкости, низкого порога хладноломкости и является очень эффективным методом повышения конструкционной прочности.

5. Поверхностная пластическая деформация – способ повышения долговечности изделий

Наиболее широко используемые способы ППД - накатывание поверхности разными инструментами (шариками, роликами), обдувка дробью, алмазное выглаживание и др.

Глубина

деформированного слоя
обычно 0,2–0,5 мм, но
можно достичь и 20 мм.

ППД существенно
уменьшает шероховатость
поверхности, создает в
поверхностном слое
сжимающие напряжения,
приводит к наклёпу.



Накатывание роликом [26]

Уменьшается число
концентраторов
напряжений - источников
образования трещин.

Увеличивается
сопротивление развитию
имеющихся микротрещин.

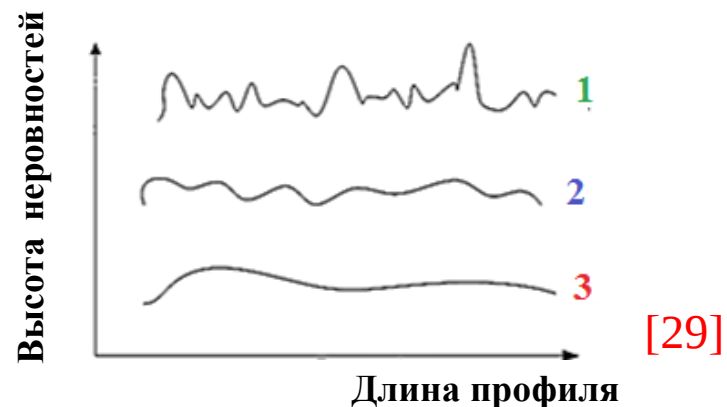


Обдувка дробью [27]



Алмазное выглаживание [28]

Уменьшение шероховатости поверхности и возникновение благоприятных сжимающих напряжений приводит к существенному повышению сопротивления развития трещин в изделии (вязкости разрушения K_{1c}), т. е. к повышению их долговечности.



Профили поверхности после точения (1), шлифования (2), ППД (3).

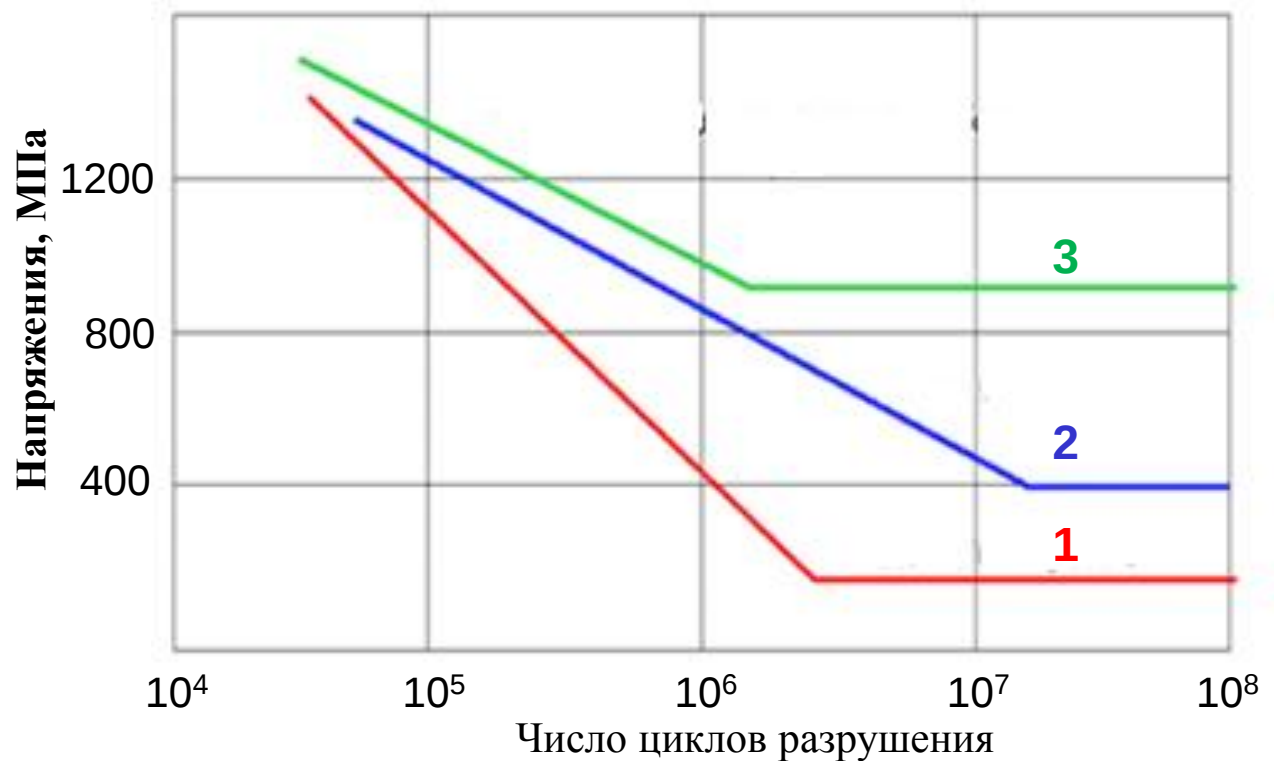
Влияние поверхностной обработки разными способами ППД на остаточные напряжения и вязкость разрушения стали 40Х

Вид поверхностной обработки	Сжимающие напряжения, МПа	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}
Исходное состояние	0	44
Обкатка роликами	– 90	51
Фрикционная упрочняющая обработка + обкатка	– 170	60

Поверхностная пластическая деформация – эффективный способ повышения усталостной прочности.

Источниками образования первых мест скопления дислокаций и возникновения субмикроскопических трещин являются поверхностные концентраторы напряжений.

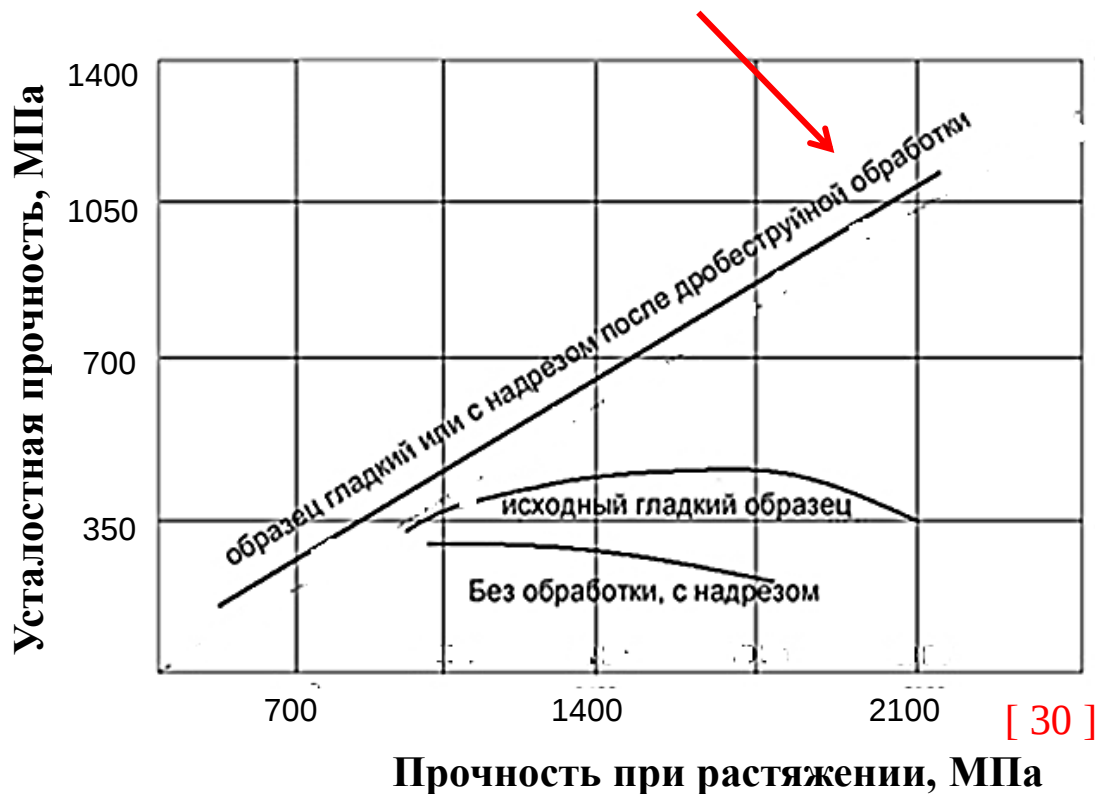
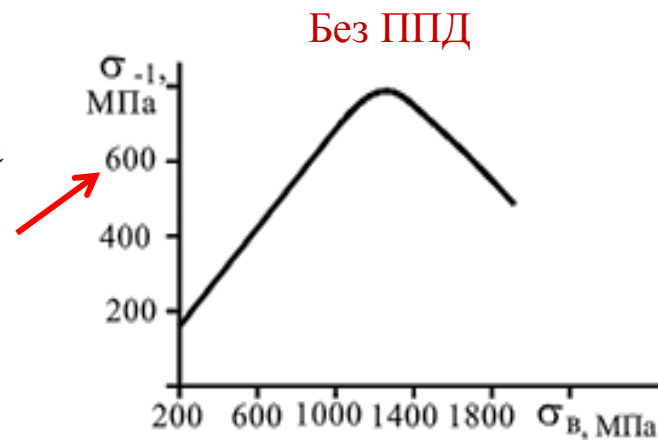
ППД способна полностью нейтрализовать значительную шероховатость поверхности после шлифования и повысить сопротивление усталостному разрушению.



Кривые усталости для стальных образцов после разной конечной обработки: 1 – жёсткое шлифование; 2 – мягкое шлифование; 3 – жёсткое шлифование + дробеструйная обработка [29]

ППД изменяет вид зависимости σ_{-1} від σ_B . Как известно, с увеличением σ_B материала сопротивление усталости сначала увеличивается, достигая максимума (для стальных образцов при $\sim \sigma_B = 1300$ МПа), а потом уменьшается из-за охрупчивания.

После ППД снижения σ_{-1} не происходит не только для гладких поверхностей, но и с концентратором напряжений - **предел выносливости растёт**.



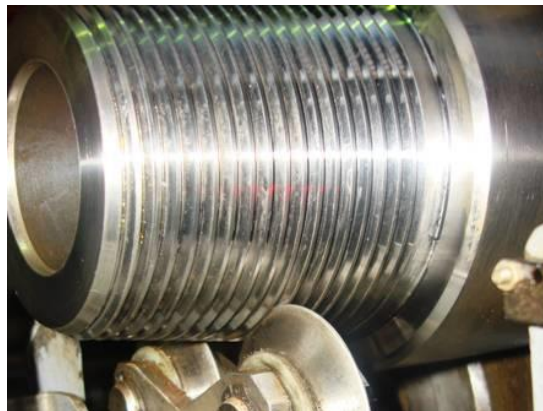
Прирост σ_{-1} после ППД зависит от состава стали, её структуры и свойств. Он наибольший для сталей средней прочности (18Х2Н4ВА, 38ХС), но и при мартенситной структуре может достичь 50–86 %.

Для сталей с высокой прочностью ППД также является эффективным способом повышения долговечности.

ППД эффективно используется для многих изделий **как завершающая операция** перед сборкой деталей в узлы.

ППД подвергают

коленчатые стальные и чугунные валы, торсионы, зубчатые колёса, шатуны, рессорные листы, пружины разного назначения, цилиндры двигателей, поршни, лопатки, сварные соединения и много других изделий



[31]

Обкатка резьбы роликом

После ППД

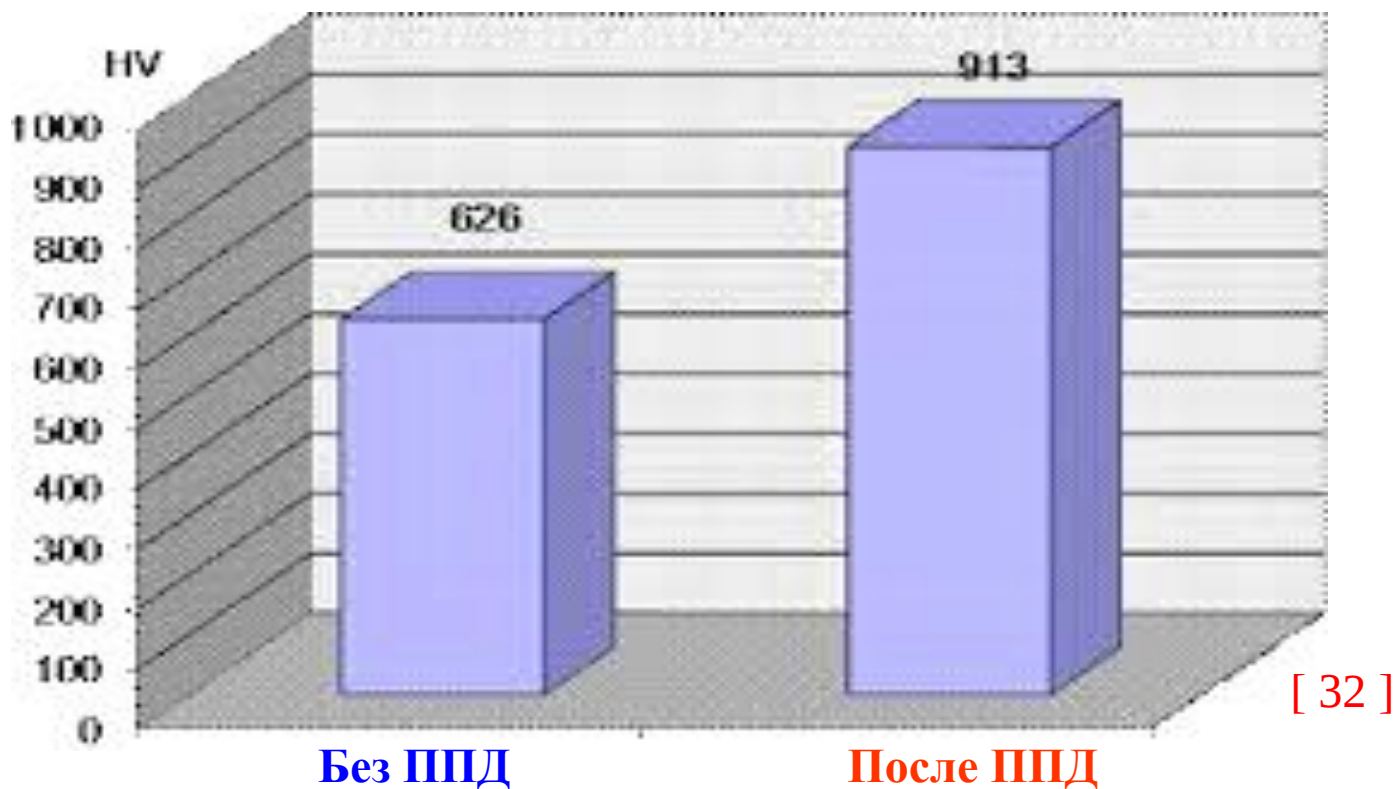
долговечность рессор повышается на 600%, пружин - на 2500%, полуосей – на 1900%, шатунов – на 1000%, зубчатых колес – на 400%, сварных соединений – на 300%.

Особенно важно **подвергать ППД поверхности**, где **возникают растягивающие напряжения** (галтели зубьев шестерен, шеек валов).

За счет ППД конструктивная прочность изделий повышается в 1,5 раза.

При ППД наклёп поверхностного слоя изделия за счёт изменения внутренней зёрненной структуры (дробление блоков, увеличение плотности дислокаций, повышение микронапряжений в субзернах) приводит к повышению твёрдости.

Твёрдость поверхности после ППД



Вопросы для самостоятельной работы

1. Влияние ускоренного нагрева при закалке на величину зерна и механические свойства материалов.
2. Характеристики материала, обуславливающие надежность изделия.
3. Примеры использования ППД для деталей автомобиля.

Литература

1. Дьяченко С.С. Материаловедение : учебник / С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, А.А.Мовлян, Э.И. Плешаков.- Харьков: Издательство ХНАДУ, 2010.-464 с. (стр.280 -285).
2. Гладкий И.П.Технология конструкционных материалов и материаловедение : учебное пособие / И.П. Гладкий, В.И. Мощенок, В.П. Тарабанова, Н.А. Лалазарова, Д.Б. Глушкова.- Харьков: ХНАДУ,2011.-460 с.(стр.416 – 417).



Лекция 6

Новые направления повышения конструкционной прочности сталей

Содержание

1. Термомеханическая обработка.
2. Гидроэкструзия.
3. Отпуск под нагрузкой.
4. Мартенситно - стареющие стали.
5. Стали с пластичностью, наведенной превращением.
6. Обобщенная диаграмма конструкционной прочности сталей.

1. Термомеханическая обработка (ТМО)

Это сочетание двух способов упрочнения – пластической деформации и термической обработки, выполненных в определенной последовательности.

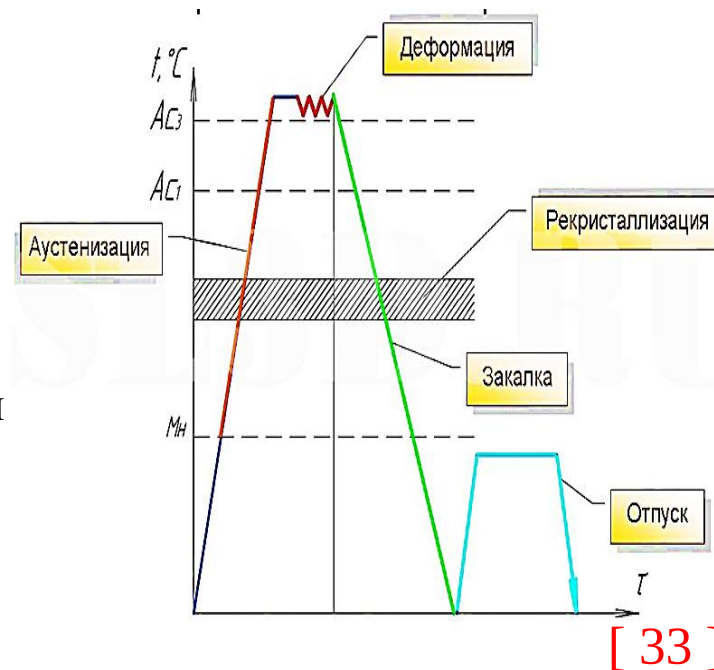
Высокотемпературная термомеханическая обработка - ВТМО

ВТМО – нагрев выше

$A_{с3}$ в аустенитную область. Деформация

$\epsilon = 20-30\%$.

После деформации сразу же быстро проводят **закалку**, чтобы предотвратить развитие рекристаллизационных процессов.



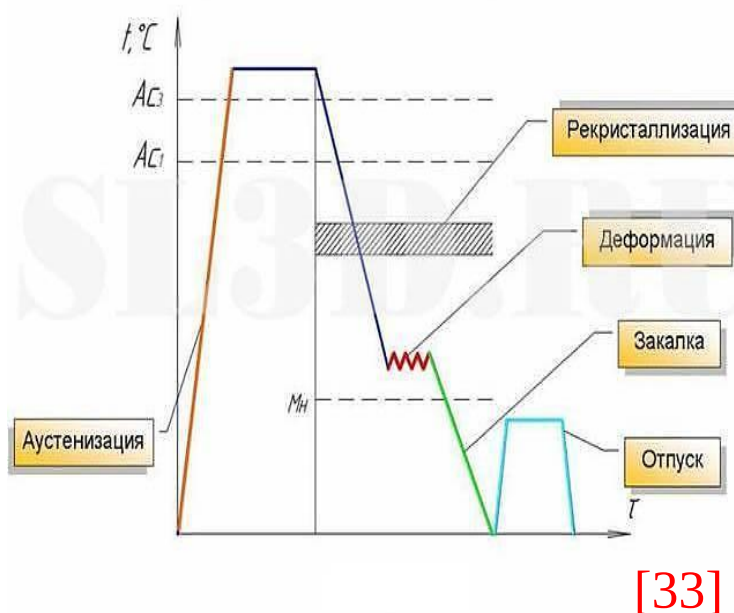
Допускается лишь первичная рекристаллизация с образованием ультрамелкого зерна. После деформации сразу же быстро проводят **закалку**, чтобы предотвратить развитие рекристаллизационных процессов.

Низкий отпуск при температуре 100...200°C обеспечивает структуру мартенсита отпуска, что позволяет сохранить высокие значения прочности при достаточной пластичности и уменьшить закалочные напряжения.

Низкотемпературная термомеханическая обработка - НТМО

НТМО – после нагрева в аустенитную область сталь быстро охлаждают до температуры **350-400°C** и деформируют с большой степенью – (**$\epsilon = 75-90\%$**).

Затем производят **закалку и низкий отпуск.**



Температура деформации должна быть **выше** точки **M_n** , но **не ниже** **t_p** . Обеспечивает **наибольшее упрочнение** - до 3000МПа. Технологически обработка сложная.

НТМО требует мощных деформирующих средств, так как для получения высокой прочности необходимы большие степени обжатия (до 90 %), а аустенит в области температур 350 – 450 °С не столь пластичен.

После **ТМО** наличие мелкого зерна, дробление блоков, развитая ячеистая дислокационная структура, повышение плотности дислокаций, уменьшение концентрации углерода в мартенсите **обеспечивают** уникальное сочетание прочности, пластичности, вязкости трещиностойкости и усталостной прочности материала т.е. **повышение конструкционной прочности.**

**Свойства среднеуглеродистых конструкционных сталей
(30ХГСА, 45ХН, 40ХНМА) после НТМО ВТМО и ОТО**

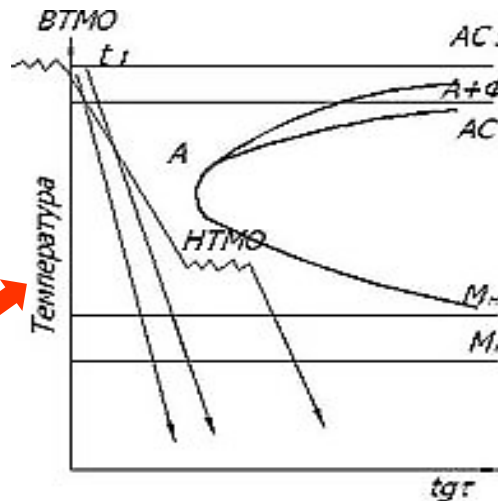
Обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	КС, Дж/см ²
НТМО	2200 - 3000	2000 - 2400	6 - 8	20 - 40	50 - 60
ВТМО	2100 - 2700	1900 - 2200	9 - 11	30 - 45	55 - 67
ОТО	1680	1530	7	24	
Сталь 45ХН (закалка + отпуск 200°С).					

Предел выносливости после ТМО увеличивается ~ в 3 раза.

Коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} при 20° С **возрастает** на 10 %, при -80 °С – на 50 %, а **температура вязко-хрупкого перехода понижается** на 20°С.
Уменьшится материалоемкость ввиду безотходности процесса.

Применение ТМО

НТМО применяют для изделий небольшого сечения и простой формы. Эта обработка пригодна для легированных сталей с устойчивостью переохлажденного аустенита. Технологические трудности **ограничивают** её использование.



ВТМО широко используют для углеродистых, легированных, конструкционных и инструментальных сталей после различных способов деформирования (прокатка, ковка, штамповка).

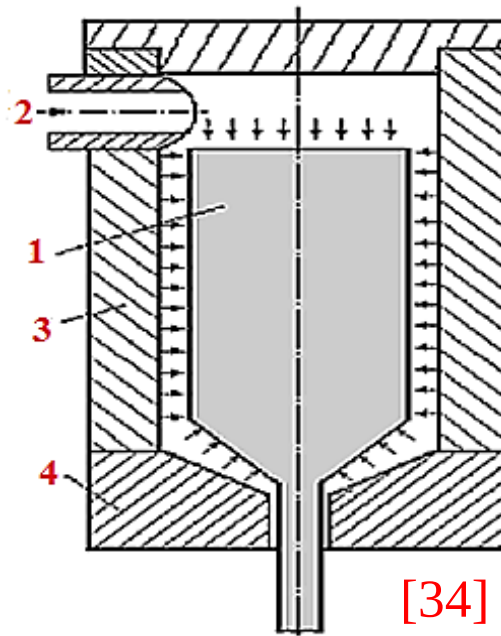
Но **упрочнение несколько ниже**, чем при НТМО.

Разновидностью ТМО является **контролируемая прокатка** низколегированных сталей и особенно с карбонитридным упрочнением (14Г2АФ, 09Г2ФБ). Жёстко регламентируются режим деформирования (температура, степень деформации) и условия охлаждения. Одновременно **повышаются прочность, пластичность, вязкость** и **снижается порог хладноломкости** без дополнительной термообработки.

2. Гидроэкструзия

Это прессование изделий жидкостью высокого давления.

Это **обработка металла давлением**, при которой **заготовка 1**, помещенная в замкнутый контейнер **3**, выдавливается через канал матрицы **4** **воздействием на неё жидкости 2 высокого давления** (0,5-3 ГПа).



Создаются **условия всестороннего сжатия** материала. Полностью **исключаются растягивающие напряжения**. **Повышается граничная пластичность** материала **более чем в 10 раз**, что позволяет деформировать без образования трещин очень хрупкие материалы.

