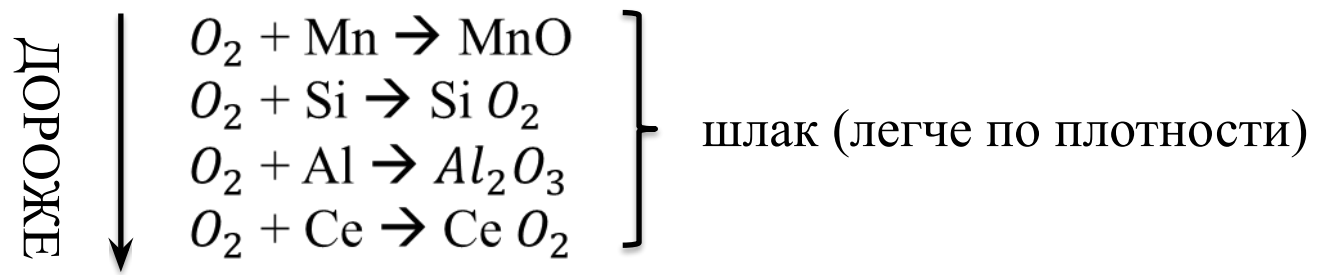
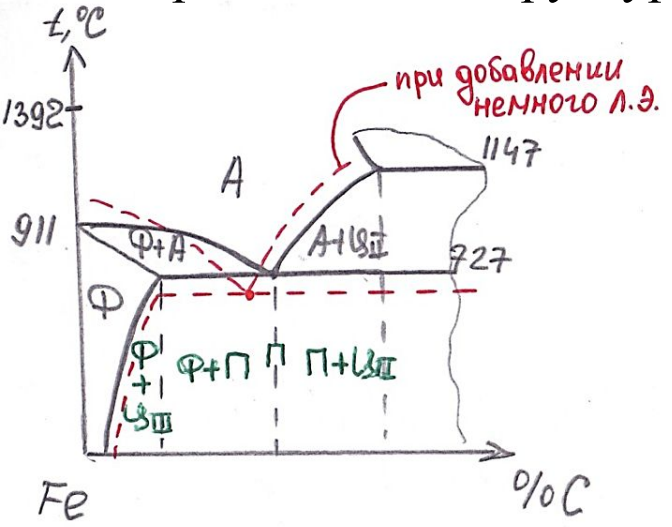


4. По степени раскисления (по количеству вредных газов  $H_2, O_2$  в стали)



- спокойные (сп); хорошо раскисленные Mn, Si, Al      обозначение «сп» обычно не пишут, т.к. это практически все стали, которые используются в технике
- полуспокойные (пс) раскисление Mn, Si
- кипящие (кп) плохо раскисленные Mn

5. По равновесной структуре (после медленного охлаждения)

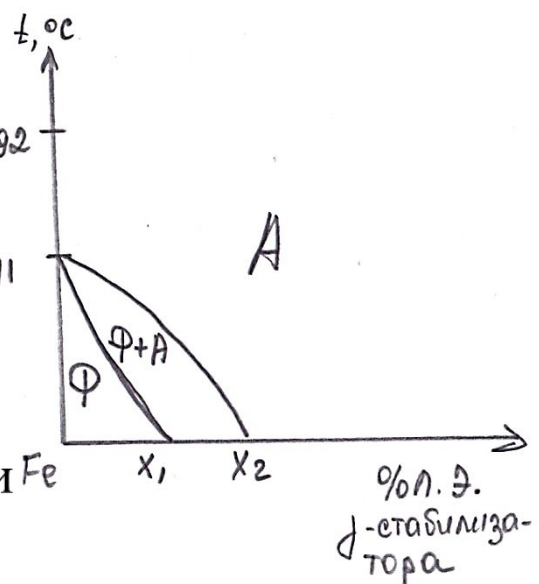


После медленного охлаждения ВСЕ углеродистые стали содержат в своей структуре П, поэтому они классифицируются как стали перлитного класса. При добавлении в стали немного Л.Э. ( $\Sigma \text{Л.Э.} \leq 5\%$ ) критические точки смещаются, однако это не сильно влияет на конечную структуру, поэтому они похожие (там также есть П).

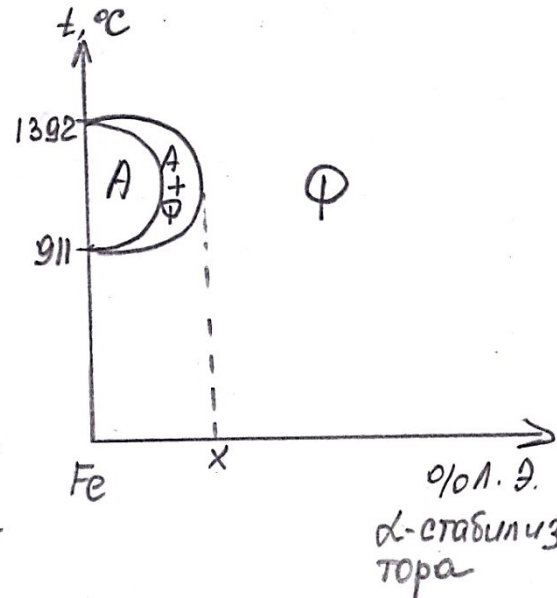
**Вывод:** В сталях перлитного класса при нагреве (охлаждении) есть переход через критические точки  их можно упрочнить Т.О.