1 - заготовка; **2** - жидкость; **3** - контейнер;
4 - матрица.

Применение гидроэкструзии незаменимо при получении изделий из труднодеформируемых хрупких материалов, а также при необходимости обеспечения больших степеней деформации.

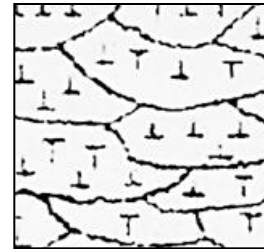
Изменение микроструктуры и дислокационного строения в процессе гидроэкструзии

Этим способом можно измельчить зерно до $250 \sim 300$ нм ($0,25-0,3$ мкм) с углом разориентировки $10-12^\circ$ (обеспечить среднеугловые границы).

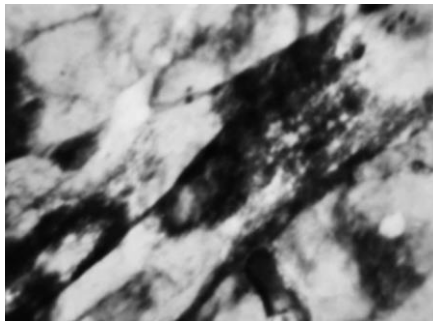
Увеличивается плотность дислокаций, происходит дробление блоков, формируется тонкая полигональная структура.



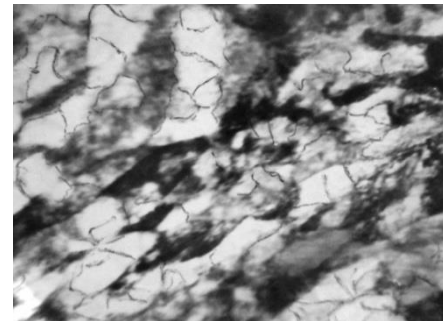
$\epsilon \sim 10\%$



$\epsilon \sim 60\%$



$\epsilon \sim 10\%$



$\epsilon \sim 60\%$

Реализуются зернограницный и дислокационный механизмы упрочнения.

$$\sigma_{0,2} \uparrow, K\sigma \uparrow, K\sigma_{1c} \uparrow, \delta \uparrow, \psi \uparrow, t_{xp} \downarrow$$

Преимущества и недостатки гидроэкструзии

Преимущества процесса: значительное повышение пластичности обрабатываемого металла, отсутствие неравномерности деформации, уменьшение удельного давления прессования (на 30-40%), возможность деформирования в холодном состоянии хрупких материалов, повышение стойкости матриц, безотходность, высокая производительность.

Существенное повышение конструкционной прочности обрабатываемого материала.

Можно получать сечение **любого сложного профиля** **очень точных размеров** с однородной деформацией.

Недостатки метода: сложность конструкций и эксплуатации оборудования. Очень большое давление жидкости требует многослойных контейнеров, совершенных уплотнений, тормозящих устройств сложной конструкции, чтобы заготовка не перемещалась с очень большой скоростью.



Установка для
гидропрессования
[35]

3.Отпуск под нагрузкой

К изделию во время отпуска прикладывается медленно возрастающее напряжение $\sigma = 0,5 - 0,8 \sigma_{02}$

Происходит релаксация локальных напряжений, взаимодействие дислокаций с точечными дефектами, что способствует повышению прочности при сохранении высокой трещиностойкости.

Режим термообработки	Свойства			
	$\sigma_{\text{в}},$ МПа	$\sigma_{02},$ МПа	$\sigma_{-1},$ МПа	K1c
Отпуск при 200°	2190	1770	768	24
Отпуск под растягивающими напряжениями	2230	2030	850	27

Этот вид отпуска можно использовать для залечивания микро- и макродефектов (пор, микротрещин).

4.Мартенситно – стареющие стали

Классическая сталь - 03Н18К9М5Т

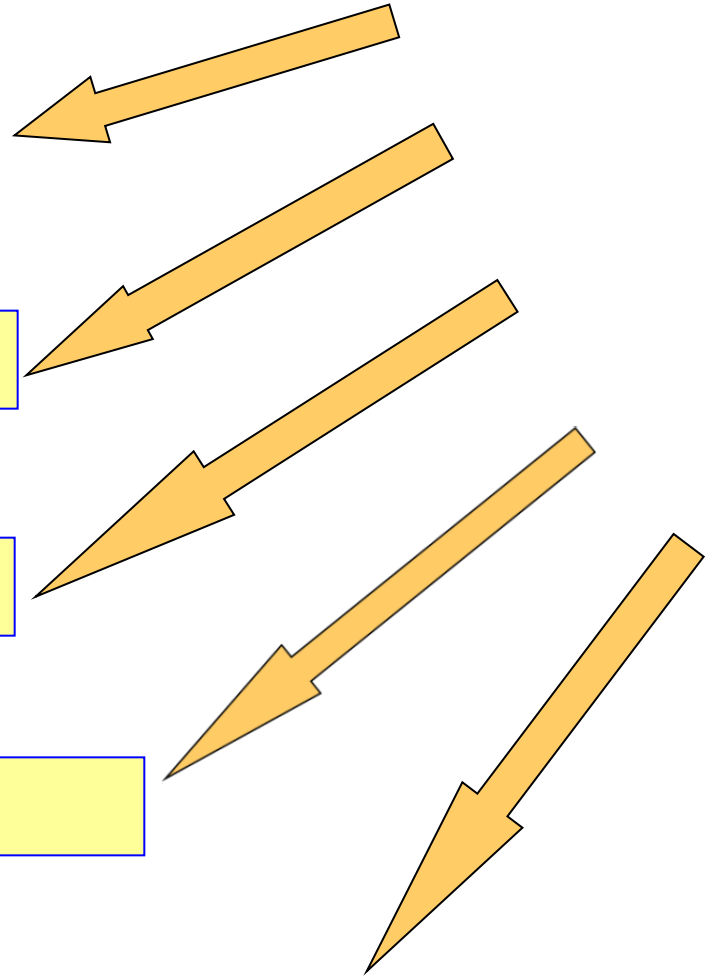
Углерод ~ 0,03 – 0,05 %

Никель 8 - 20 %

Хром 10 - 11 %

Титан ~ 0,6 %

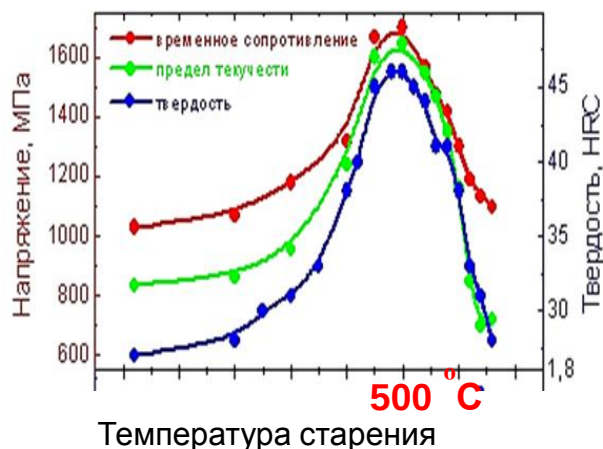
Кобальт 8 - 9 %, молибден 2- 5 %



Термообработка мартенситно – стареющей стали



Безуглеродистый «массивный» мартенсит в виде пакетов ферритных пластин с малоугловыми границами.



Закалка и старение при 480 – 520 °С.

После закалки образуется практически безуглеродистый мягкий, пластичный и вязкий мартенсит.

Максимальное упрочнение достигается при старении за счёт выделения в мартенситной матрице высокодисперсных интерметаллидов (NiTi, Fe₂Mo, NiAl и др.).

Высокая плотность дислокаций и границ в объеме мартенсита обеспечивают однородное распределение при старении интерметаллидов с расстоянием между ними 0,2 – 0,5 мкм.

Характеристики прочности значительно возрастают при сохранении высокой пластичности – **повышается конструкционная прочность стали.**

Свойства мартенситно – стареющих сталей

Марка стали	Содержание элементов, %								Механические свойства		
	Ni	Co	Mo	Cr	Ti	Al	C	прочие	σ_B , МПа	ψ , %	KCU, МДж/м ²
H18K9M5T	18	9	5	—	0,7	0,15	0,02	—	2100	50	0,3
03X11H9M2T	9,7	—	2	10,8	0,7	—	0,03	—	1600	60	0,7
H12X5M3	11,5	—	2,5	4	0,15	0,10	0,03	—	1200	68	0,9
08X15H5D2T	5	—	—	14,5	0,10	—	0,08	2Cu	1300	58	1,4
30H8K4XMФ	8	5	1	1	—	—	0,32	0,1V	1600	55	0,8

При большой прочности $\sigma_B = 1900 - 2100$ МПа и твёрдости 52 - 55 HRC сталь 03H18K9M5T имеет вязкость разрушения $K_{Ic} = 50-70$ МПа·м^{1/2}. Даже при температуре -196°C прочность $\sigma_B = 2100$ МПа, $\delta = 10\%$ и KCU = 30 Дж/см².

В обычных легированных сталях при таком значении прочности K_{Ic} не превышает 30 МПа·м^{1/2}.

Высокая прокаливаемость этих сталей позволяет получить мартенситную структуру независимо от скорости охлаждения после аустенизации.

Механизмы упрочнения мартенситно – стареющих сталей

В сталях реализуются 3 механизма упрочнения:

1.Твердорастворное упрочнение. Эти стали относятся к высоколегированным (зачастую суммарное содержание легирующих элементов больше 50%), поэтому вклад твердорастворного упрочнения весьма значителен.

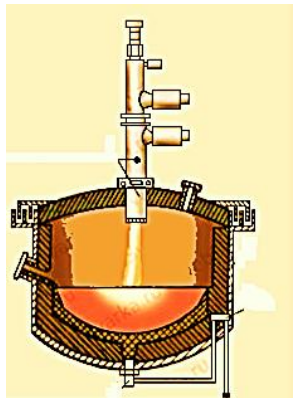
2.Упрочнение при мартенситном превращении (дислокационное).

Мартенсит матрицы стали является практически безуглеродистым и формируется вследствие легирования элементами замещения, а не внедрения (как в случае Fe-C). Тем не менее, он имеет большую плотность дислокаций, что и приводит к упрочнению.

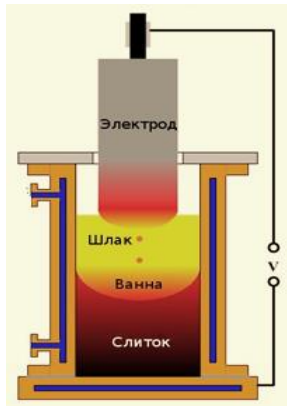
3.Упрочнение дисперсными частицами. В процессе старения происходит выделение высокодисперсных частиц - интерметаллидов, имеющих размеры порядка десятков ангстрем, высокую плотность и когерентность с мартенситной матрицей. Это обуславливает значительное упрочнение.

Эти **три механизма в сумме** обеспечивают **высокую конструкционную прочность сталей**, которая сохраняется в широком интервале температур (**от криогенных до 400°C**).

Свойства и применение мартенситно – стареющих сталей



Вакуумно-дуговая
плавка



Электрошлако-
вый переплав

Для стабилизации значений пластических характеристик, обеспечения сопротивления хрупкому разрушению, увеличения усталостной прочности при производстве сталей используют индукционные печи, вакуумно – дуговую и электрошлаковую плавки, повышающие чистоту по содержанию неметаллических включений, газов и примесей.

Стали обладают хорошими технологическими свойствами, В закалённом состоянии могут подвергаться деформации, хорошо обрабатываются резанием, легко свариваются и сварные соединения не склонны к образованию горячих и холодных трещин. Коррозионно - и эрозионностойки. Имеют минимальные деформации при термообработке.

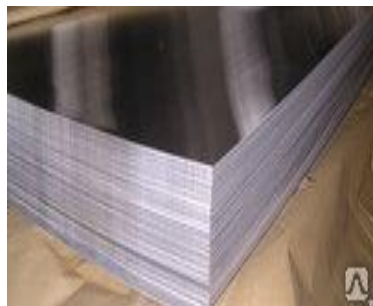
Изготавливают поковки, штамповки, листы, отливки, прутки и проволоку, в том числе сварочную. **Используют стали** в авиации и ракетной технике (оболочки летательных аппаратов), для ответственных тяжелонагруженных деталей (осей, болтов, валов) и сварных соединений, ёмкостей высокого давления в криогенной технике.

Недостатки мартенситно – стареющих сталей

Так как упрочняющей фазой являются мелкие и относительно мягкие (не более HV 1100) интерметаллиды, **стали имеют относительно невысокую** (для данной твердости) **абразивную износостойкость**. Проблему решают введением в состав стали твердых частиц, не участвующих в превращениях при термообработке.

С твердостью выше HRC 60 стали массово не производятся.

Стали высоколегированные , дорогие. Поэтому идут по пути некоторого повышения содержания углерода и снижения количества легирующих элементов, особенно Ni.



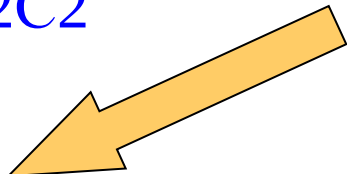
Базовая сталь 07X3ГНМ, имеющая $\sigma_{0,2} \sim 800$ МПа, что близко к $\sigma_{0,2}$ термообработанных углеродистых и низколегированных сталей. Однако **вязкость разрушения существенно выше**. Сталь **в два раза дешевле** стали **03Н18К9М5Т**.

Используется для поковок и горячекатаных прутков, горячедеформированных и холоднодеформированных труб, листового и сортового проката.

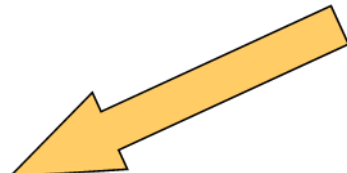
5. Стали с пластичностью, наведенной превращением (ПНП - стали или ТРИП - стали (transformation induced plasticify)).

25Н25М4Г1, 30Х9Н18М4Г2С2

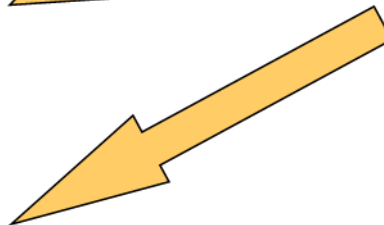
Углерод ~0,25 – 0,30 %



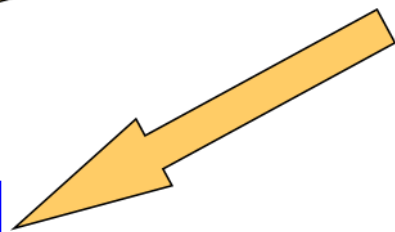
Никель 8 - 32 %



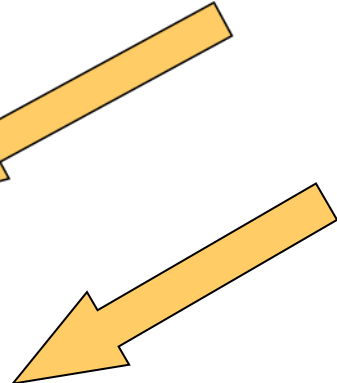
Хром 8 – 14 %



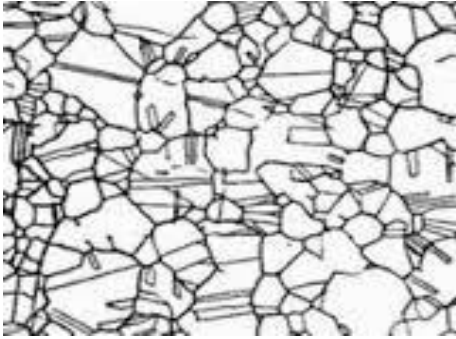
Марганец 0,5 – 2,5 %



Молибден 2- 6 % , кремний до 2 %



Термомеханическая обработка ПНП - сталей



Аустенит

Сталь высоколегированная и **после закалки** от 900 – 1200°C **сохраняет аустенитную структуру**.

Закаленную сталь **подвергают деформации** (прокатка, ковка, штамповка, волочение) **со степенью ~ 80 % при температуре 450 -600°C**, что вызывает частичное превращение аустенита в мартенсит, **наклеп аустенита**.

Реализуются несколько механизмов упрочнения стали.

Аустенитно – мартенситная структура обеспечивает сочетание высоких показателей прочности, пластичности и вязкости: **$\sigma_{\text{в}} = 1500 - 1700 \text{ МПа}$** , **$\sigma_{0,2} = 1400 - 1600 \text{ МПа}$** при относительном удлинении **$\delta = 50 - 60 \%$** и

$$K_{1c} = 120 - 15070 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$$

Для повышения прочности сталь подвергают обработке холодом или старению.

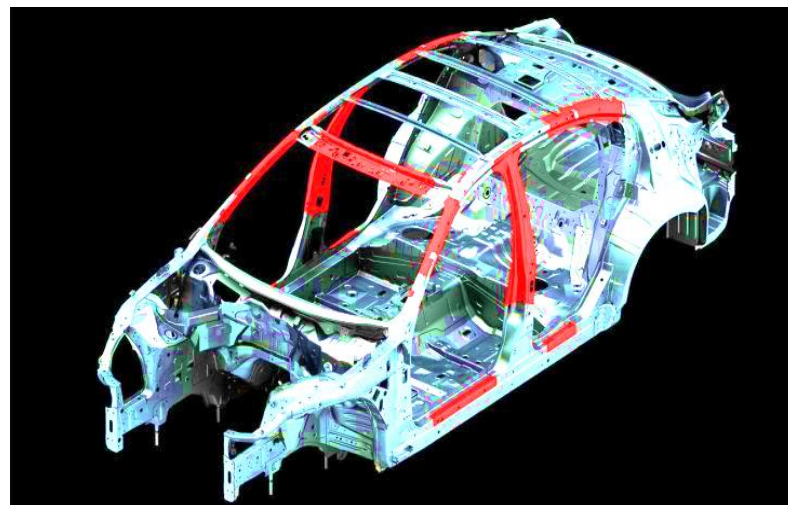
У сталей **высокий предел выносливости**.

Термомеханическую обработку, требующую мощного оборудования, иногда заменяют термоциклированием (5 – 7 циклов) без деформации.

Применение ПНП - сталей

Стали используют для изготовления высоконагруженных деталей, проволоки, тросов, крепежных деталей и др.

Японский автопроизводитель Nissan Motor Co., Ltd. планирует с 2017 года использовать для **25% деталей автомобиля** такие стали с **высокой прочностью и пластичностью** в рамках реализации задачи снижения веса машины. [36]

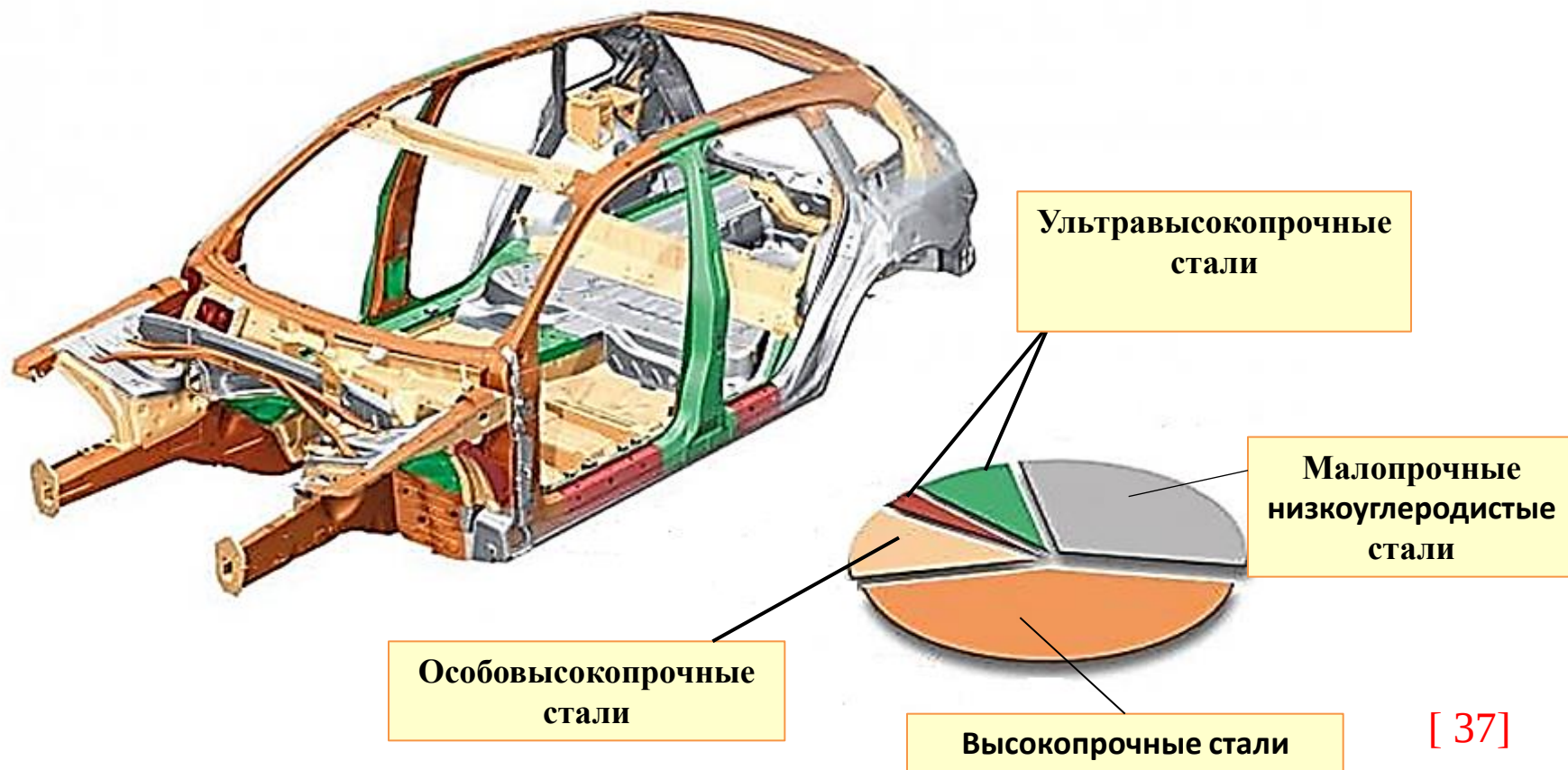


Красным – ПНП-стали

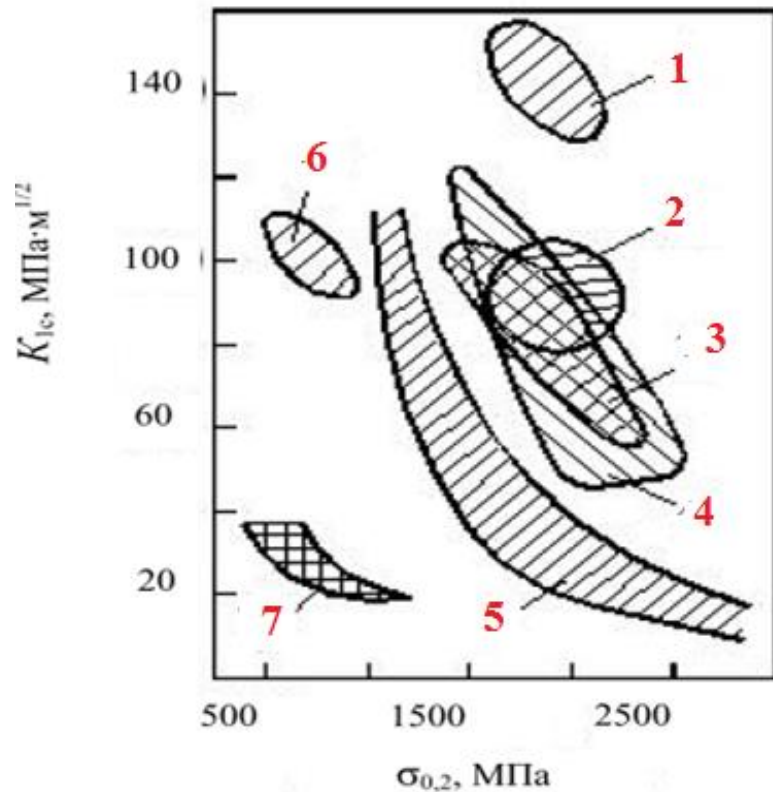
Широкому **использованию сталей в определённой мере препятствует** их высокая легированность, необходимость использования мощного оборудования для деформации при сравнительно низких температурах, трудность сварки.

Материал кузова автомобиля

В Европе и США для кузовов автомобиля в среднем используется ~ 70% сталей высокой прочности. Их применение позволяет увеличить жёсткость при сокращении массы машины.



6.Обобщенная диаграмма конструкционной прочности сталей



[37]

Для традиционных сталей (области 6 и 7) после стандартной термообработки, обеспечивающей заданный уровень $\sigma_{0,2}$ невозможно одновременно достичь высокой прочности и трещиностойкости. Конструкционной прочностью обладают специальные стали (области 1 и 2), особенно, стали с ультрамелким зерном.

Область 1 – стали с ПНП; 2 – с ультрамелким зерном;
3 – после ТМО; 4 – мартенситно-старующие;
5 – традиционные среднеуглеродистые; 6 – низкоуглеродистые;
7 – эвтектоидные.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Влияние ускоренного нагрева при закалке на величину зерна и механические свойства материалов.
2. Термоциклическая обработка и её влияние на свойства материала.

Литература

1. Дьяченко С.С. Материаловедение : учебник / С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, А.А. Мовлян, Э.И. Плешаков.- Харьков: Издательство ХНАДУ, 2010.-464 с. (стр.285 -289).
2. Гладкий И.П. Технология конструкционных материалов и материаловедение : учебное пособие / И.П. Гладкий, В.И. Мощенок, В.П. Тарабанова, Н.А. Лалазарова, Д.Б. Глушкова.- Харьков: ХНАДУ, 2011.- 460 с.(стр. 412,416 – 419).



Лекция 7

Композиционные материалы

Содержание

- 1.Строение и особенности композиционных материалов (КМ).
- 2.Классификация КМ.
3. Дисперсно – упрочненные КМ.
4. Волокнистые композиты.
- 5.Стеклопластики.
- 6.Боропластики.
- 7.Полимерные углепластики.
- 8.Углерод – углеродные композиты.
- 9.КМ – материалы будущего.

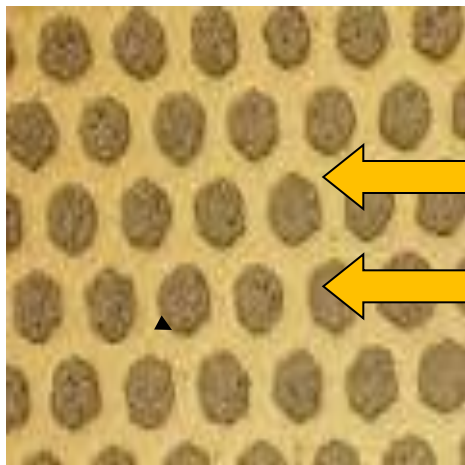
1.Строение и особенности композиционных материалов (КМ).

Создание композиционных материалов – один из инновационных путей повышения конструкционной прочности материалов.

КМ состоят из двух или более компонентов с разным химическим составом, сильно отличающимися свойствами и отделенные четкой границей раздела.

Один компонент – матрица (связующее вещество), которая обеспечивает пластичность, придаёт изделию определённую форму.

Второй компонент – наполнитель, являющийся упрочнителем.



матрица

наполнитель

Матрица может быть металлическая (легкие сплавы на основе Al, Mg, Ti) и неметаллическая (полимерная, углеродная, керамическая). Упрочнители - это высокопрочные и высокожесткие частицы, волокна, нитевидные кристаллы, тонкие проволока и листы. Размеры их от единиц до десятков мкм.

Матрица придает форму КМ, обеспечивает технологию получения и такие важные характеристики как рабочая температура, плотность и удельная прочность.

Композиционные материалы (КМ)

Композиты - класс материалов, удовлетворяющих жёсткие и часто противоречащие друг другу требования, как обеспечение минимальной массы конструкции, максимальной прочности, упругости, жаропрочности, износостойкости, и в целом , повышения надёжности и долговечности при работе в тяжёлых условиях нагружения, в том числе при высоких или низких температурах, в агрессивных средах.

Эксплуатационные характеристика КМ можно регулировать в широком диапазоне, выбирая соответствующие компоненты, изменяя их форму, размеры, количественное соотношение.

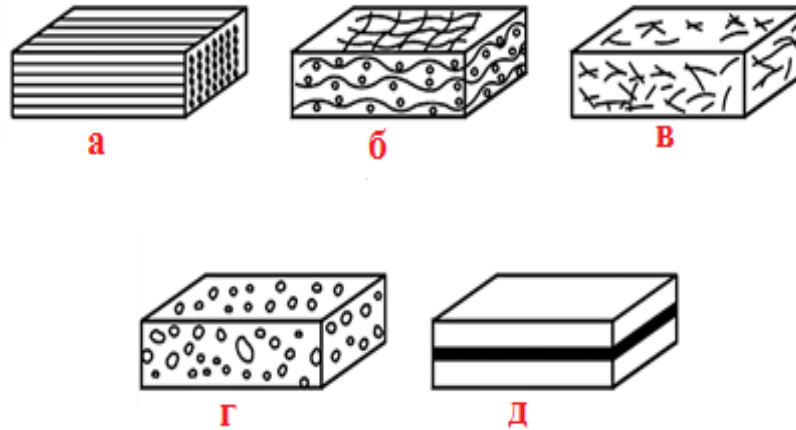


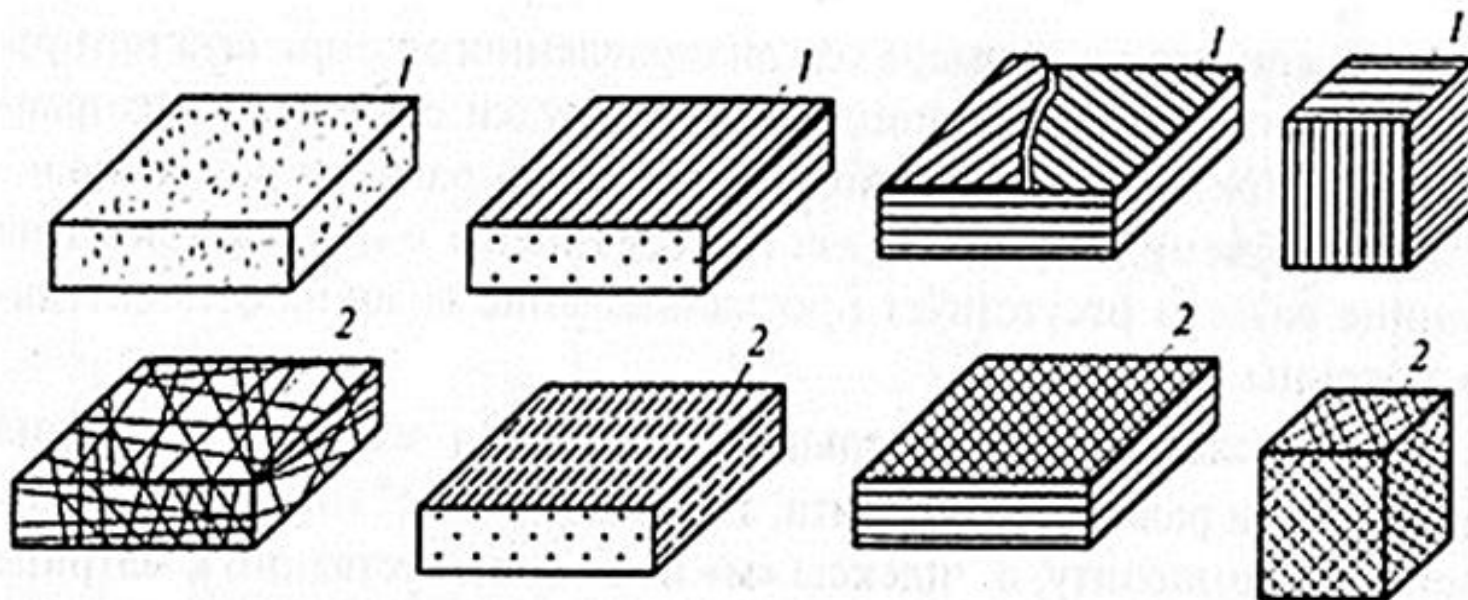
Схема строения различных КМ

Свойства сильно зависят от природы, формы, расположения и распределения в матрице упрочняющего компонента.

Для работы материала в изделии важно учитывать направление действующих нагрузок.

а, б, в – матричные волокнистые (**а** – одноосное армирование непрерывными волокнами; **б** – многоосное армирование непрерывными волокнами; **в** – армирование дискретными волокнами);
г – матричный, упрочнённый частицами;
д – слоистый пластинчатый.

Схемы армирования КМ по конструктивному признаку



а

б

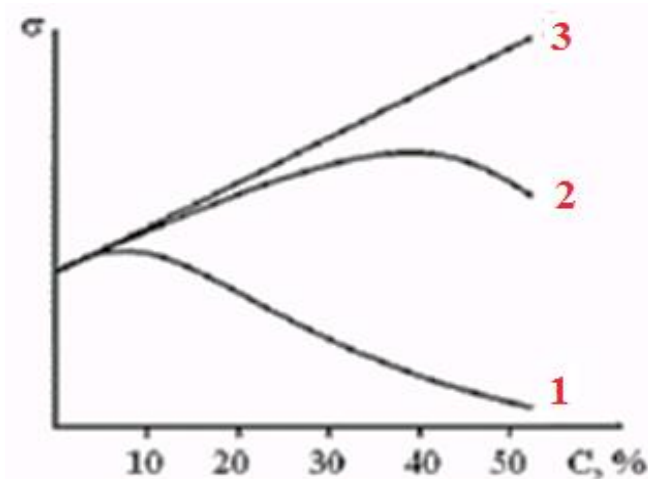
в

г

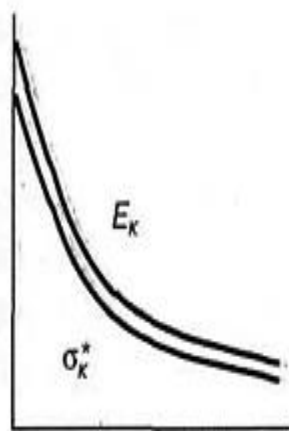
[38]

а — хаотически армированные (1- короткие волокна; 2- непрерывные волокна); **б** - одномерно-армированные (1- непрерывные волокна; 2 - короткие волокна); **в** - двухмерно-армированные (1- непрерывные нити; 2 - ткани); **г**- пространственно-армированные (1 - три семейства нитей; 2 - n семейств нитей)

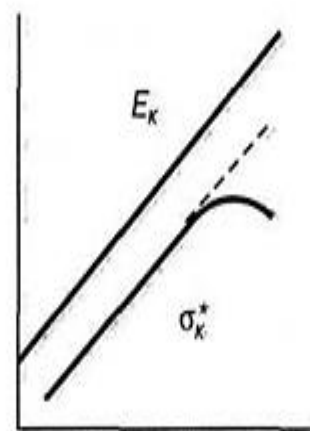
Влияние вида, свойств, количества, расположения и свойств наполнителя на свойства КМ.



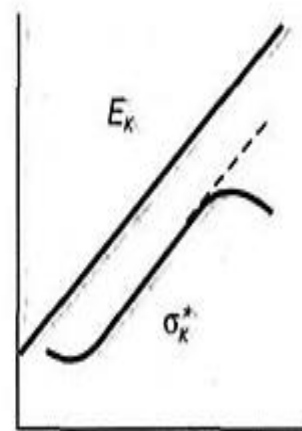
Зависимость прочности от вида наполнителя: **1**-дисперсный, **2**-рубленые волокна, **3**- непрерывные волокна [39]



а



б

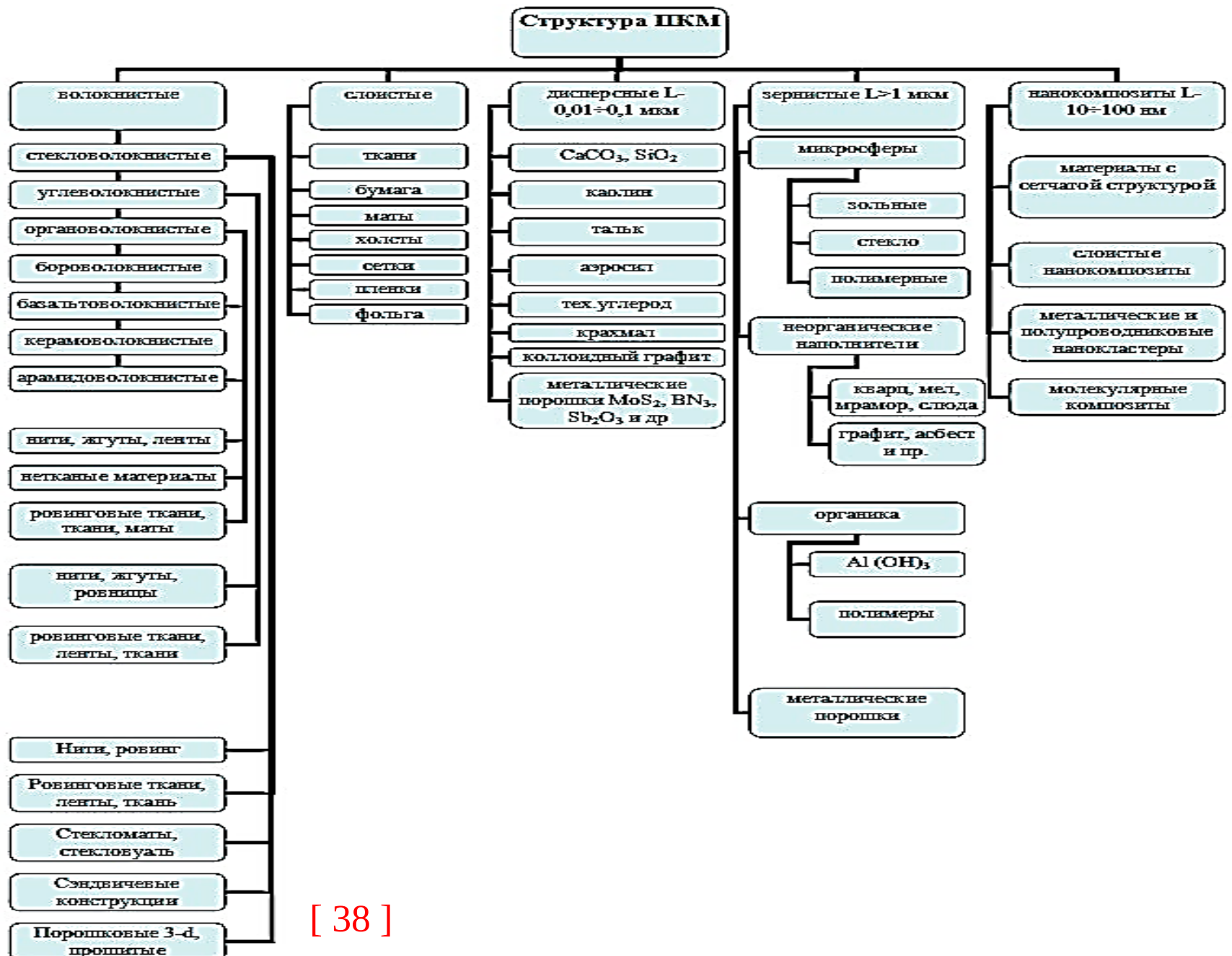


в

Зависимость механических свойств КМ от ориентации армирующих волокон (**а**), объёмной доли (**б**), от вида – для особо хрупких волокон-стеклянных, углеродных (**в**) [40]

В зависимости от физико-химических свойств конкретного волокна прочностные свойства композита могут превышать аналогичные показатели полимерной матрицы в десятки и даже сотни раз.

2.Классификация КМ (обобщённая)



2.Классификация КМ

По назначению КМ бывают конструкционные, жаропрочные, ударопрочные, теплозащитные, фрикционные и антифрикционные, электропроводные, магнитные, оптические, сверхпроводящие и др.

Их применение зависит от совместной работы матрицы и армирующего компонента.

Классификация КМ по виду матрицы



Классификация по виду наполнителя КМ



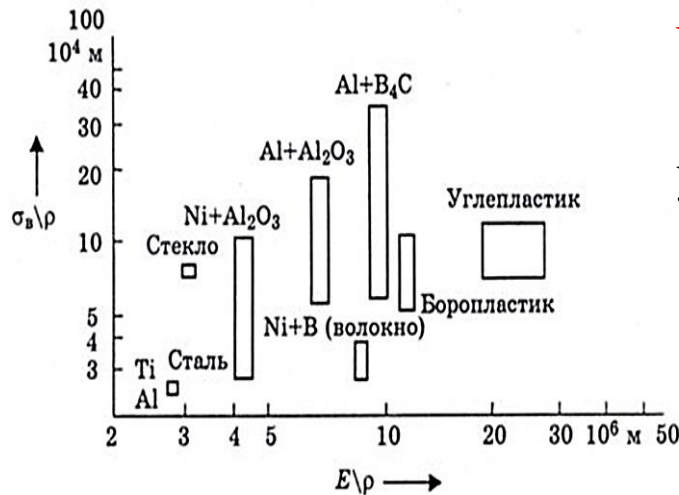
Удельная прочность и удельная жёсткость КМ

Эти высокие свойства являются **характерной особенностью КМ**.

Удельная прочность $\sigma_{уд}$

– отношение предела прочности σ_B при растяжении к плотности материала γ

$$\sigma_{уд} = \frac{\sigma_B}{\gamma}, \text{ М}$$



Удельная жёсткость $E_{уд}$

– отношение модуля упругости E к плотности материала γ

$$E_{уд} = \frac{E}{\gamma}, \text{ М}$$

Тип волокна	γ , г/см ³	σ , МПа	E , ГПа	σ_B/γ , км	E/γ , 10 ³ км	α , 10 ⁻⁶ К ⁻¹	T_{max} , °С
Матрица из Al-сплава	2,63–2,8	250–573	69–73	20	2,5	11–13	150
С	2,1–2,3	850/70	360/35	90	20	1,0–3,6	500
В	2,6	1800/330	250/140	70	10	6,0	540
SiC	2,85–2,9	1600/350	230/140	56	7	6,1	300
B · SiC	2,7–2,8	1400/320	220/180	50	–	–	–
Al ₂ O ₃	3,4	1200	260/140	34	7	–	–

Примечание: В числителе – продольные, в знаменателе – поперечные значения прочностных характеристик.

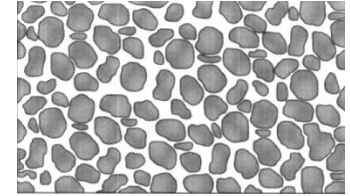
[42]

Высокая удельная прочность материала означает, что заданная прочность **может быть обеспечена при меньшей массе изделия**.

Это позволяет **сэкономить материал** и получить более лёгкую конструкцию при той же прочности.

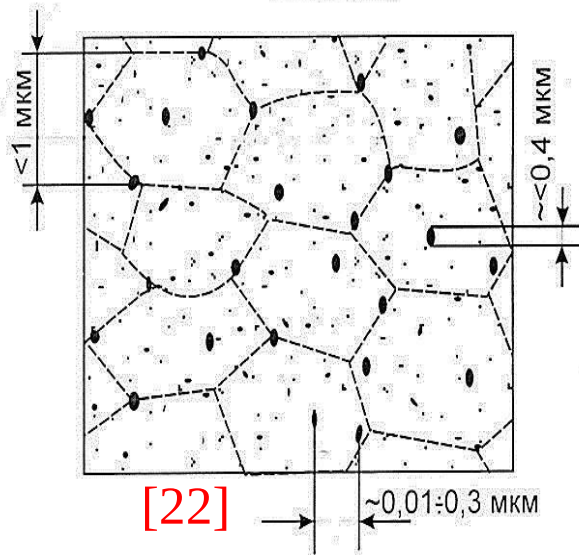
3. Дисперсно-упрочненные КМ

Металлическую матрицу **армируют** грубыми (размером $> 10\text{ мкм}$ в количестве $\sim 25\%$) или **чаще мелкими** (от $0,01$ до $0,1\text{ мкм}$) **частицами** в количестве до 15% .



Армирующие частицы – оксиды, нитриды, карбиды, бориды, интерметаллидные соединения вводят в матрицу методом порошковой металлургии.

Они **тормозят** движение дислокаций, обеспечивая упрочнение.



Эффект упрочнения зависит от размера частиц, их доли, равномерного распределения и расстояния между ними

Для крупных частиц коэффициент упрочнения ($\sigma_{\text{комп}} / \sigma_{\text{матр}}$) достигает **25**.
Для дисперсных ($0,05 - 0,5\text{ мкм}$) при равномерном их распределении – **15**.

Широко **распространенным в промышленности** дисперсно – упрочнённым КМ **является САП – спеченная алюминиевая пудра**. В алюминиевой матрице равномерно и густо располагаются дисперсные ($0,01 - 0,1\text{ мкм}$) частицы Al_2O_3 . С увеличением содержания оксида от $6-8\%$ до $18-20\%$ в полтора раза увеличивается прочность, а относительное удлинение уменьшается более чем в 3 раза. Сплавы жаростойки и коррозионностойки. Сохраняют длительное время прочность до температур $\sim 0,8\text{ Тпл}$ (силовые элементы самолетов, лопатки турбин.)

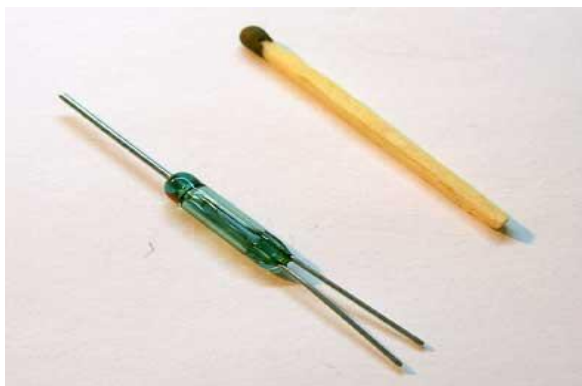
Применение дисперсно - упрочнённых КМ



Никель армированный
оксидами тория,
выдерживает температуру
выше 1000°C —сопловые
камеры, лопатки газовых
турбин.



Матрица — кобальт,
содержащая частицы
 WC , TaC , TiC . Сплавы
очень твердые,
износостойкие и
применяются для
режущего и бурового
инструмента.



Серебряная основа,
армированная
оксидами меди и
кадмия,
используется для
реле и контактов.

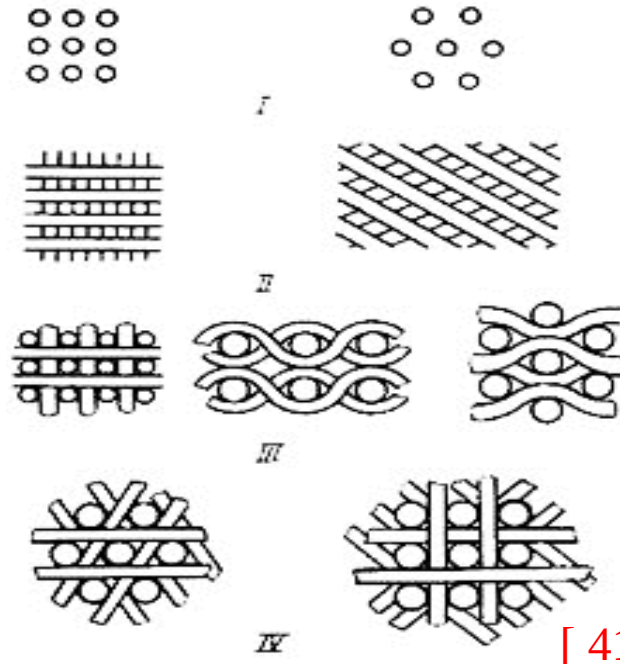
4. Волокнистые композиты

Их можно изготовить практически **из всех комбинаций различных типов материалов.**

Прочность волокнистых КМ определяется **свойствами армирующих компонентов.**

Матрица, воспринимая внешние нагрузки, передает их волокнам и распределяет между ними.

Она обеспечивает пластичность и вязкость изделия, тормозит развитие трещины и защищает упрочнители от повреждений.



В качестве упрочнителей могут быть проволоки, волокна, нитевидные кристаллы, жгуты с разным механизмом армирующего действия.

Чем больше отношение длины к диаметру волокна, тем выше степень упрочнения.

Очень важна сила связи между компонентами и матрицей.

Упрочняющий эффект зависит также от материала армирующего волокна, его укладки (прямоугольная, гексагональная, с искривленными волокнами и др.) и схемы армирования (одно-, двух-, трех- и четырехнаправленная).

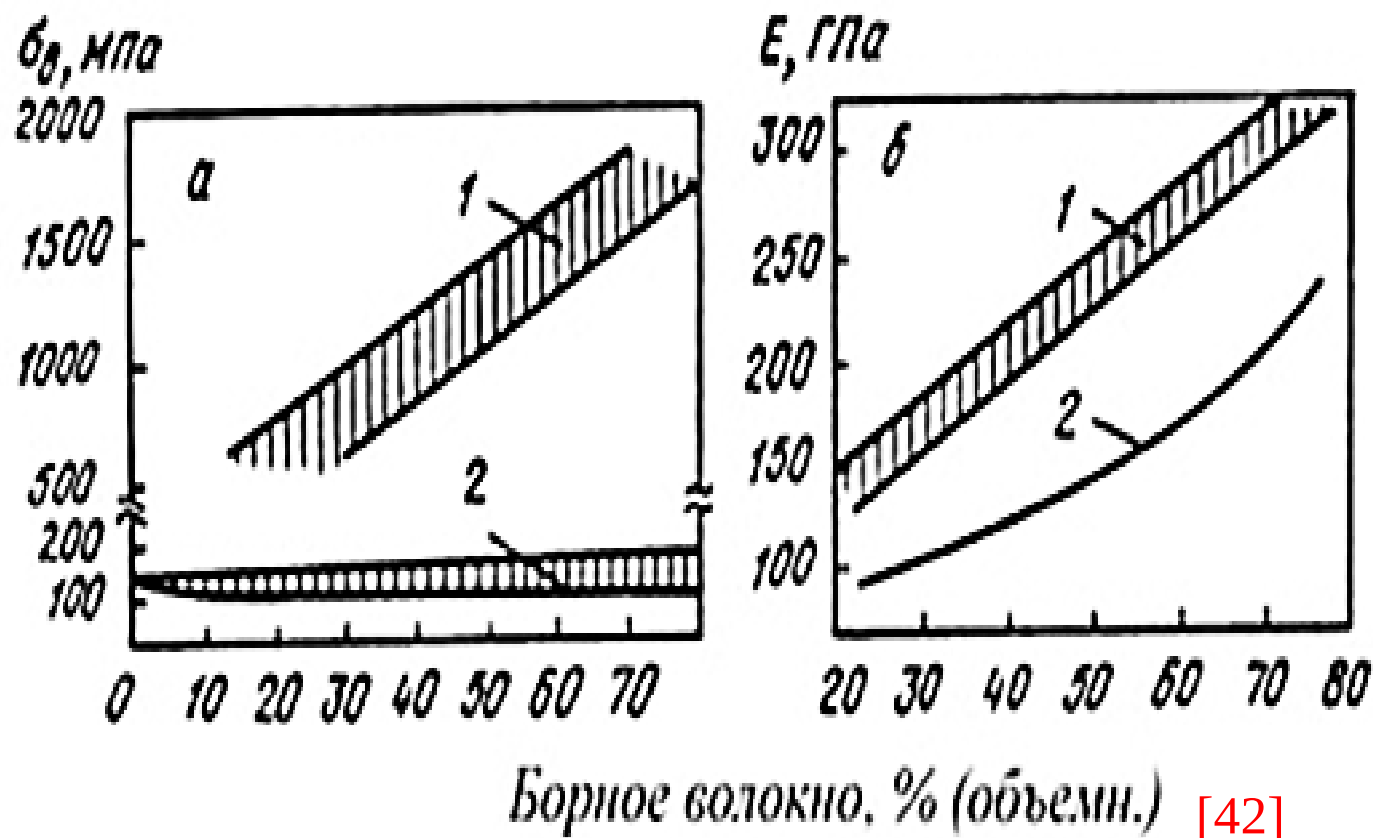
Наилучший результат достигается при объёмном армировании..

Очень важно также количественное соотношение армирующих компонентов и прочность связи между ними

Характеристики волокнистого наполнителя КМ

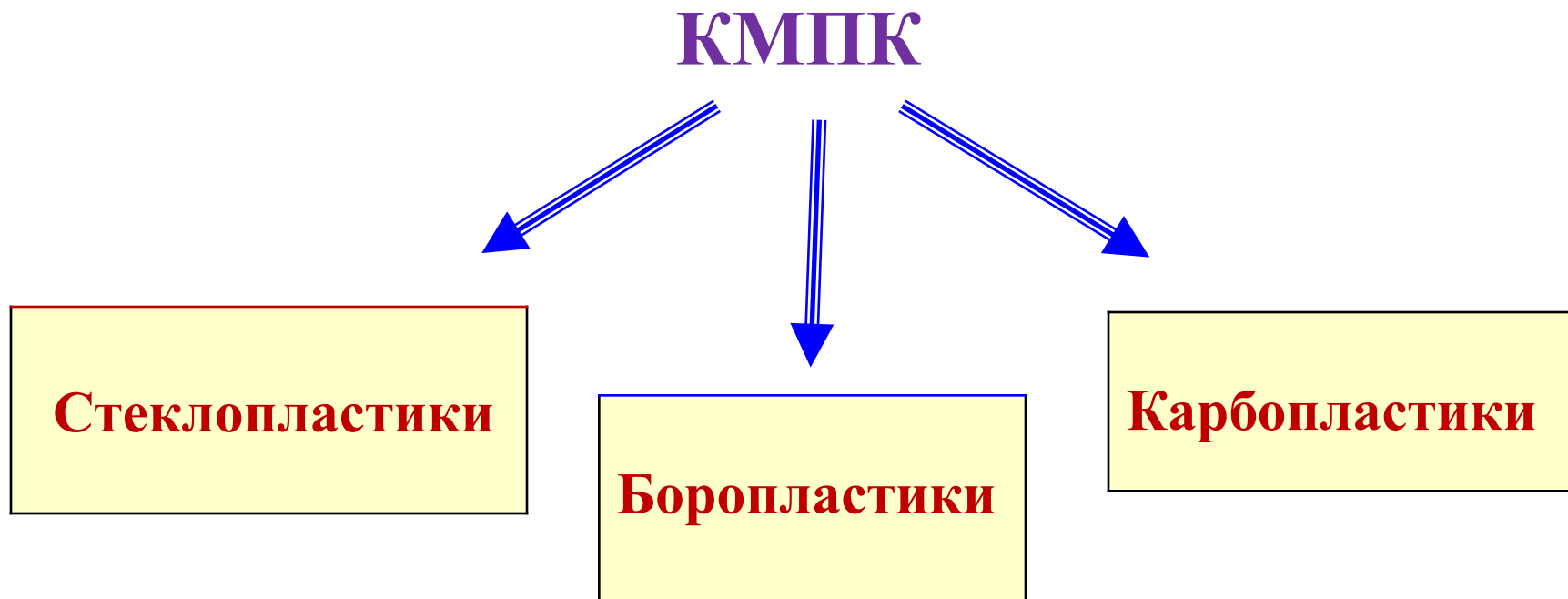
Материал наполнителя	Диаметр волокна, мкм	σ_v , ГПа	Е, ГПа	ρ , г/см ³
Сталь	150	3,5	200	7,9
Стекло	10	4,0	85	2,5
Кевлар	15	4,5	150	1,4
Углерод: высокопрочный высокомодульный	7	5,5	300	1,8
	7	3,0	650	2,0
Карборунд	120	3,0	430	3,2
Бор	100	3,5	400	2,6
Нитевидные кристаллы: корунда карборунда	—	30	1000	3,8
	—	40	800	

Характеристики КМ зависят не только от типа волокна и его конструкционной особенности, но и от оси армирования



Зависимость временного сопротивления (а) и модуля упругости (б) бороалюминиевого композитного материала **вдоль (1) и поперек (2) оси армирования** от объемного содержания борного волокна.

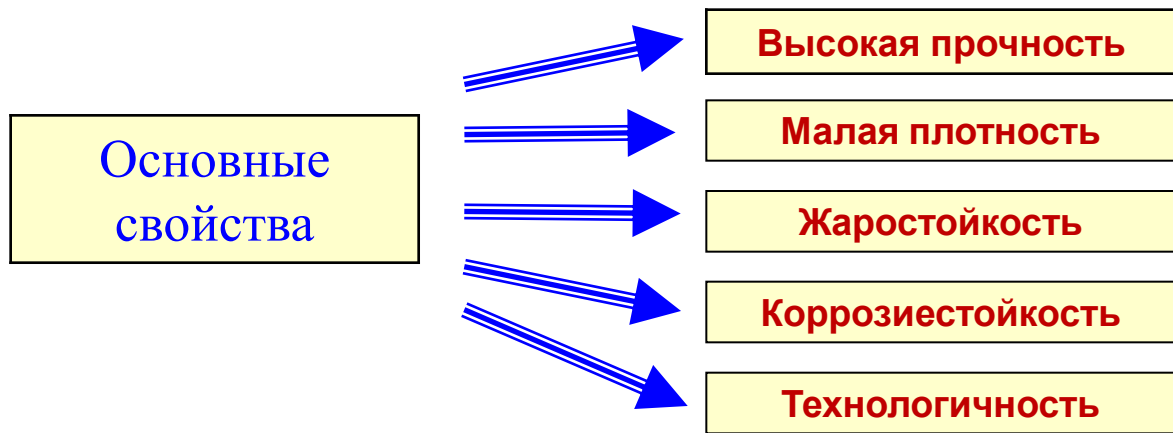
Волокнистые КМ с полимерной матрицей – КМПК нашли наиболее широкое применение.



У конструкционных материалов матрица полиэфирная, эпоксидная или полиимидная, армированная стеклянными, углеродными или борными волокнами. При использовании непрерывных волокон их содержание составляет 60 – 80 %, а для дискретных волокон и нитевидных кристаллов до 30 %.

5. Стеклопластики

Полимерная матрица армирована стеклянными волокнами разного вида (нити, жгуты, ткани) и сечения толщиной (диаметром) от 3 до 50 мкм.



Матрица - полиэфирные, фенолформальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические смолы, полиимиды.

Применяют непрерывное и короткое стекловолокно.

Прочность резко возрастает с уменьшением диаметра и увеличением длины волокна.

Механические свойства стеклопластика **определяются** преимущественно характеристиками наполнителя и прочностью связи его со связующим.

Стеклопластики с **ориентированно расположенными** (параллельно или под заданным углом) **непрерывными волокнами** обладают **наибольшей прочностью и жёсткостью**.

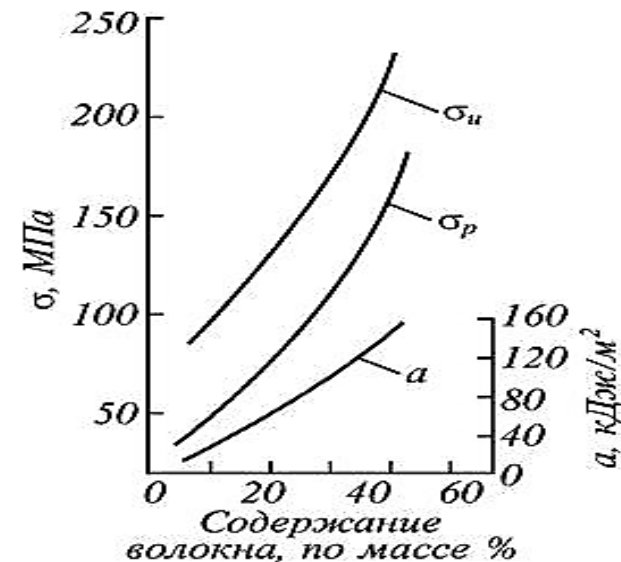
Неориентированные стеклопластики в качестве наполнителя имеют короткие, хаотично расположенные волокна и свойства их хуже.

Изменяя процентное содержание, состав, размеры, ориентацию волокон можно в широких пределах регулировать механические свойства стеклопластиков.

Свойства стеклопластиков

Решающее влияние на свойства стеклопластиков оказывает содержание волокна.

Изменяя процентное содержание, состав, размеры, ориентацию волокон можно в широких пределах регулировать механические свойства стеклопластиков.



Прочностные свойства и особенно эксплуатационная температура стеклопластиков зависят также от связующего (матрицы).

Наименование показателя	Единица измерения	Значение показателя для стеклопластиков на основе различных смол		
		Полиэфирная	Эпоксидная	Фенолформальдегидная
1. Плотность	г/см ³	1,4-1,75	1,6-1,9	1,5-1,8
2. Прочность при растяжении	МПа	140-450	400-600	300-500
3. Прочность при статическом изгибе	МПа	150-500	400-800	200-600
4. Прочность при сжатии	МПа	150-300	200-400	100-300
5. Модуль упругости при растяжении	ГПа	11-25	22-32	18-25

[43]

Стеклопластики на основе полиэфирных смол можно эксплуатировать до 60 – 150 °С, эпоксидных - до 80 – 200 °С, феноло-формальдегидных - до 150 – 250 °С, полиимидов - до 200 – 400 °С.

Стеклопластик — эффективный заменитель стали.

Стекловолокна обладают наиболее высокими пределом прочности, модулем упругости и удельной прочностью по сравнению с другими волокнами.

При изменении диаметра стекловолокна от 6 до 2 мкм **предел прочности может повышаться от 2000 до 6000 МПа.**

Стеклопластика принято **сравнивать со сталью.**

Абсолютные значения предела прочности у него ниже, чем у стали, но при этом большая удельная прочность. **Удельный вес стеклопластика в 3,5 раза меньше** и вес двух равнопрочных конструкций, из стеклопластика и из стали, будет отличаться в 2 раза.



Кузов автомобиля из
стеклопластика
<http://kzmo.ru>

[44]

Стеклопластики используют при производстве кузовов автомобилей, корпусов лодок, катеров, судов и ракетных двигателей. Для коррозионностойкого оборудования, цистерн, трубопроводов, а также как электроизоляционный и теплозащитный материал.

Недостатки стеклопластика — хрупкость, подверженность абразивному износу (требуется нанесение на поверхность изделия защитного покрытия); образование канцерогенной пыли при механической обработке (необходимы соответствующие защитные мероприятия).

Применение стеклопластиков

Использование различного армирования позволяет получить широкий ассортимент стеклопластиков с большим разнообразием и сочетанием необходимых свойств.



Применение стеклопластиков

Лист стеклопластика размером 1,8 х 3 м весит всего 2,4 кг и снижает массу изделия из стали на 500 – 1000 кг, что приведет к большой экономии металла в автомобильной и авиационной промышленности.



Из стеклопластика изготовлен корпус ракеты СС20. [45]

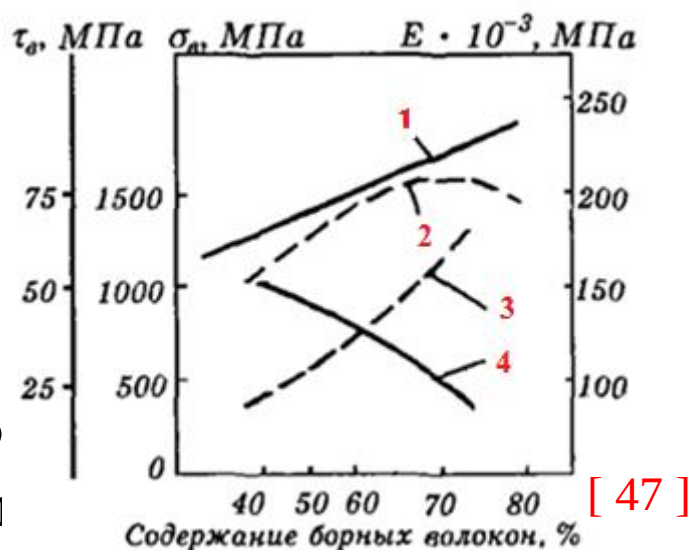


Плитками стеклопластика с кварцевым волокном облицован корпус орбитального корабля «Буран». Наружная поверхность нагревается до 1800 °С, а на внутренней стороне всего 200° [46]

6. Боропластики

Полимерная матрица армирована волокнами бора диаметром 90 – 150 мкм.

Волокна получают осаждением бора из газовой фазы на нагретую до 1100 – 1200°C вольфрамовую проволоку диаметром 12 мкм.



1 — модуль упругости; 2 — предел прочности при изгибе; 3 — модуль сдвига; 4 — предел прочности при сдвиге.

Свойства материала сильно зависят от объёмной доли и размера волокон.

Прочность и жесткость повышаются с уменьшением размера волокон и увеличением их содержания в матрице.

Бороволокниты имеют высокую прочность при сжатии и сдвиге, низкую ползучесть, высокую твердость и сопротивление усталости. Теплопроводны и электропроводны, коррозионностойки.

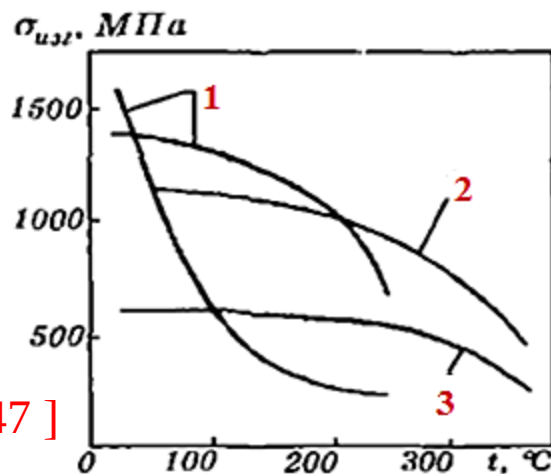
В качестве матриц для боропластиков используют модифицированные **эпоксидные и полиимидные связующие**.

Свойства боропластиков с различной матрицей [47]

Марка	Матрица	Предел прочности, МПа		Модуль упругости, $\times 10^{-3}$ МПа	Предел выносливости на базе 10^7 циклов, МПа	Предел длительной прочности за 1000 ч, МПа	Рабочая температура, °C
		при растяжении	при сжатии				
КМБ-1	Эпоксизоцианат	1200	—	—	—	—	—
КМБ-1К	Эпоксизоцианат	900	920	214	350	1220	200
КМБ-2К	Амидоимид	1000	1250	260	400	1200	300
КМБ-3Л	Эпоксидная модифицированная	1500	1500	260	420	1300	100

Матрица боропластиков определяет их эксплуатационную температуру и стойкость к разрушению при её повышении.

[47]



Зависимость разрушающего изгибающего напряжения от температуры:
1 – эпоксидная матрица,
2 – полиимидная,
3 – кремнийорганическая.

Применение боропластиков



Лопасты винтов вертолетов



Кузова машин, шасси



Гребные винты



Детали обшивки корпуса

Бороволокниты широко используются в авиации и космической технике.

Высокая демпфирующая способность обеспечивает виброустойчивость.

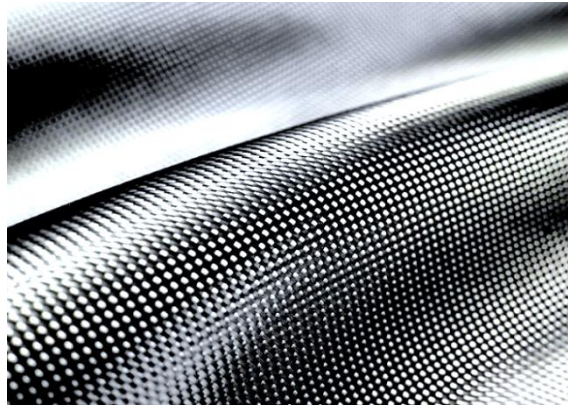
7. Полимерные углепластики

Это **композиции**, состоящие из полимерной матрицы и упрочнителей в виде **углеродных волокон** (карбоволокон).

Для армирования используют:

- **высокопрочные волокна** с $\sigma_b = 2,5 - 3,1$ ГПа и $E = 200-250$ МПа.
- **высокоупругие волокна** с $E = 300-700$ МПа и $\sigma_b = 2,0 - 2,5$ ГПа

Волокна имеют малую плотность $1,7 - 1,9$ т/м³.
В отличие от стеклянных плохо смачиваются связующим, поэтому их подвергают травлению.
Достаточно технологичны.



[48]

Обладают очень высокой усталостной прочностью, сохраняя её и при низкой температуре.
Тепло- водо-и химически стойки. Износостойки.
Способны гасить вибрации.
Имеют высокие электрические свойства.

Главное **достоинство углепластика** — **очень лёгкий вес и высокая прочность.**

В 5 раз легче стали и в 1,8 раза легче алюминия.

По прочности он превосходит сталь в 12,5 раз.

Основной недостаток — высокая стоимость. Поэтому иногда часть углеродных волокон заменяют стеклянными.

Углепластик в автомобилестроении

Используется для производства как отдельных деталей и узлов, так и для автомобильных корпусов в целом.

Высокая прочность и малый вес позволяют создавать безопасные и экономичные автомобили. Уменьшение веса автомобиля позволяет снизить выброс CO_2 в атмосферу, благодаря снижению расхода топлива в несколько раз.

При существенном снижении массы - повышение надежности
Получил широкую известность благодаря гонкам «Формула 1».



Кузов из углепластика автомобиля Lamborghini Sesto Elemento позволил уменьшить его массу до 990 кг [49]



Рессора задней подвески автомобиля Volvo весит 11,1 кг [50]



Диск [51]



Капот автомобиля HONDA [52]



Карданный вал автомобиля Mercedes AMG 63 [53]

8. Углерод – углеродные композиты (УУКМ)

Это новое поколение перспективных материалов с углеродной матрицей армированной углеродными волокнами или тканями.

Матрица – синтетические органические смолы с высоким коксовым остатком или каменноугольные и нефтяные пеки (вязкие остатки перегонки дёгтей, нефти) пироуглерод



УГКМ : матрица – пироуглерод, упрочнитель –углеволокно [54]

Наполнители - углеграфитовые волокна, жгуты, нити, тканые материалы.

Одинаковая природа и близкие физико-химические свойства обеспечивают прочную связь волокон с матрицей и уникальные свойства этим КМ

Механические свойства этих КМ в большой степени зависят от схемы армирования - предел прочности изменяется от 100 до 1000 МПа.

Наиболее предпочтительно многоосное армирование, при котором армирующие волокна расположены в трех и более направлениях.

Достоинством углерод-углеродных КМ является малая плотность - 1,3 – 2,1 г/м.

Свойства углерод – углеродных КМ

Матрица	Наполнитель	Плотность, г/см ³	Бизг, ГПа	Модуль упругости, ГПа
Углеродная	Углеродное волокно	1,5 – 1,8	0,34 – 1,0	120-220

УУМК имеют уникальные свойства : очень малую плотность, высокие модуль упругости, прочность на растяжение, сопротивление ползучести, низкий коэффициент трения, коррозионную стойкость, широкий диапазон электрических свойств, низкий коэффициент теплового расширения, хорошую теплопроводность.

При большой прочности обладают высокой вязкостью разрушения.

Способны сохранять прочность и упругость до 2000° С.

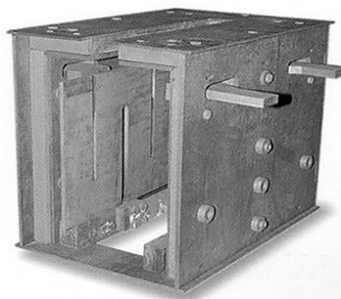
Значительно легче стали, но их прочность в 15 раз выше, а упругость в 3 раза.

Применение углерод – углеродных КМ

УУМК находят все более широкое применение в технике.

УУМК используются как жаропрочный, теплостойкий материал в ракетных и газотурбинных двигателях.

В инертной среде и в вакууме работают при 3000°C .



Прессформа [56]

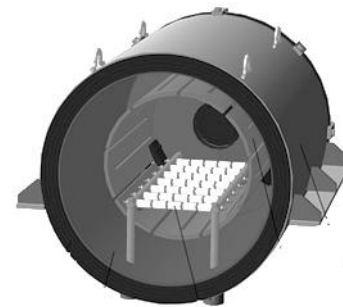


Неохлаждаемая сопловая насадка ракетного двигателя (КБ « Южное», Украина) [55]



Нагреватели [57]

Обладают большей прочностью при высоких температурах, чем жаропрочная сталь. Не деформируются даже в условиях термического удара. По сравнению со сталью имеют более долгий срок службы.



Корпус нагревательного модуля печи [58]

Применение УУКМ

В зависимости от схемы армирования могут использоваться как фрикционный так и антифрикционный материал в автомобилестроении.



Вкладыши и втулки [59]



Фрикционные диски [60]

При замене чугунных тормозных дисков вдвое уменьшается масса и увеличивается ресурс в 2,5 раза.

Характеристики УУКМ делают их идеальными для производства систем крепежных приспособлений, используемых при высоких температурах.



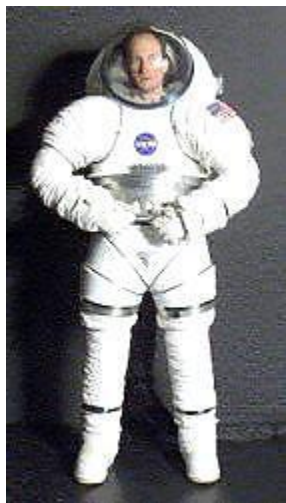
[61]

Недостаток — склонность к высокотемпературному окислению.

9. КМ – материалы будущего

Они определяют технический прогресс.

Эти материалы **превосходят металлы и сплавы** по усталостной прочности, термостойкости, ударной вязкости, шумопоглощению и другим свойствам



Оболочка скафандра космонавта состоит из 11 слоев композиционных материалов разного функционального назначения [62].

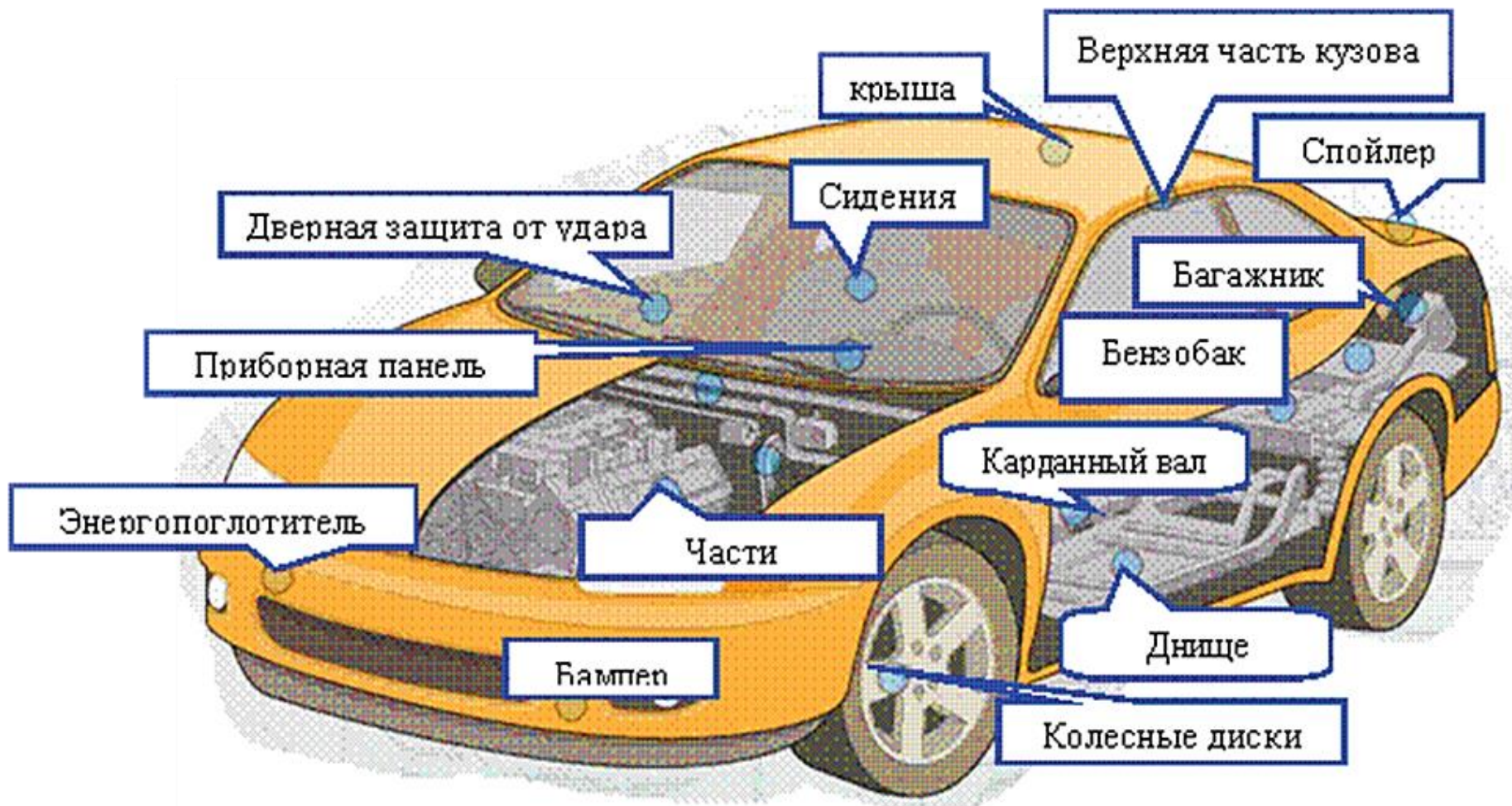


У наибольшего транспортного самолёта «Мрія» 7 тонн КМ заменили 16 тонн металлических сплавов [63].



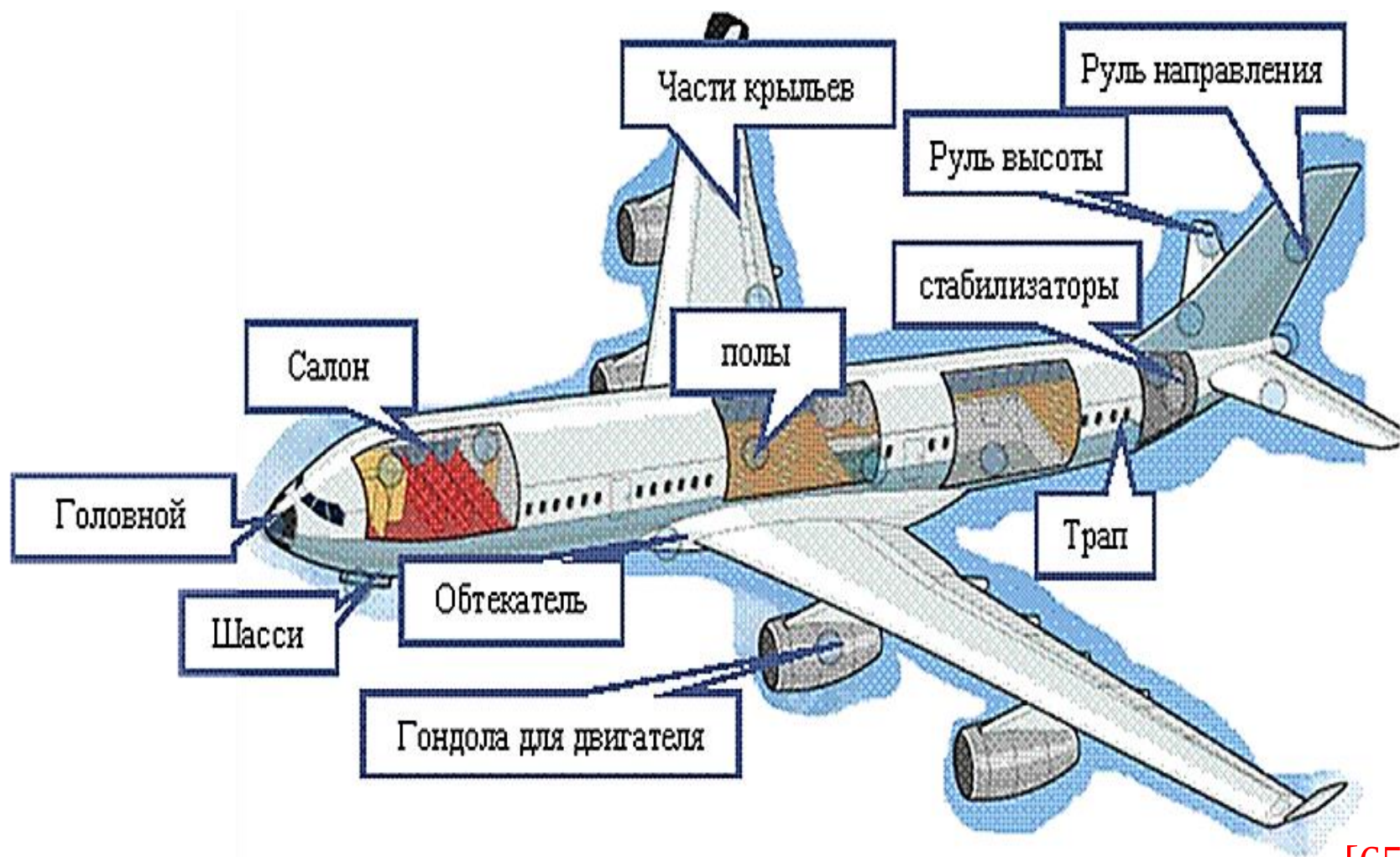
В конструкции «БОИНГА 787» КМ составляют 60% от веса (без двигателя) [64].

Использование КМ в автомобилестроении



Детали автомобиля изготовленные из композиционных материалов. [65]

Использование КМ в авиастроении



[65]

Детали самолётов из композиционных материалов

Применение композиционных материалов в аэробусе А380 [66]



■ Армированные углеродным
волокном пластики

■ "Гибрид" (углерод и стекло)

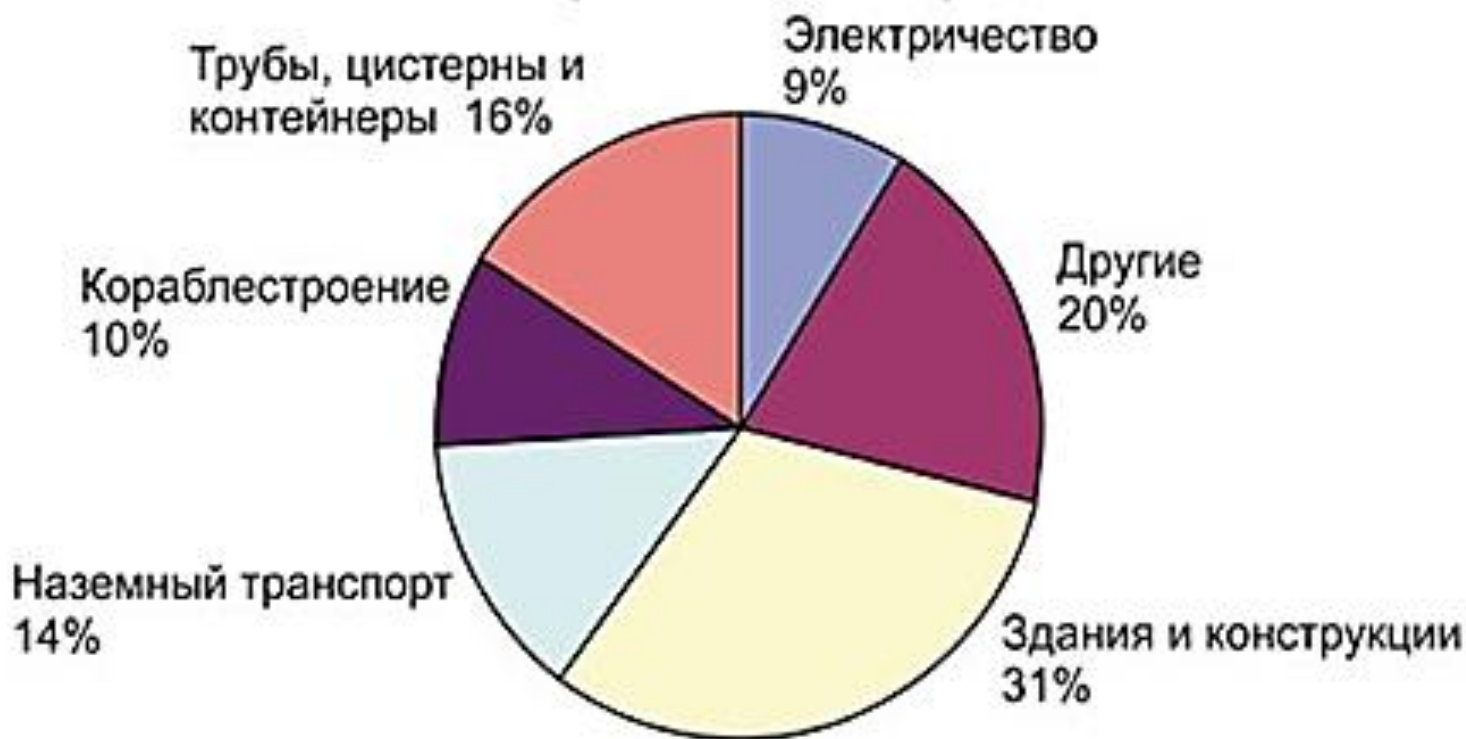
■ Армированные
стекловолокном пластики

■ Упрочненные углеродным и
минеральным волокном пластики

Композиционные материалы — самый интенсивно развивающийся сегмент на рынке материалов. Их уникальные свойства позволяют все больше и больше вытеснять классические материалы — металлы, дерево, камень.

Производство в мире ежегодно возрастает на 15%.

Диаграмма распределения производимых композиционных материалов на конечном потребительском рынке.



Вопросы для самостоятельной работы

1. Органопластики и их применение.
2. Слоистые композиты
3. Волокнистые композиты с базальтовым упрочнителем, особенности их свойств и применение.
4. Волокнистые КМ с керамической и металлической матрицей.
5. Слоистые КМ.
6. Естественные КМ

Литература

1. Дьяченко С.С. Материаловедение : учебник / С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, А.А.Мовлян, Э.И. Плешаков.- Харьков: Издательство ХНАДУ, 2010.-464 с. (стр.376-411).
- 2.Гладкий И.П.Технология конструкционных материалов и материаловедение : учебное пособие / И.П. Гладкий, В.И. Мощенок, В.П. Тарабанова, Н.А. Лалазарова, Д.Б. Глушкова.- Харьков: ХНАДУ,2011.- 460 с.(стр. 423-426



Лекция 8

Наноматериалы и нанотехнологии

Содержание

1. Основные понятия и определения.
2. Особенности атомно – кристаллического строения наноматериалов.
3. Физические и химические свойства наноматериалов.
4. Механические свойства нанокристаллических материалов.

1. Основные понятия и определения

НАНО – десятичная приставка (от греч «nanos» – карлик), означающая одну миллиардную часть какой-либо величины

$$1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10^{-6} \text{ мм} = 10^{-3} \text{ мкм}$$

НАНОМАТЕРИАЛЫ (нанокристаллические) – материалы с размером структурных элементов (зерен, фаз, покрытий) меньших 100 нм хотя бы в одном измерении, и обладающие качественно новыми функциональными и эксплуатационными характеристиками.

НАНОЧАСТИЦЫ – образования из $< 10^6$ атомов одного или нескольких элементов размером менее 100 нм со свойствами, сильно отличающимися от свойств объемного вещества.

НАНОКЛАСТЕРЫ – образование из небольшого числа атомов (до 1000) размером 0,1- 1 нм.

НАНОКРИСТАЛЛ – аналог наночастицы, имеющей кристаллическое строение.

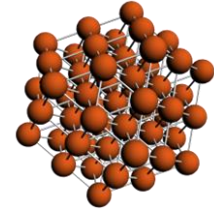
НАНОТЕХНОЛОГИЯ – совокупность методов и приёмов, позволяющих создавать и модифицировать объекты с компонентами размером $< 100 \text{ нм}$, имеющие принципиально новые свойства и позволяющие осуществить их интеграцию в функционирующие системы большого масштаба.

Классификация наноматериалов

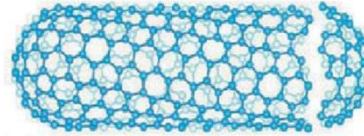


Наночастицы

Нанокластеры



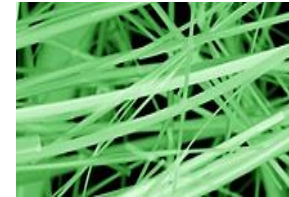
Нанотрубки



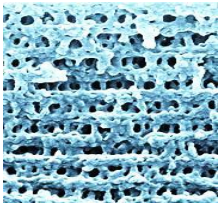
Фуллерены



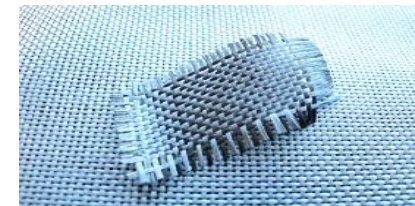
Нановолокна



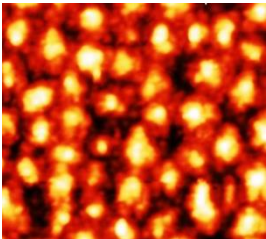
Нанопористые структуры



Наноплётки



Наноструктурированная поверхность



Нанокристаллические материалы

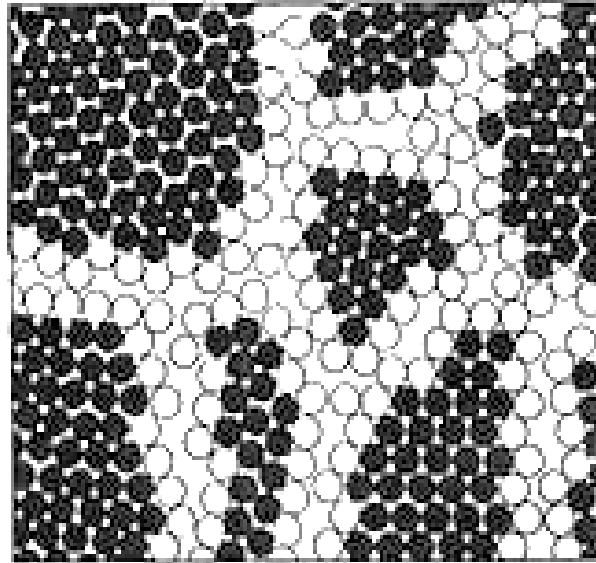


2. Особенности атомно - кристаллического строения наноматериалов.

Очень большой объём границ относительно объёма самого зерна.

У зерна 1000 нм - поверхность границ составляет 1% , 100 нм – 6%, а 30 нм – 50%.

Ширина границы от 0,4 до 1 нм.



Компьютерная модель структуры :
тёмные - атомы кристаллитов, белые
– межкристаллитных границ [68]

Плотность атомов на границе намного меньше, чем в кристаллитах.

Для зерен размером до 1 нм - меньше на 40 %.

Силы взаимодействия атомов в объёме и на поверхности различны.

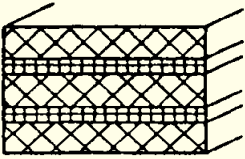
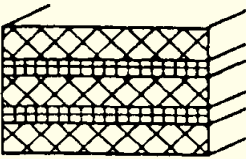
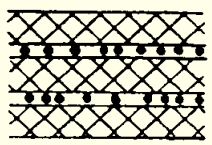
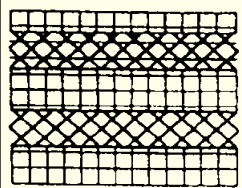
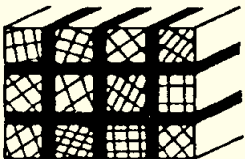
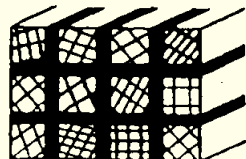
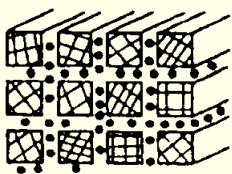
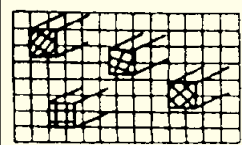
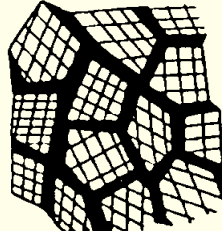
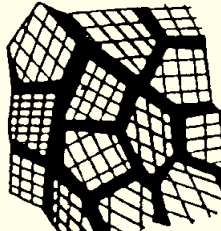
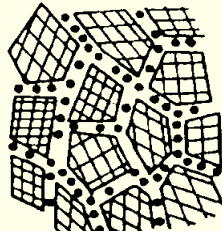
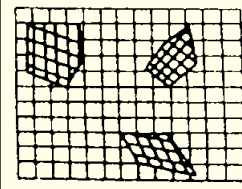
Нанокристаллический материал состоит из двух компонентов: упорядоченные зерна размером 5-20 нм и межзеренные границы шириной до 1 нм.

Основные типы структур наноматериалов

Свойства наноматериалов в значительной степени определяются характером распределения, формой и химическим составом кристаллитов (наноразмерных элементов).

Структуры классифицируют по этим признакам.

По форме кристаллитов наноматериалы разделяют на слоистые (пластинчатые), волокнистые (столбчатые) и равноосные.

Характер распределения	кристаллитное			матричное
Химический состав	состав кристаллитов и границ одинаковый	состав кристаллитов различен при одинаковом составе границ	состав и кристаллитов и границ различный	кристаллиты распределены в матрице другого состава
Форма кристаллитов:				
Слоистая				
Волокнистая				
Равноосная				

Группы наноматериалов

Исходя из особенностей химического состава кристаллитов и их границ, выделяют четыре группы наноматериалов.

К первой группе относят материалы, у которых **химический состав кристаллитов и границ раздела одинаков**. Их называют однофазными.

Примерами таких материалов являются чистые металлы с нанокристаллической равноосной структурой и слоистые поликристаллические полимеры.

Вторую группу составляют материалы, у которых **состав кристаллитов различен**, но **границы являются идентичными по химсоставу**.

Третья группа включает наноматериалы, у которых как кристаллиты, так и границы имеют **различный химический состав**.

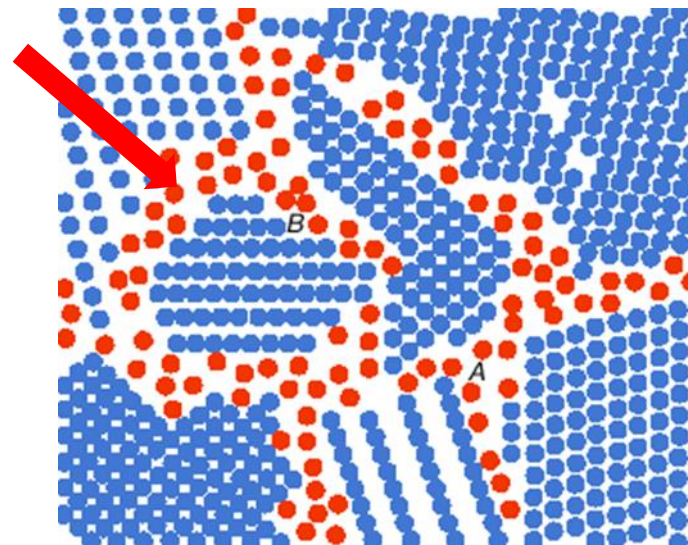
Четвертую группу представляют наноматериалы, у которых **наноразмерные объекты** (частицы, волокна, слои) **распределены в матрице, имеющей другой химический состав**. К этой группе относятся в частности дисперсно-упрочненные материалы.

Строение границ зерен наноматериалов

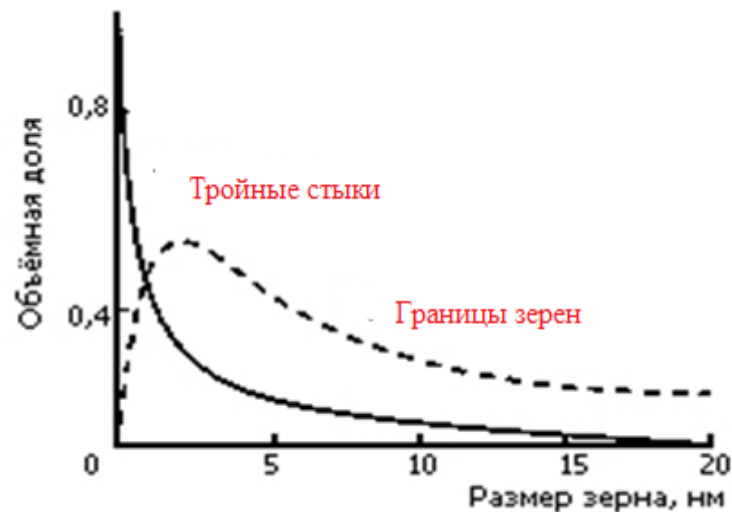
Границы зерен компактных наноматериалов толстые рыхлые и содержат огромное количество дефектов : отдельные вакансии на границах раздела, скопление вакансий в тройном стыке кристаллов, поры на месте отсутствия кристаллитов.

Дефекты являются структурными элементами границ раздела и оказывают влияние на физико-химические и механические свойства.

Другой причиной специфики свойств наноматериалов является увеличение объемной доли границ зерен и тройных стыков с уменьшением размера зерен или кристаллитов.



[70]

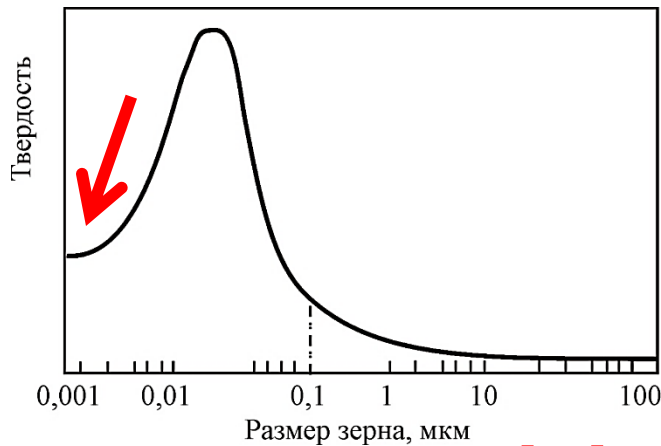
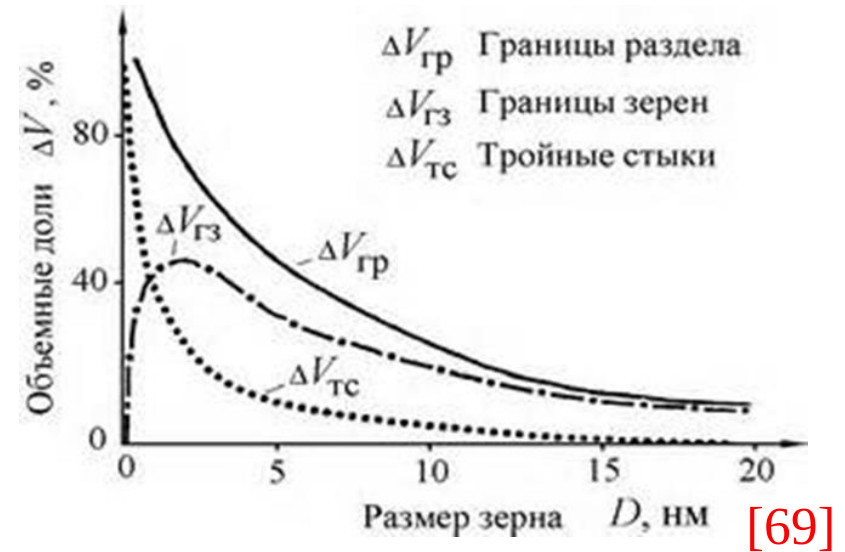


[69]

Поверхности раздела в наноматериалах

С уменьшением размера зерна от 1 мкм до 2 нм **объемная доля границ раздела и границ зёрен увеличивается с 0,3 до 87,5 %.**

При **уменьшении размера зерна до 10 нм и более** начинает **сильно увеличиваться доля тройных стыков.** С этим связывают аномальное падение твердости в этом интервале размеров зерна .



[71]

При **размере зерен меньше 7 нм** вместо повышения твердости **наблюдается обратный эффект Холла–Петча**, т.е. имеет место разупрочнение.

Это **объясняется не дислокационным механизмом деформирования наноструктурных материалов - проскальзывание зерен по границам (ротационный механизм).**

Поверхность наноструктурных материалов

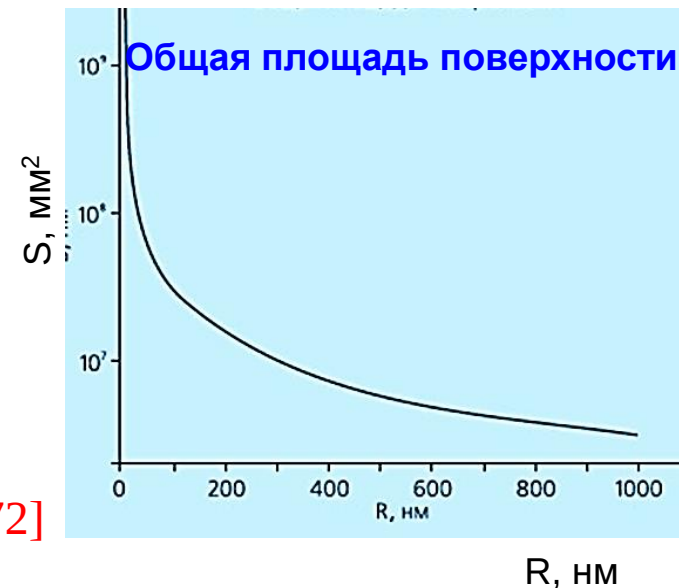
Между диаметром зерна (частицы) и объемной долей поверхностного слоя существуют следующие соотношения:

диаметр зерна (частицы), нм						
100	50	25	20	10	6	4
объемная доля поверхностного слоя, %						
6	12	24	30	60	100	150

В нанокристаллических материалах, начиная с диаметра зерна 6 нм объём поверхностного слоя становится больше объемной доли кристаллов.

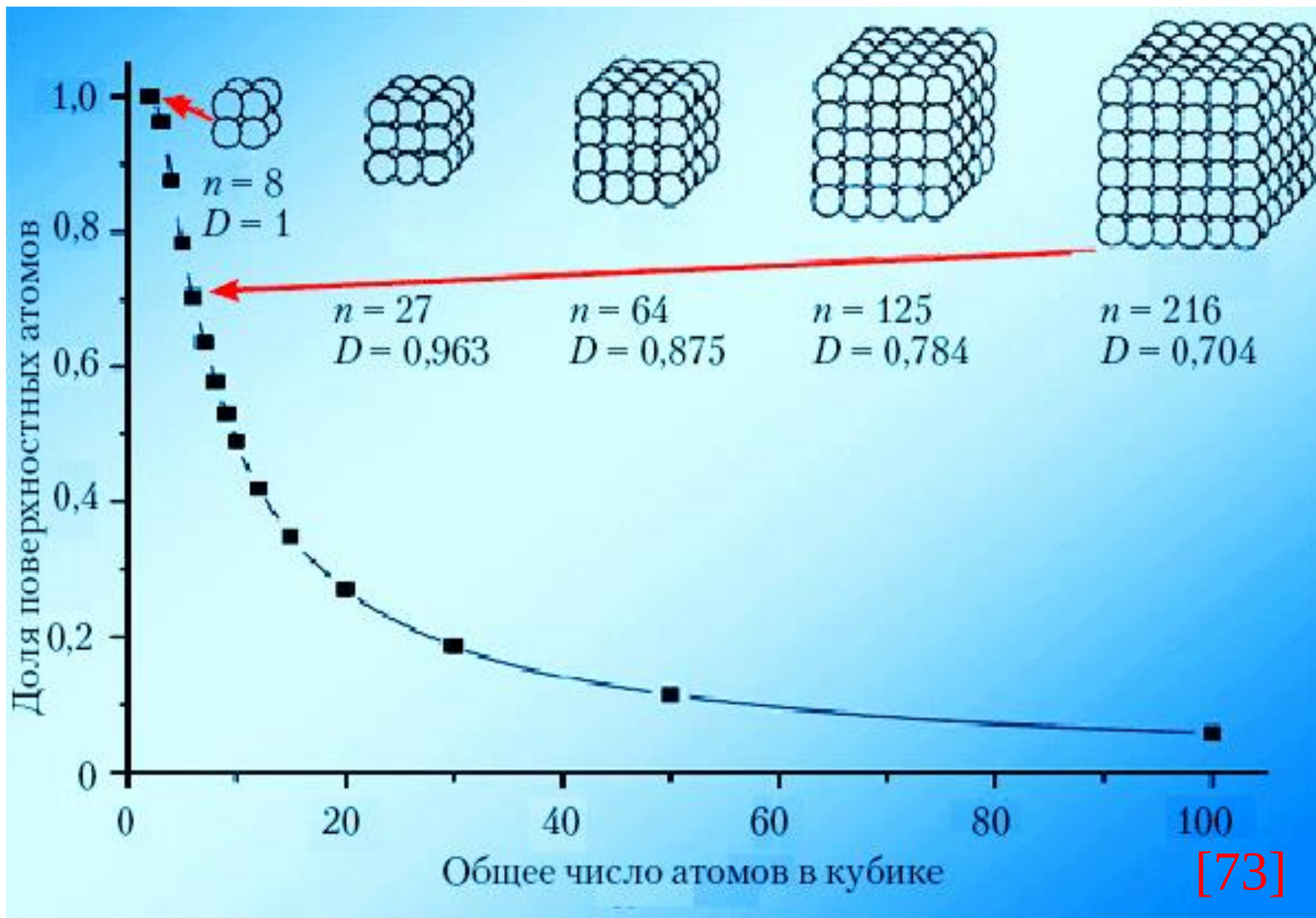


[72]



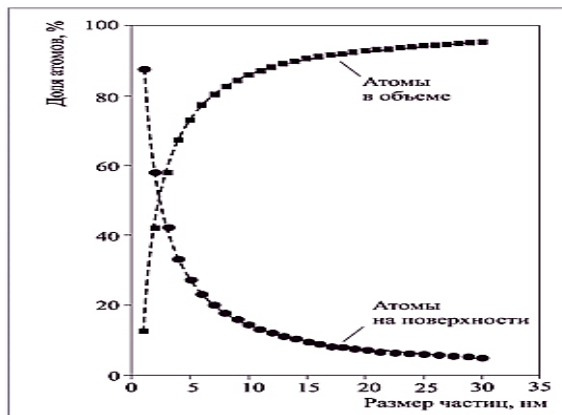
Насыщенный атомами поверхностный слой обладает большой химической активностью.

У наночастиц почти всё атомы на поверхности!



Изменение параметра решетки наноматериалов

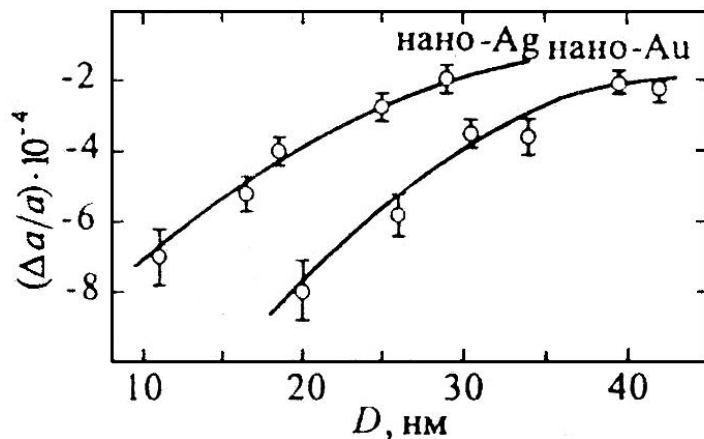
У поверхностных атомов задействованы не все связи с «соседями». Другой порядок расположения атомов (более близкое расстояние между ними), что приводит к искажению решетки и изменению её параметров.



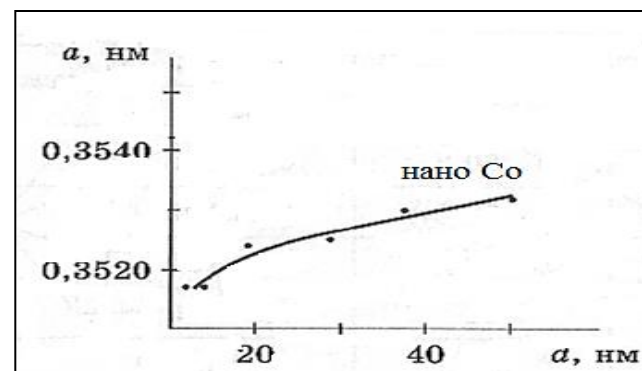
Высокие внутренние напряжения у нанокристаллов способствуют изменению межатомных расстояний в кристаллической решетке как металлов, так и других соединений с уменьшением размера зерен.

[74]

Для некоторых металлов (Al, Ag, Au и др.) происходит уменьшение параметров решетки при уменьшении диаметра наночастиц.



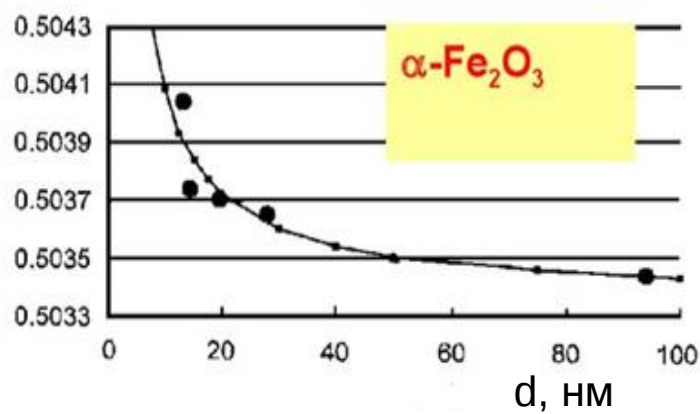
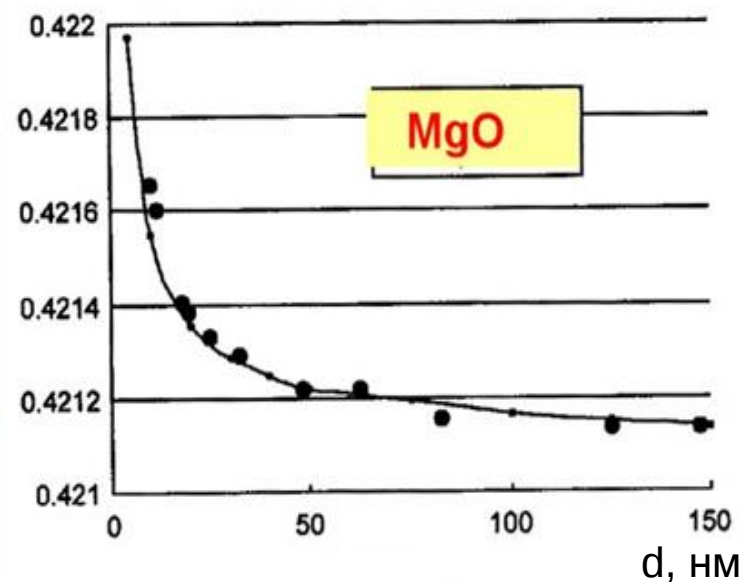
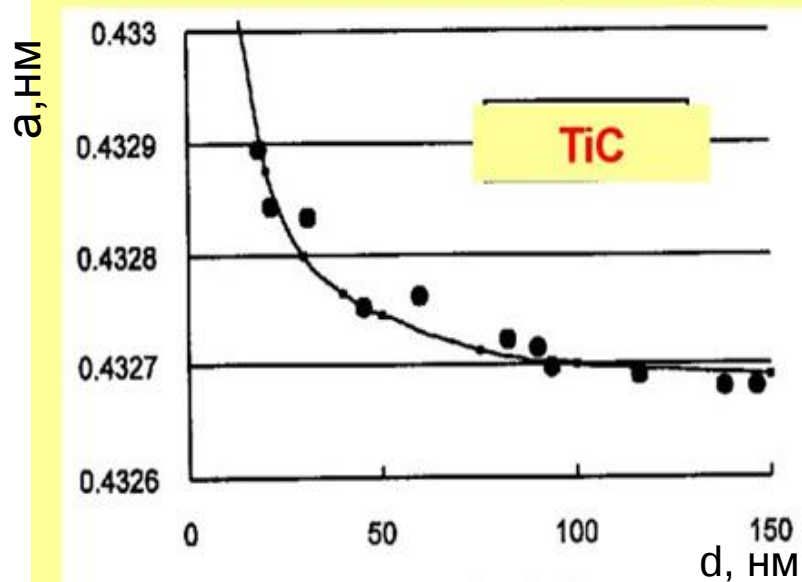
[74]



[75]

Размер, ниже которого наблюдается уменьшение параметра решетки, различен для разных металлов и соединений.

Для многих соединений с уменьшением размера наночастиц параметр решетки увеличивается



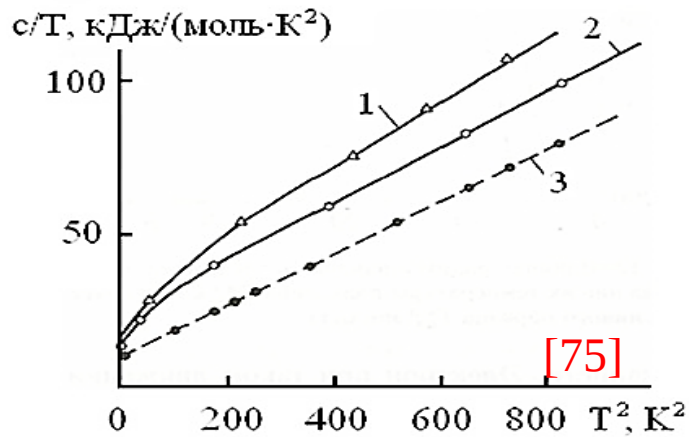
[76]

3. Физические и химические свойства наноматериалов

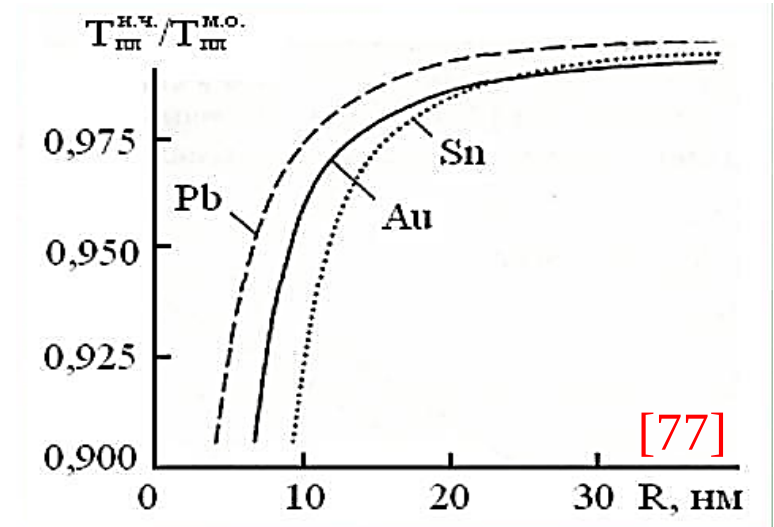
Насыщенный атомами тонкий поверхностный слой обладает повышенной энергией и химической активностью, что приводит к изменению ряда физических и химических свойств.

У наноматериалов **сильно понижается температура плавления.**

Увеличивается теплоёмкость и коэффициент термического расширения.



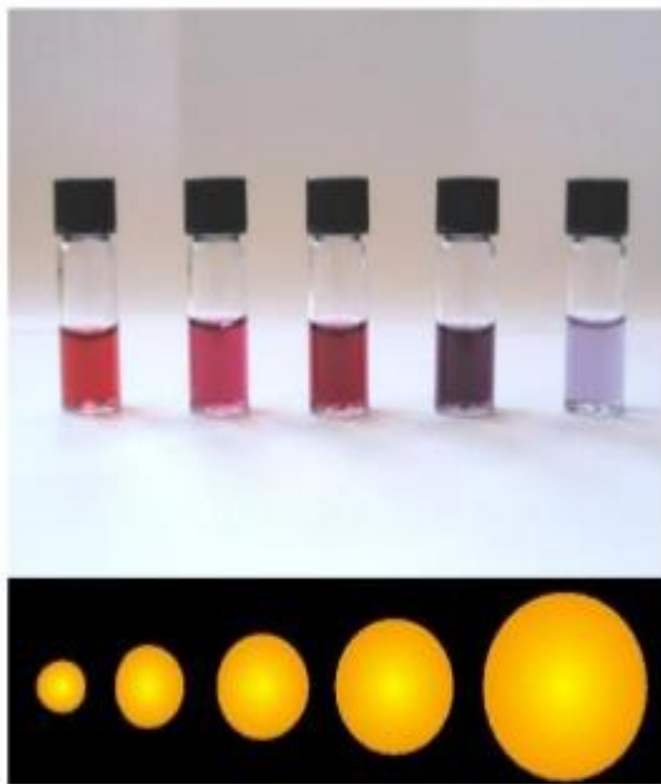
Температурная зависимость теплоёмкости наночастиц диаметром 3 нм (1), 36,6 нм (2) и массивного Pd (3).



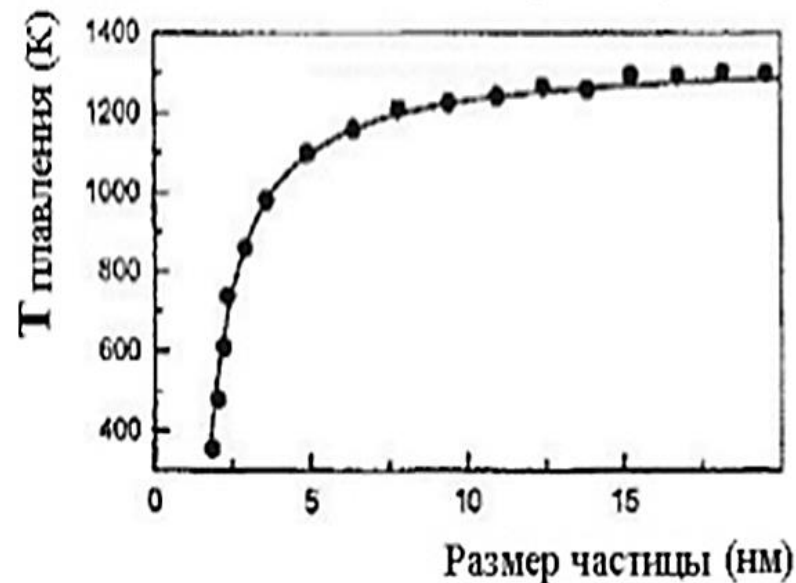
Изменяются электрические и магнитные свойства.

Коэффициент диффузии повышается в 1000 раз.

Зависимость химических и физических свойств наноматериала от размера составляющих его частиц



Зависимость цвета золь золота от размера частиц.



[78]

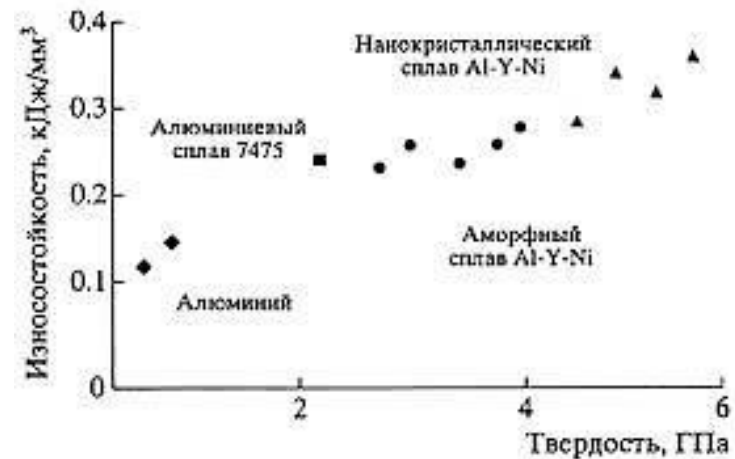
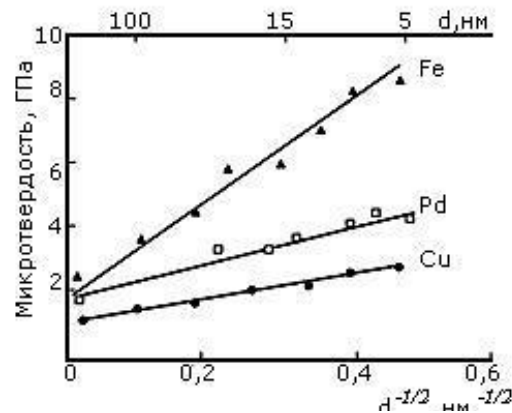
Зависимость температуры плавления золота от размера частиц.

4.МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Увеличиваются

все характеристики прочности. При измельчении зерна с 110 мкм до 5 нм твердость возрастает в 5 раз.

Повышается износостойкость.



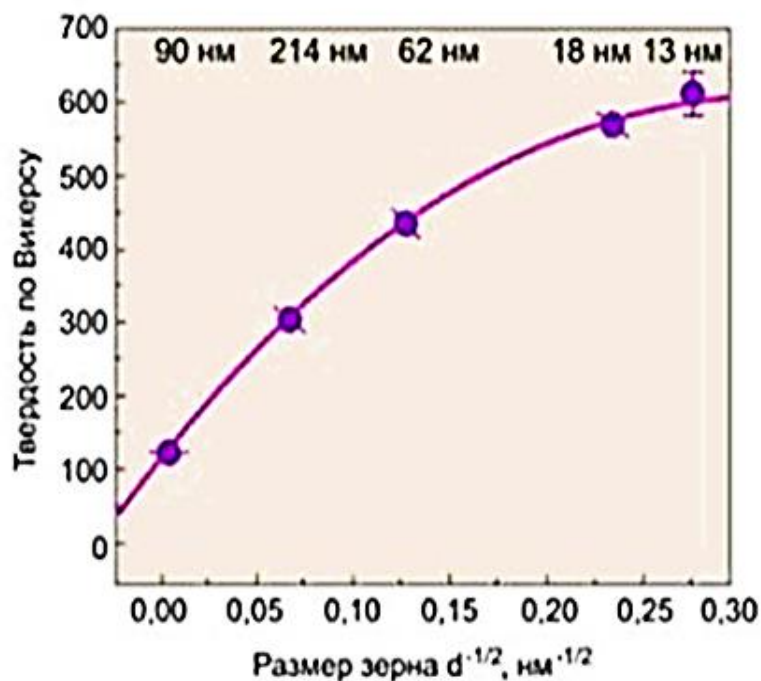
[69]



Важно, что в большинстве случаев, при увеличении прочности не уменьшаются и даже увеличиваются пластичность, вязкость и трещиностойкость.

Механические свойства обычного и нанокристаллического никеля

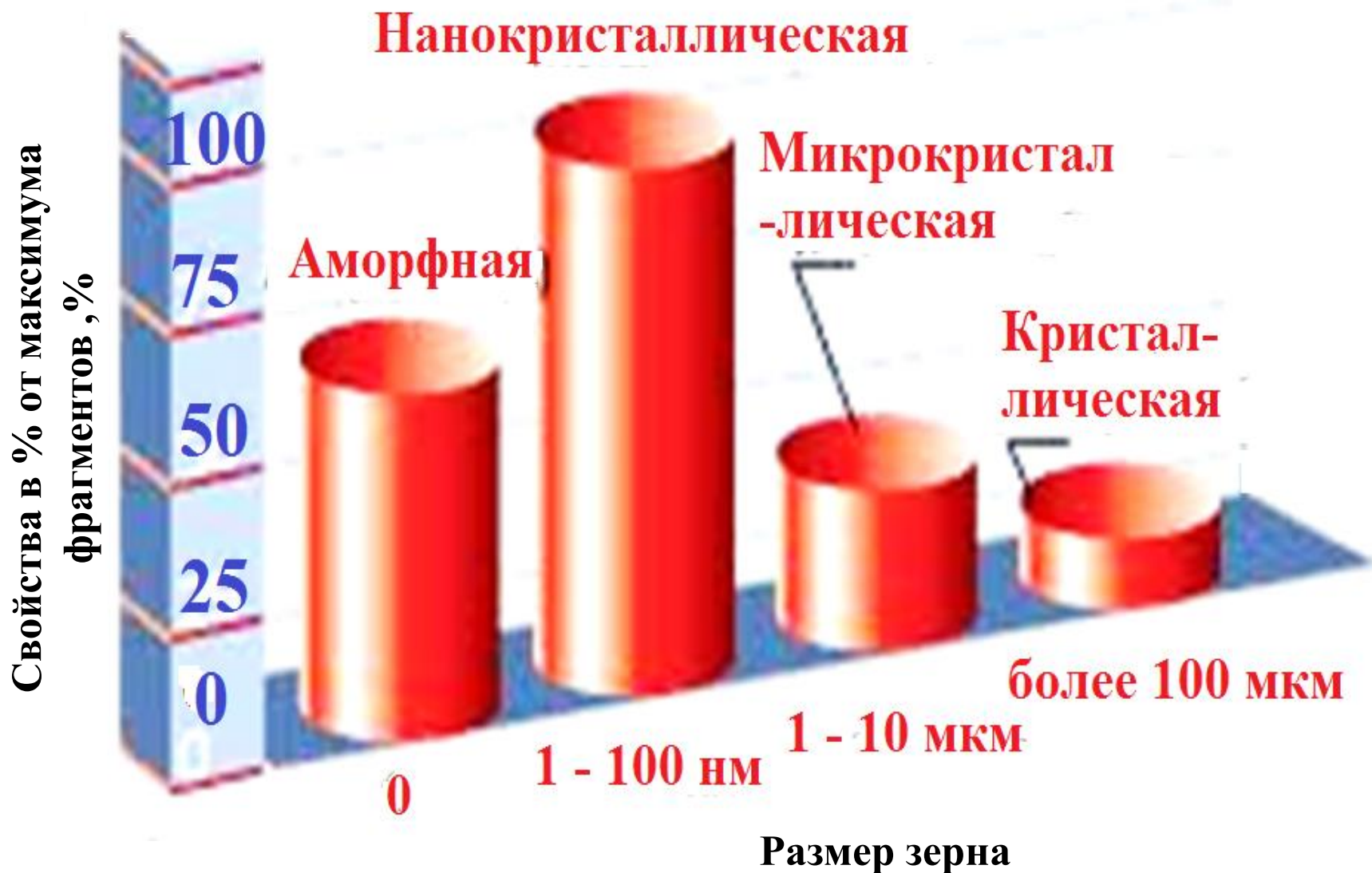
Свойства	Обычный, 10 мкм	Нано - Ni	
		100 нм	10 нм
Прочность, МПА (25°C)	103	690	>900
Предельная прочность на растяжение, МПА (25°C)	403	1100	>2000
Твердость по Викерсу, кг/мм ²	140	300	650



Применение:

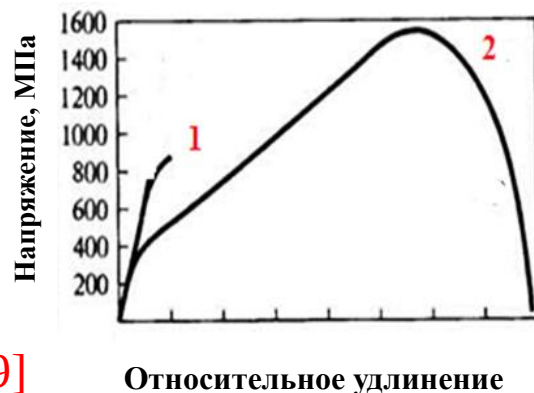
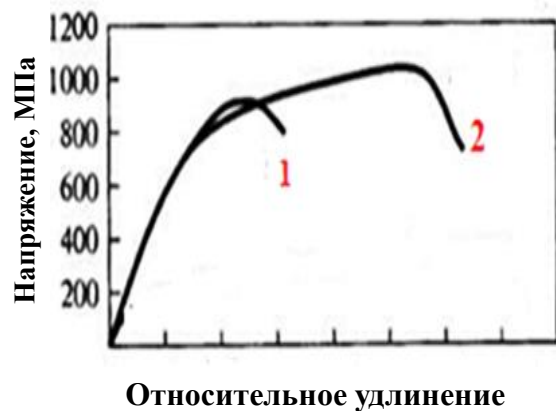
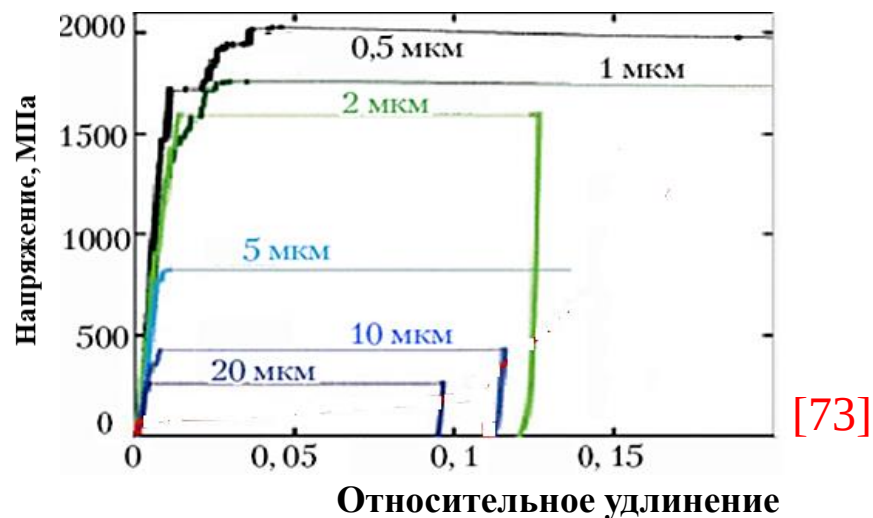
Защита внутренней поверхности труб парогенераторов атомных станций в условиях высоких тепловых и потоковых нагрузок

Влияние структуры материала на свойства



Соотношение между прочностью и пластичностью для крупнокристаллических и нанокристаллических материалов.

С уменьшением размера зерна
повышается конструкционная
прочность – растёт
прочность при
одновременном повышении
пластичности



Повышенную пластичность у
хрупких наноматериалов
(нанокерамики) при низких
температурах можно
использовать в
промышленных процессах
экструзии и прокатки и в
качестве конструкционного
материала

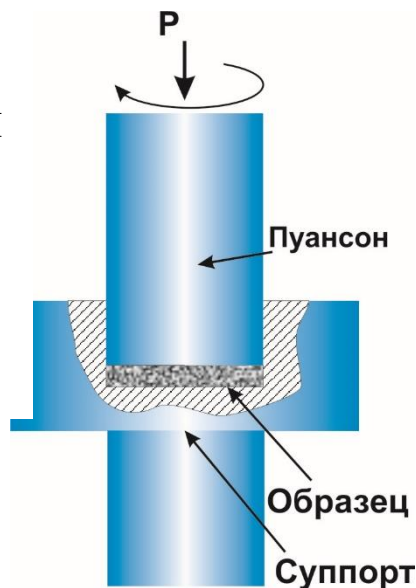
Кривые растяжения титана:
зерно ~ 20мкм (1), ~ 100нм (2).
Кривая растяжения Ni₃Al:
зерно 6 мкм (1) и ~150 мкм (2)

Получение объёмных наноматериалов

Суть методов – измельчение составляющих микроструктуры до нанодиапазона за счёт интенсивной пластической деформаций (ИПД) при высоком давлении.

Деформация кручением
дисковых заготовок

Дисковые заготовки
диаметром до 20 мм
и толщиной от 0,3
до 1 мм
деформируют
кручением.
Размер зерна
~100 нм.



Равноканальное угловое
прессование -РКУП



Образец круглого
или квадратного
сечения
деформируется
сдвигом.

Размер зерна от 200
до 500 нм.

Получают заготовки диаметром 60 мм и длиной ~200 мм.

Перспективные методы ИПД – многократная прокатка, всесторонняя ковка, винтовое прессование и др.

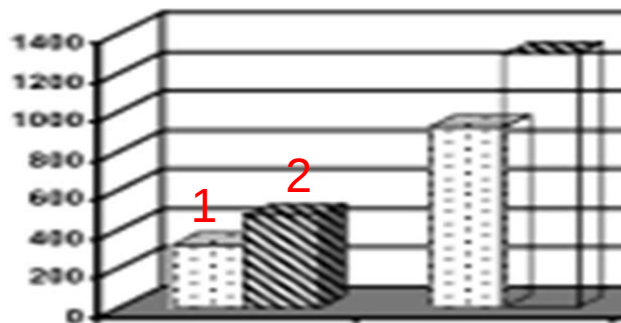
Повышение конструкционной прочности сталей с наноструктурой



Нержавеющая аустенитная сталь 12Х18Н10Т после РКУП при комнатной температуре с размером зерна 170 нм имеет предел текучести 1340 МПа практически в 6 раз превышающей предел текучести этой стали после термообработки. При этом пластичность сохраняется на достаточно высоком уровне ($\delta=27\%$).

Прочность низкоуглеродистых малолегированных сталей с субмикроструктурой при комнатной температуре в 2-2,5 раза выше, чем серийно выпускаемых, при сохранении пластичности и высокой вязкости!!!.

Сталь 09Г2С



Исходное состояние После РКУП

Изменение предела текучести (1) и предела прочности (2)

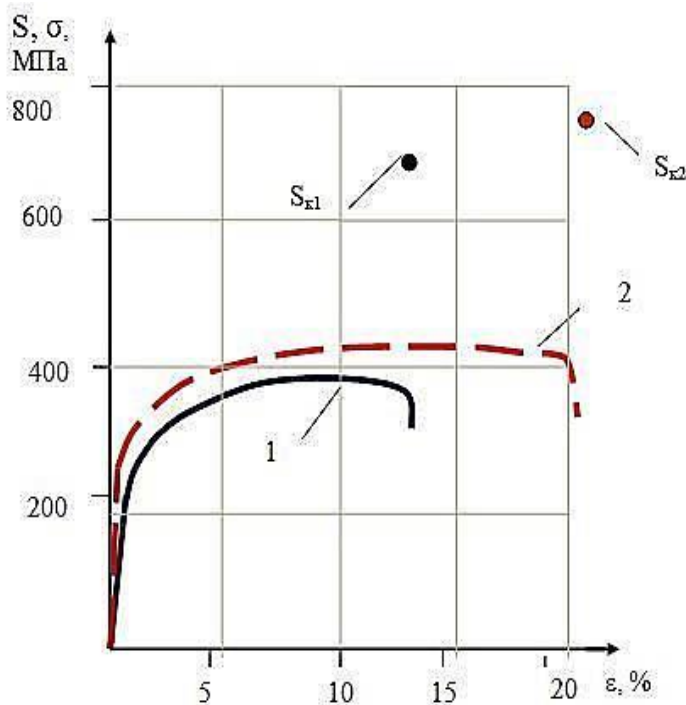
Сталь 09Г2С

Структура	KCV, МДж/см ²	
	при +20°C	при -40°C
исходное состояние	0,22	0,13
холоднос РКУП	0,63	0,14

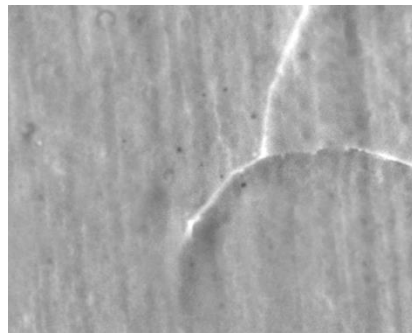
При повышении прочности увеличивается ударная вязкость [81]

Влияние наноструктурного поверхностного слоя на конструктивную прочность изделий

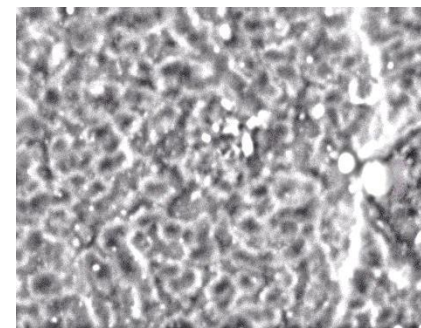
Размер зерна в тонком поверхностном слое после ИБ.



1 – исходное состояние стали 20; 2 – после ионной бомбардировки (ИБ)



диаметр зерна 40 мкм



диаметр зерна 200 нм

Состояние	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Исходное	390	220	13	15
Исходное + ИБ	420	250	23	39

Поверхностный слой глубиной 50 нм с элементами субмикроструктурной и нанокристаллической структуры обеспечивает повышение конструктивной прочности всего изделия (при растяжении прочность увеличивается при одновременно повышении пластичности более, чем в 2 раза).

Вопросы для самостоятельной работы

1. Нанопорошки, их свойства и применение.
2. Фуллерены и нанотрубки. Их использование в композиционных материалах с целью повышения конструкционной прочности.

Литература

1. Дьяченко С.С. Материаловедение : учебник / С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, А.А. Мовлян, Э.И. Плешаков.- Харьков: Издательство ХНАДУ, 2010.-464 с. (стр.335 -338).



Лекция 9

Аморфные металлические материалы

Содержание

1. Процессы стеклования и разстеклования аморфных металлических материалов.
2. Получение металлических стекол.
- 3.Строение аморфных металлов.
- 4.Свойства металлических стекол.
- 5.Применение аморфных металлических материалов.

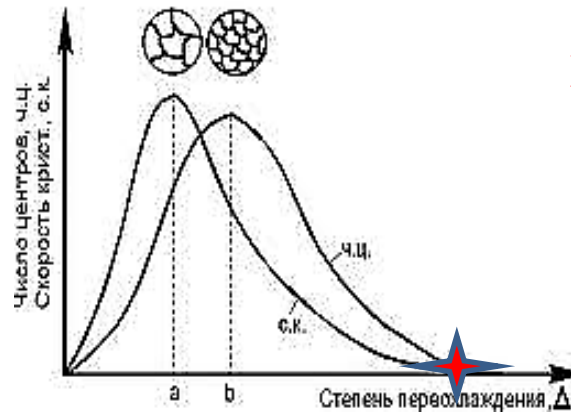
1. Процессы стеклования и разстеклования аморфных металлических материалов.

Аморфный (от греч. amorphous – **бесформенный**) материал –это **твердое некристаллическое вещество с внутренней структурой жидкости.**

Атомы не имеют периодического порядка.

Процесс стеклования.

При очень большой степени переохлаждения  и при наличии элементов аморфизаторов (бор, фосфор, кремний, углерод и металлы) не может образоваться кристаллическая фаза и металл затвердевает как аморфное тело. Такой процесс называется **стеклованием.**



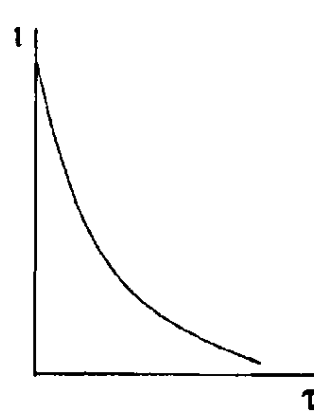
Для процесса **стеклования** необходимо **переохлаждение равное $(0,35 - 0,6) T_{пл}$** , чтобы подавить процесс кристаллизации. Необходимо обеспечить **сверх высокие скорости охлаждения $> 10^6$ °C/с**, которые можно получить лишь в малом сечении.

Металл с аморфным строением называют **металлическим стеклом**, или метглассом (от англ.glass - стекло).

Эти материалы – одна из последних инноваций XX века.

Разстеклование аморфного состояния сплава

Полученное при быстром непрерывном охлаждении из жидкости аморфное состояние твердых тел является термодинамически неравновесным.



Стеклование при охлаждении



Разстеклование при нагреве

При нагреве вследствие повышения подвижности атомов происходит кристаллизация — разстеклование. Температура процесса (0,4 - 0,65) $T_{пл}$.

Температура кристаллизации аморфного сплава зависит от его химсостава.

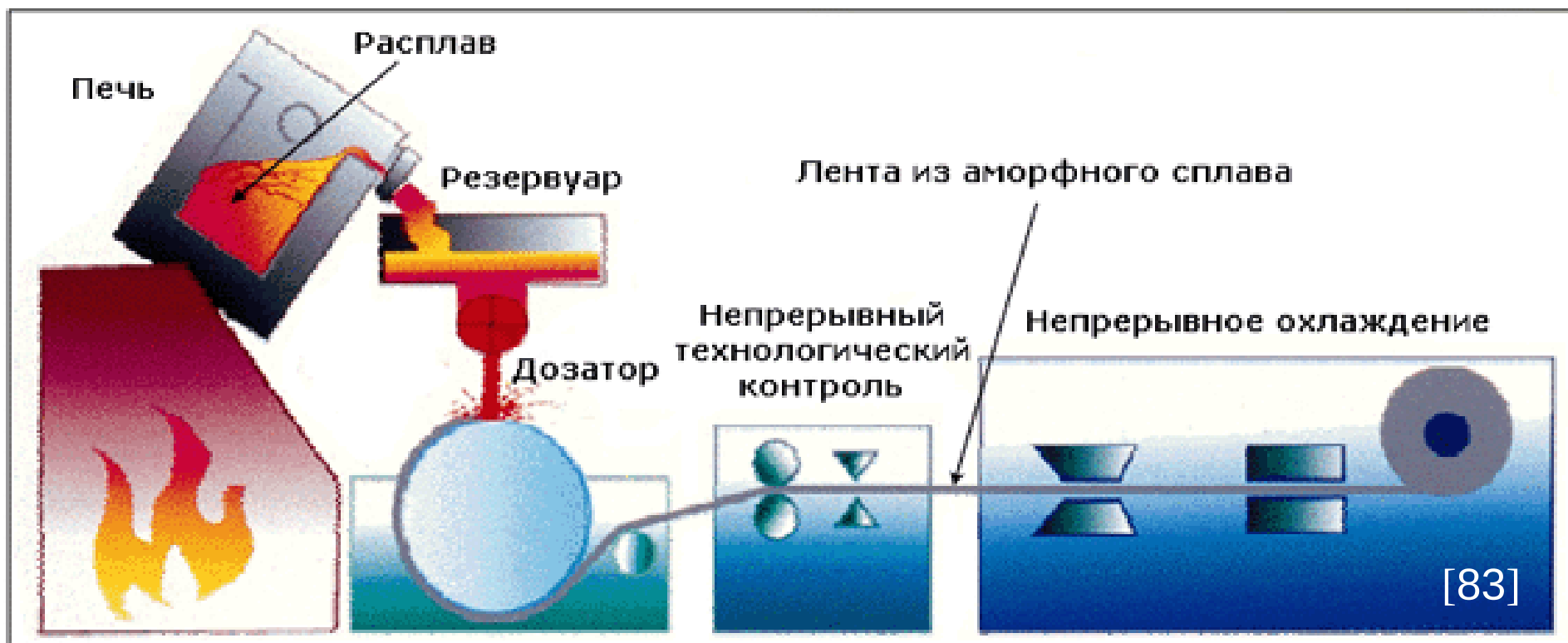
Для стекла на основе железа равна ~ 430 С.

Большинство современных промышленных металлических стекол имеют температуру разстеклования около 500°C .

После кристаллизации металл однородный и ультрамелкозернистый ($< 50\text{н}$), который не может быть получен никаким другим способом.

Получение аморфной ленты

Непрерывная разливка на водоохлаждаемый барабан.



Метод очень **простой**, позволяет в широких пределах изменять ширину ленты в зависимости от размеров плавильных тиглей. Можно изготавливать **ленты шириной от 0,1 – 0,2 мм до 300 мм**.

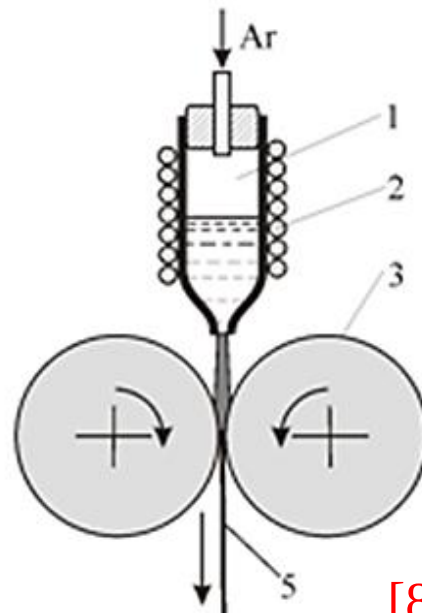
Основные проблемы: 1. получение достаточной степени чистоты внешней поверхности, которая не соприкасается с холодильником.

2. Смотка большой длины ленты (более 5000 м) во время процесса литья на намоточное устройство.

Метод прокатки расплава между холодными валками с высокой теплопроводностью

Сверхвысокие скорости охлаждения (не ниже 10^6 °C/с) жидкого металла для получения аморфной структуры можно реализовать другими способами.

Суть метода - расплав, полученный в индукционной печи, **выдавливается** нейтральным газом (аргоном) **из сопла и затвердевает** при соприкосновении с поверхностью вращающихся валков.



[84]

Прокатка струи металла

- 1 – плавильный тигель, 2 – индуктор,
3 – закалочный валок, 4 – съёмник ленты
5 – лента.

Метод прокатки расплава позволяет получить достаточно высокую степень чистоты внешней поверхности ленты, которая соприкасается с холодными валками, что **улучшает её качество и свойства.**

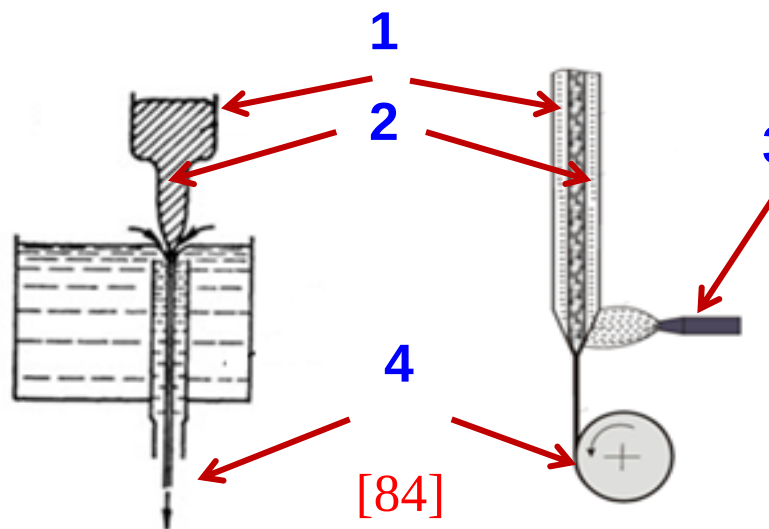
Прокаткой получают ленты шириной 10 мм и более.

Получение аморфной проволоки

1. Метод экструзии

(выдавливания) -

расплав протягивается через круглое отверстие трубки с охлаждением, погруженной в охлаждающую жидкость (водный раствор солей).



Методом экструзии

1 – стеклянный тигель, 2 – сплав,
3 – горелка, 4 – аморфная
проволока.

В стеклянном капилляре

2. Метод максимально быстрого вытягивания расплава в стеклянном капилляре. Волокно диаметром 2-5 мкм получается при протягивании расплава одновременно со стеклянной трубкой. **Трудность** состоит в отделении волокна.

Эти методы обеспечивают скорость охлаждения порядка 10^5 °C/с и позволяют **получать аморфную проволоку – волокна диаметром 2...5 мкм.**

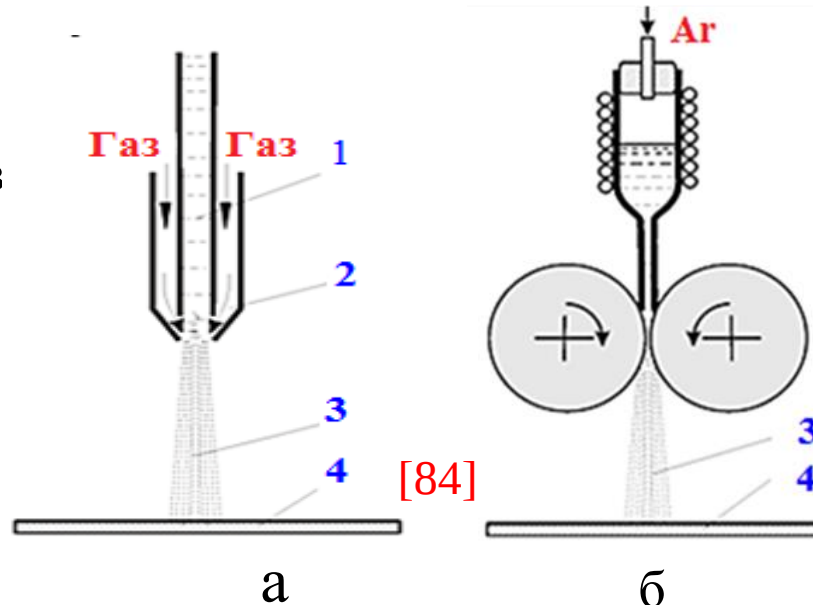
Проволоку **используют** для армирования трубок высокого давления, изготовления **металлокорда шин.**

Получение аморфных порошков

Аморфные порошки получают **методом распыления** расплава **газовым потоком** (а) и **методом кавитации** (б)

Распыление
расплавленного
металла или сплав
струёй сжатого
воздуха
(жидкости) на
холодной плите.

Процесс
высокопроизводи-
телен (**до 10 т/ч**),
экологически
чистый.



1 – **расплав сплава**, 2 – **газовый поток**,
3 – **распылённый расплав**,
4 – **плита-холодильник**

В кавитационном
методе расплавленный
металл выдавливается в
зазоре толщиной **0,2 –**
0,5 мм между двумя
валками из графита или
нитрида бора.

Расплав выбрасывается
валками в виде порошка,
который попадает на
охлажденную плиту.

С помощью этих методов получают **порошок в виде гранул**
диаметром около 100 мкм.

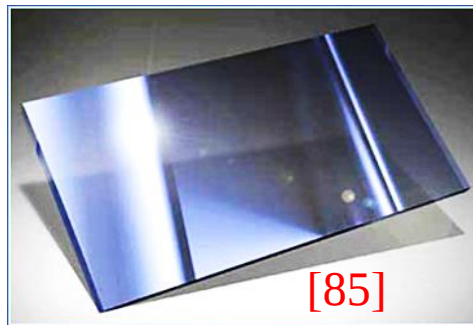
Металлические стёкла

Получение аморфной структуры в принципе возможно для всех металлов.

Для практического применения **обычно используют сплавы переходных металлов** (Fe, Co, Mn, Cr, Ni и др.), в которые **добавляют аморфообразующие элементы** типа B, C, Si, P, S, резко **понижающие температуру плавления**.

Наиболее легко
аморфное состояние
достигается в сплавах
Al, Pb, Cu.

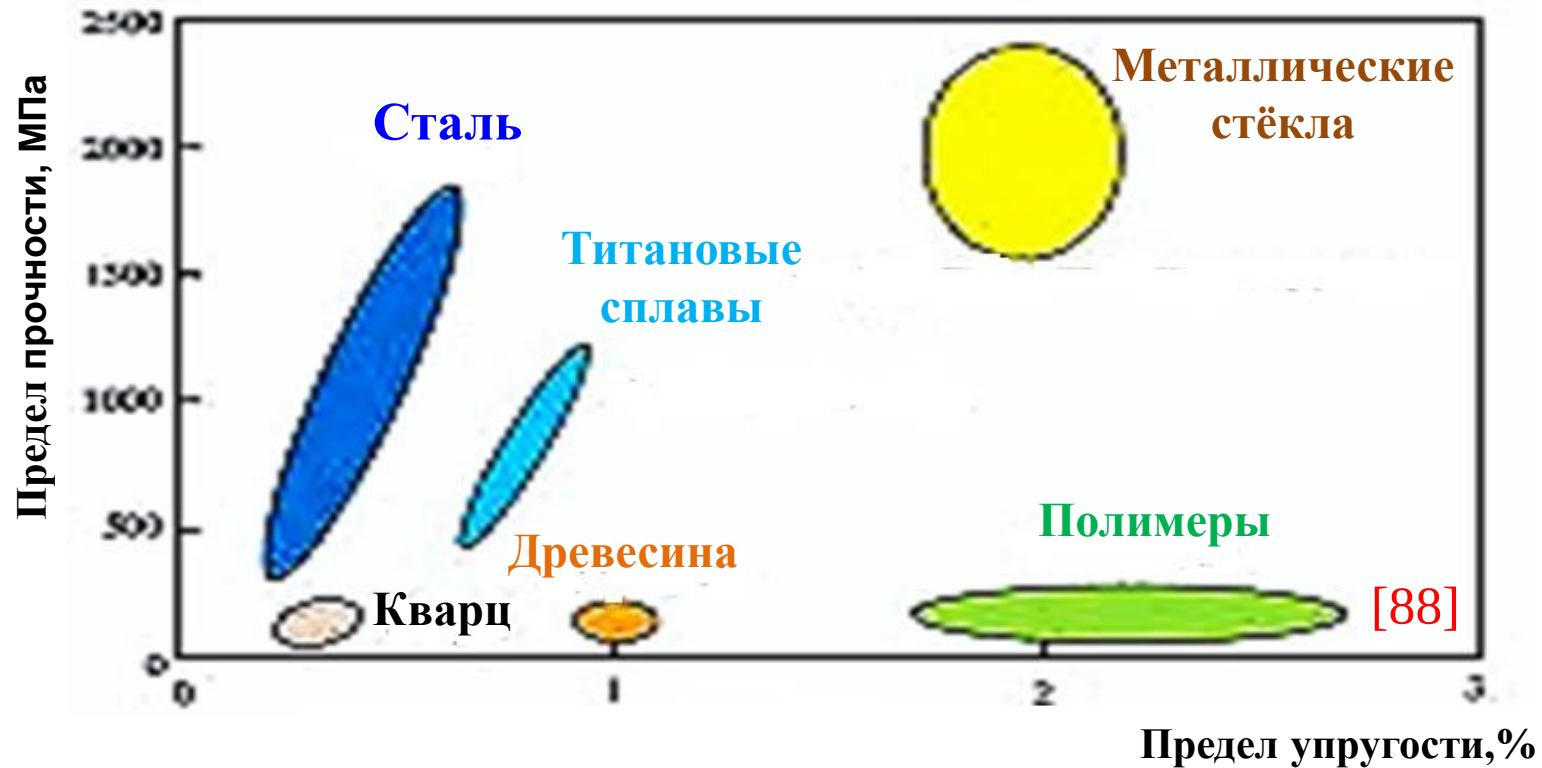
Сплавы обычно
содержат около 80 ат. %
одного или нескольких
переходных металлов и
20 % металлоидов



Аморфные сплавы чаще
отвечают формуле **M80X20**,
где **M** – один или несколько
переходных элементов, а **X**
– один или несколько
аморфообразующих
элементов (**Fe80P13C**,
Ni82P18, **Ni80S20**).

На термическую стабильность аморфных сплавов оказывает наибольшее влияние **кремний и бор**, **самой высокой прочностью** обладают **сплавы с бором и углеродом**, а **коррозионная стойкость** зависит от концентрации **хрома и фосфора**.

Аморфные сплавы сочетают в себе высокую прочность и упругость, чего **нельзя достичь в других материалах**.



Производство аморфной ленты и аморфной проволоки является **принципиально новой металлургической технологией**.

Особенности строения и уникальные свойства позволяют получить конечную металлургическую продукцию в процессе одной технологической операции – непрерывной разливки, минуя трудоёмкий и энергоёмкий многоступенчатый технологический цикл, включающий выплавку, разливку, ковку или прокатку.

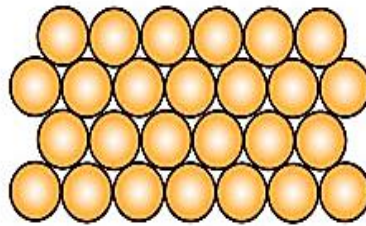
3. Строение аморфных металлов

У аморфных тел отсутствует дальний порядок в расположении атомов (в виде бесконечных рядов, уходящих вдаль).

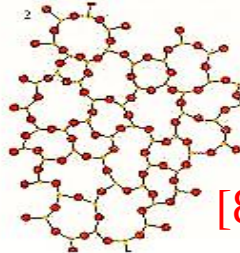
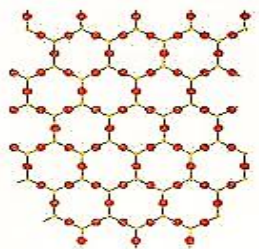
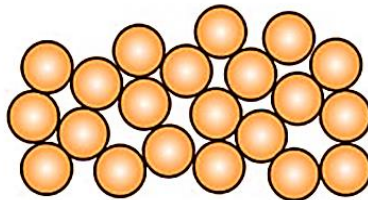
Для них характерно беспорядочное расположение атомов, так называемый ближний порядок.

У них отсутствует кристаллическая решетка.

Кристаллическое состояние



Аморфное состояние



[87]

Получить подобный порядок у металлов в твердом состоянии можно «заморозив» атомную структуру жидкости при очень высокой степени переохлаждения расплава. Плотность аморфных сплавов лишь на 1-2% меньше плотности соответствующих кристаллических тел.

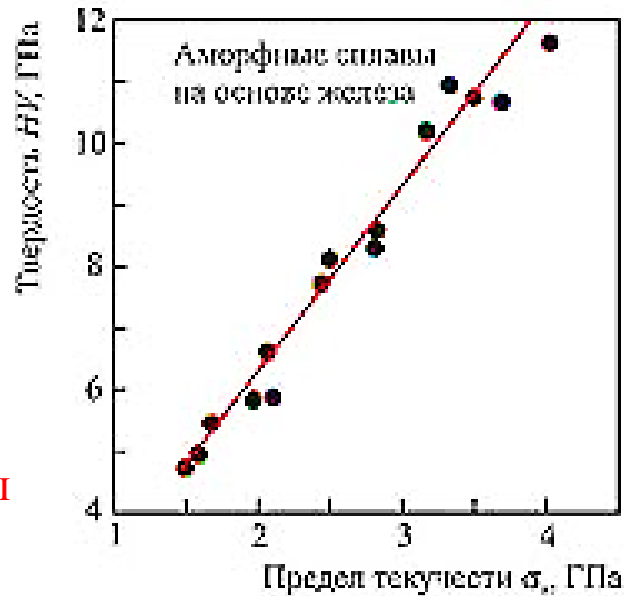
Характерной особенностью металлических стекол является химическая однородность и отсутствие дефектов (дислокаций, границ зерен), что обеспечивает им уникальные свойства.

4. Свойства металлических стёкол.

Аморфные сплавы **обладают уникальными свойствами.**

Это - очень гибкие и высокопрочные, твёрдые, износостойкие материалы, обладающие высокой пластичностью (при изгибе и сжатии), исключительной коррозионной стойкостью, температурной и деформационной стабильностью.

Аморфные сплавы более чем в 2 раза прочнее самой качественной легированной стали. **Предел текучести их 2600 – 4500 МПа**, а у высокопрочных сталей не превышает **2500 МПа**. **Предел прочности и предел текучести практически равны между собой** из-за отсутствия носителей пластической деформации



Сплав на основе Ni [89]

Сплавы **обладают очень высокой твердостью**. Отношение твердости к пределу текучести 2,5-3, что близко к теоретическому значению 2,9 для идеально пластичных тел не имеющих деформационного упрочнения.

Это очень высокопрочные материалы.

Хром, ванадий, марганец и титан увеличивают твердость, а замена части атомов железа никелем, кобальтом и медью – уменьшают.

Характерна четкая линейная связь между твердостью и прочностью.

Так для сплавов Fe, Ni, Co справедливо выражение $HV = 3,2 \sigma_T$, что позволяет с достаточной точностью по твердости оценивать прочностные характеристики.

Значения твёрдости и прочности аморфных сплавов

Сплав	HV	σ , ГН/м ²	E , ГН/м ²	σ/E	HV/ σ
Fe ₈₀ P ₂₀	700	—	—	—	—
Fe ₈₀ B ₂₀	1080	3,5	170	0,020	3,1
Fe ₉₀ Zr ₁₀	640	2,2	—	—	2,9
Fe ₈₀ F ₁₃ C ₇	760	3,1	124	0,025	2,5
Fe ₇₈ B ₁₀ Si ₁₂	910	3,4	120	0,028	2,7
Fe ₆₂ Mo ₂₀ C ₁₈	970	3,9	—	—	2,9
Fe ₆₂ Cr ₁₂ Mn ₈ C ₁₈	900	3,3	—	—	2,7
Fe ₄₆ Cr ₁₆ Mo ₂₀ C ₁₈	1130	4,0	—	—	2,8
Co ₉₀ Zr ₁₀	600	1,9	—	—	3,2
Co ₇₈ Si ₁₅ B ₁₂	910	3,1	90	0,034	3,0
Co ₅₆ Cr ₂₆ C ₁₈	890	3,3	—	—	2,7
Co ₄₄ Mo ₃₆ C ₂₀	1190	3,9	—	—	3,1
Co ₃₄ Cr ₂₈ Mo ₂₀ C ₁₈	1400	4,1	—	—	3,4
Ni ₉₀ Zr ₁₀	550	1,8	—	—	3,1
Ni ₇₈ Si ₁₀ B ₁₂	860	2,5	80	0,034	3,4
Ni ₃₄ Cr ₂₄ Mo ₂₄ C ₁₈	1060	3,5	—	—	3,0
Pd ₆₀ Si ₂₀	325	1,4	68	0,020	2,4
Cu ₅₀ Zr ₅₀	410	1,9	—	—	2,7
Nb ₅₀ Ni ₅₀	893	—	132	—	—
Ti ₅₀ Cu ₅₀	610	—	100	—	—

[89]

Как твёрдость, так и прочность сильно зависят от химсостава.

В сплавах на основе Fe,Co,Ni твёрдость $HV > 1000$, а прочность — более 4,0 ГН/м².

Эти значения больше, чем у любых металлических материалов.

Свойства металлических стёкол

При очень высокой прочности сплавы имеют хорошую **пластичность при сжатии (до 50%)** и изгибе.

При растяжении их **относительное удлинение** составляет не более 1-2%.



[90]

Сплавы имеют очень **высокую коррозионную стойкость**.

Они стойки в морской воде, кислотах и щелочах. Не чувствительны к охрупчиванию при старении.

Они имеют **близкий к нулю коэффициент теплового расширения**, а их **удельное электросопротивление** в три-четыре раза **выше значений для железа** и его сплавов.

У них низкая теплопроводность и **лучшие магнитные свойства** в сравнении с кристаллическими сплавами

Благодаря уникальным свойствам сплавов из них получены первые крепёжные изделия – очень прочные и не хрупкие.



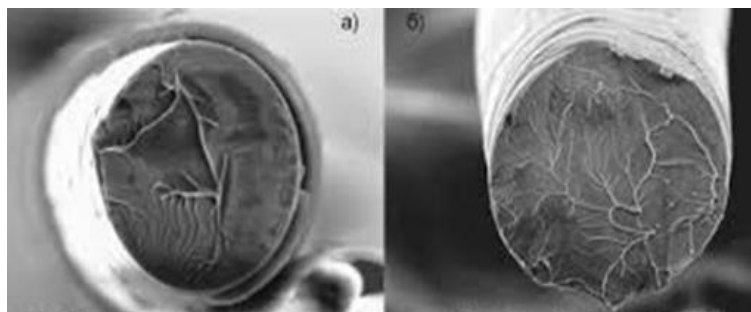
[91]

Пластичность вязкость и пластичность металлических стёкол

Энергия разрушения и ударная вязкость аморфных сплавов значительно превышает эти характеристики для обычных кристаллических сталей и сплавов.

Характер излома свидетельствует о вязком разрушении металлических стекол.

Аморфные высокоуглеродистые стали, содержащие Cr, Mo, W, обладают **высоким сопротивлением разрушению.**



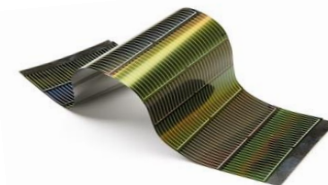
Излом металлических стёкол [92]

Сплав $\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$ имеет **очень высокую вязкость разрушения** -110 кДж/м², тогда как для стали X-200 всего 17 кДж/м².

Аморфные сплавы можно считать **пластичными стёклами** : их можно резать, штамповать, подвергать вырубке, сплести и даже прокатывать.

Лента аморфного сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{29}\text{P}_{14}\text{B}_6\text{A}_{12}$ толщиной 25 мкм без образования микротрещин может быть согнута вокруг острия бритвенного лезвия.

У современных **сплавов на основе палладия пластическая деформация при прокатке** достигает при комнатной температуре **40%.**



5. Применение металлических аморфных материалов.

МС являются высокопрочным материалом с высокими упруго-пластическими характеристиками, имеющими очень малое деформационное упрочнение.

Состав сплава	Свойства	Применение
$\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$	Высокая прочность, высокая вязкость	Проволока, армирующие материалы, пружины, режущий инструмент
$\text{Fe}_{45}\text{Cr}_{23}\text{Mo}_{10}\text{P}_{13}\text{C}_7$	Высокая коррозионная стойкость	Электродные материалы, фильтры для работы в растворах кислот, морской воде, сточных водах
$\text{Fe}_{81}\text{B}_{13}\text{Si}_4\text{C}_2$	Высокая магнитная индукция насыщения, низкие потери	Сердечники трансформаторов, преобразователи, дроссели
$\text{Fe}_3\text{Co}_{70}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$	Высокая магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила	Магнитные головки и экраны, магнетометры, сигнальные устройства
$\text{Fe}_{83}\text{B}_{17}$	Постоянство модулей упругости и температурного коэффициента линейного расширения	Инварные и элинварные материалы

Несмотря на хорошие механические свойства, наличие конструкционной прочности металлические стёкла **не используются в качестве ответственных деталей конструкций** по причине их малых размеров, сравнительно низкой термической устойчивости, малой пластичности при растяжении.

Применение аморфных сплавов в конструкциях **ограничено** также **из-за их низкой свариваемости.**

Широкому распространению препятствуют высокая стоимость.

Нашли применение:

1. Сплавы на основе алюминия в производстве различных бронированных ограждений, так как обладают высокой прочностью и высокой вязкостью разрушения, позволяющей гасить энергию удара.
2. Аморфные сплавы для армирования трубок высокого давления, изготовления металлокорда шин и др. В перспективе применение для изготовления маховиков с целью улучшения рабочих характеристик автомобилей .
3. Фольга толщиной ~ 25 мкм в качестве намотки для упрочнения сосудов высокого давления .
4. МС для изготовления пружин, мембран, бритвенных лезвий.
5. Плетеные сетки, заменяющие арматуру в железобетонных плитах, канаты, прочные волокнистые композиты, позволяющие сэкономить металл.

Очень перспективным является использование МС в качестве коррозионностойкого материала.

Использование металлических стёкол в качестве магнитного и электротехнического материала

Высокая магнитная проницаемость, индукция насыщения и большое удельное сопротивление позволяют эффективно использовать металлические стекла взамен трансформаторной стали.



Ресурс силовых трансформаторов с сердечниками из электротехнических сталей составляет 30-40 лет, а из аморфной ленты 80-85 лет и обеспечивает экономию электроэнергии более чем в 4 раза.!

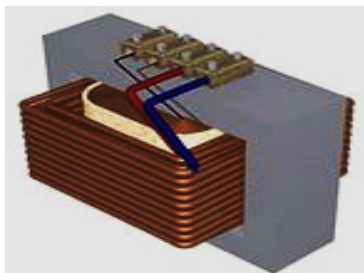


Уменьшение потерь в сердечниках трансформаторов позволяет сэкономить 20 млрд. кВтч электроэнергии, при потреблении ~1300 млрд кВтч в год.



Солнечная батарея заменит источники электроэнергии.

Низкая электропроводность метглассов позволяет не применять изоляцию пластин в сердечниках, а следовательно, уменьшить габариты и повысить к.п.д. электрических машин.



Вопросы для самостоятельной работы

1. Получение компактных аморфных материалов методом прессования порошков, гранул, плёнок. Их свойства, применение.
2. Системы аморфных сплавов, обеспечивающие наибольшую прочность, пластичность, коррозионную стойкость.
3. Композиционные аморфные материалы.

Литература

1. Дьяченко С.С. Материаловедение : учебник / С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, А.А.Мовлян, Э.И. Плешаков. -Харьков: Издательство ХНАДУ, 2010.- 464 с. (стр.333-335).

Література

- ✖ 1. Дяченко С.С. Матеріалознавство : підручник / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков.- Харків: Видавництво ХНАДУ, 2007.- 440 с. (стор.238–243).



Источники использованных иллюстраций

1.Мощенок В.И. Новые методы определения твёрдости материалов : монография / В.И.Мощенок. – 2-е изд. доп. и перераб. - Х.: ХНАДУ, 2013. – 324с.

2.<http://malishev.info/exams/matved/sem2/21>

3.<http://www.znanius.com/104.html?&L=2>

4.<http://weldering.com/ispytanie-materialov-svarnyh-soedineniy>

5.<http://gigabaza.ru/doc/63774-p4.html>

6.<http://aluminium-guide.ru/mexanicheskie-svojstva-alyuminievyx-spla>

7.<http://matved.ru/tverdost>

8.http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/NTS/DET_MASH/MEHANIKA/METOD/DRIGIN/frame/2_3.htm

9.<http://matved.ru/udarnaya>

10.http://studopedia.ru/2_73861_vyazkoe-i-hrupkoe-razrushenie

11.http://studopedia.ru/2_73861_vyazkoe-i-hrupkoe-razrushenie-etapi-protssesa-hrupkogo-ra

12. Электронный учебник МАДИ.

13. <http://rushkolnik.ru/docs/114/index-2850740.html>
14. [http://megabook.ru/media/Дислокации%20\(винтовая\)](http://megabook.ru/media/Дислокации%20(винтовая))
15. <http://fs.nashaucheba.ru/docs/180/index-245613.html?page=2>
16. Дьяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: Навч. посібник. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. – 226с.
17. http://fn.bmstu.ru/data-hysics/library/physbook/tom6/ch2/texthtml/ch2_2.htm
18. <http://metal-archive.ru/metallovedenie/691-vzaimodeystvie-dislokaciy.html>
19. <http://fs.nashaucheba.ru/docs/180/index-170434.html>
20. http://studopedia.su/12_142097_vintovaya-dislokatsiya.html
21. <http://oplib.ru/random/view/1163886>
22. <http://refdb.ru/look/2352268.html>
23. <http://mash-xxl.info/article/123459/>
24. http://specural.com/view_machine.php?id=1794
25. http://www.12821-80.ru/tech/162-litejnoe_proizvodstvo
26. <https://www.youtube.com/watch?v=ay1VHyq0pJ8>
27. <http://blastservis.ru/kat/kabiny-drobestruynye/kabiny/kabiny-naklep-i-uprochnenie/>

- 28.http://chemanalytica.com/book/novyy_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/12_obshchie_svedeniya/6297
- 29.<http://www.studfiles.ru/preview/2548250/>
- 30.http://www.metalimprovement.com/ru/met_fatigue_ru2.html
- 31.http://science-bsea.bgita.ru/2011/mashin_2011_14/pesin techno.htm
- 32.http://science-bsea.bgita.ru/2012/mashin_2012/barchukov_pov.htm
- 33.<http://sl3d.ru/slovar/v/4318-vysokoprochnaya-stal.html>
- 34.<http://www.studfiles.ru/preview/1752118/page:2/>
- 35.<http://www.weldi.ng.su/publications-of-00,,,>
- 36.http://www.autodela.ru/main/top/news/Nissan_steel
- 37.<http://www.metaljournal.com.ua/new-tendensions-in-cars-production/>
- 38.<http://www.sdo-mysl.ru/?m=notes&p=9>
- 39.<https://refdb.ru/look/2588738-pall.html>
- 40.<http://plastinfo.ru/information/articles/341>
- 41.<http://lib.convdocs.org/docs/index-96736.html?page=16>
- 42.<http://steeltimes.ru/books/allmet/newmaterialinmetallurgy/135/135.php>
- 43.<http://www.plastinfo.net/information/articles/print/301>

44.<http://kzmo.ru>
45.<http://rvsn-bvo.narod.ru/rvsn-ru/rvsn-missiles/rsd10-Pioner/rsd-10raketa.htm>
46.<http://www.steklo-tech.ru/About/sssr.htm>
47.<http://mash-xxl.info/info/152290/>
48.<http://www.istel.rezsp.ru/ugleplas.htm>
49.<http://zele.ru/novel.php?id=6180>
50.<http://1000www.carexpert.ru/testdrive/volvo/volx9/volx9a970.htm>
51.<http://www.novostiavtomira.com/3710-avstraliycy-sdelali-kolesnye-diski-iz-on.html>
52.<http://tuning-ural.ru/index.php?mi=1340>
53.<http://weistec.com.ua/cfdriveshaft.html>
54.<http://www.hccomposite.com/catalog/40/131/>
55.<http://allwantsimg.com/jrd>
56.<http://graphite-market.com/p14768935-uglerod-uglerodnyj-kompozitsionnyj.html>
57.<http://pyrocarbon.spravka.ua/products/3.html>
58.<http://www.ottom.com.ua>
59.<http://vikon-spb.ru/nomid1315.htm>
60.<https://www.drive2.ru/l/2164341>

61.<http://bizorg.su/uglerod-uglerodnye-kompozitsionnye-materialy-r/kompanii>

62.<http://alfa-composite.com/articles/31-stekloplastiki-svojstva-primenenie-tehnologii>

63.<http://galspace.spb.ru/index69-1.html>

64.<http://vvs5500.ru/publ/4-1-0-100>

65.http://edulib.pgta.ru/els/_2012/102_12/uchebnik_html/3.htm

66.http://www.nanorf.ru/events.aspx?cat_id=223&d_no=1861&print=1&back_url=%2fevents.aspx%3fcat_id%3d223%26d_no%3d1861

67.<http://oborudivanie.cf/Производство+стеклопластика+оборудование/>

68.<http://www.studfiles.ru/preview/2459232/page:2>

69.<http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/VRAN/SESSION/NANO7.HTM>

70.<http://900igr.net/fotografii/khimija/Amorfnye-splavy/014-Struktura-NKM.html>

71.http://ftfsite.ru/wp-content/files/present_nanomaterian_5.1.pdf

72.http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431265/Nanotekhnologiya_nanonauka_i_nano_obekty_chno_znachit_nano

- 73.<https://fiz.1september.ru/2008/02/14.htm>
- 74.<http://www-htuni.univer.kharkov.ua/ftf/files/lt5.pdf>
- 75.<http://www.studfiles.ru/preview/3499348/page:2/>
- 76.<http://ppt-online.org/23833>
- 77.<http://www.myshared.ru/slide/774703/>
- 78.<http://binom.vidicor.ru>
- 79.<http://xreferat.com/76/1950-1-ob-emnye-nanostrukturnye-materialy.html>
- 80.<http://dnevniky.ykt.ru/CoolReal/362228?fromC=true>
- 81.e/n/mechanicheskie-svoystva-stali-09g2s-pri-nizkotemperaturnom-otzhige-posle-holodnogo-ravnokanalnogo-uglovogo-pressovaniya
- 82.<http://100-bal.ru/fizika/146979/index.html>
- 83.http://importbearing.ru/Prox_247.aspx
- 84.<http://www.studfiles.ru/preview/2030804/>
- 85.<http://vdome72.ru/Home/ViewArticle/43>
- 86.<http://hi-news.ru/research-development/uchenye-znachitelno-snizili-xrupkost-metallicheskih-stekol.html>
- 87.http://steklo.vsesekreti.net/m_amorfnie-tela.htm
- 88.<http://power-e.ru/543.php>
- 89.http://www.power-e.ru/2009_2_86.php

90.http://steklo.vsesekreti.net/m_amorfnie-tela.htm

91.<http://www.qwrt.ru/news/1350>

92.<http://www.imet.ac.ru/linkpics/News/MolodConf2010.pdf>

93.<http://steeltimes.ru/books/allmet/newmaterialinmetallurgy/125/125.php>