Стали легированные ( $\Sigma \text{Л.Э.} > 10\%$ ). Вариантов может быть всего два (т.к. решёток у железа две)

При введении в сталь значительных количеств  $\gamma$ -стабилизаторов ( $> x_2 \%$ ) стали приобретают структуру А при любой температуре и после любой скорости



$\gamma$ -стабилизатора  
 $x_1$  Ni 10% Mn  
 $x_2$  30%



$\alpha$ -стабилизатора  
 $x$  С<sub>2</sub> V Mo Nb W...  
 $\sim 13\%$

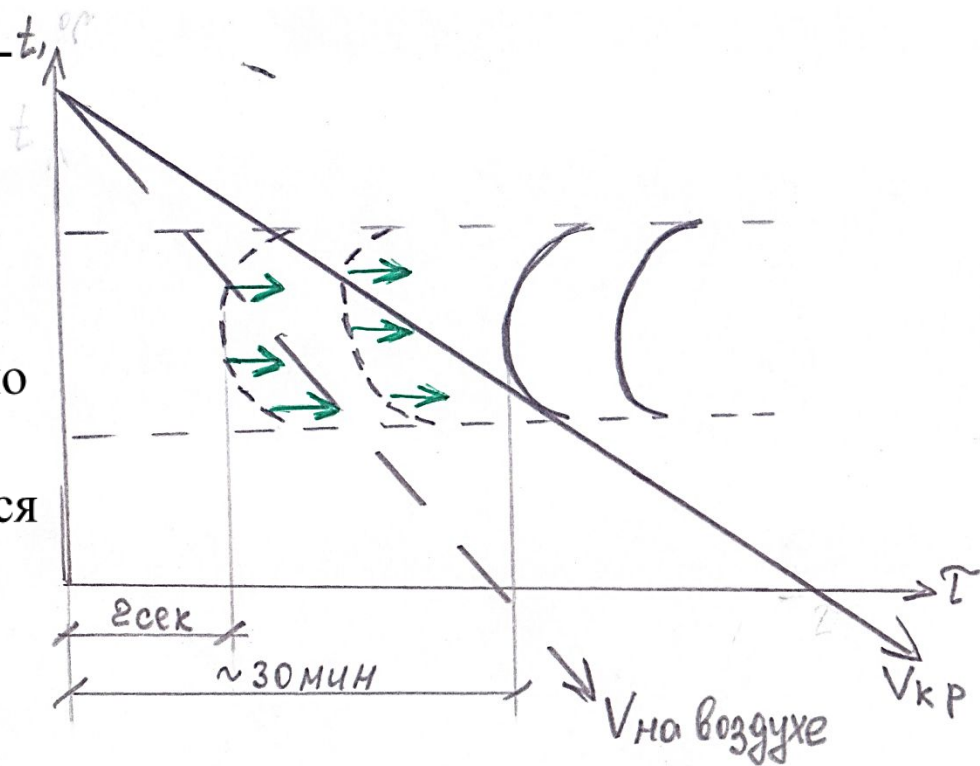
При введении в сталь значительных количеств  $\alpha$ -стабилизаторов ( $> x \%$ ) стали приобретают структуру Ф при любой температуре и после любой скорости охлаждения, поэтому они называют сталями ферритного класса.

**Вывод:** В сталях аустенитного и ферритного класса при нагреве (охлаждении) нет перехода через критические точки  $\square$  их нельзя упрочнить с помощью Т.О.

сталями аустенитного класса.

стали	медленное охлаждение (с печью);	медленное охлаждение (на воздухе);
углеродистые	П	П
низколегированные	П	М
высоколегированные	А Ф	А Ф

Большинство Л.Э. смещают линии «С- $t_c$ » образной» диаграммы ВПРАВО → расширяют область существования аустенита и снижают критическую скорость закали  $v_{кр}$ . Поэтому во многих легированных сталях возможно получить при охлаждении на воздухе структуру – М. Такие стали называются сталями **мартенситного класса**.



Коробление

Закалочные напряжения

Трещины

НЕТ! А  
твёрдость  
есть!

Примечание:

Классификация по равновесной структуре (стали доэвтектоидные, эвтектоидная, заэвтектоидные) называется классификацией по Обергофферу;

Классификация по равновесной структуре (стали перлитные, аустенитные, ферритные, мартенситные) называется классификацией по Гийе;

## § 2. Углеродистые конструкционные стали

### § 2.1. Влияние углерода на свойства сталей

Пример:

Свойства	Fe + 0,4 % C		
	Ф	Отжиг Ф+П	
НВ	80	150	(550) 58 HRC
	~250	~550	~1600
	40	18-20	2
	~2,8 (!)	0,6-0,8	0,1 (по-честному, 0)

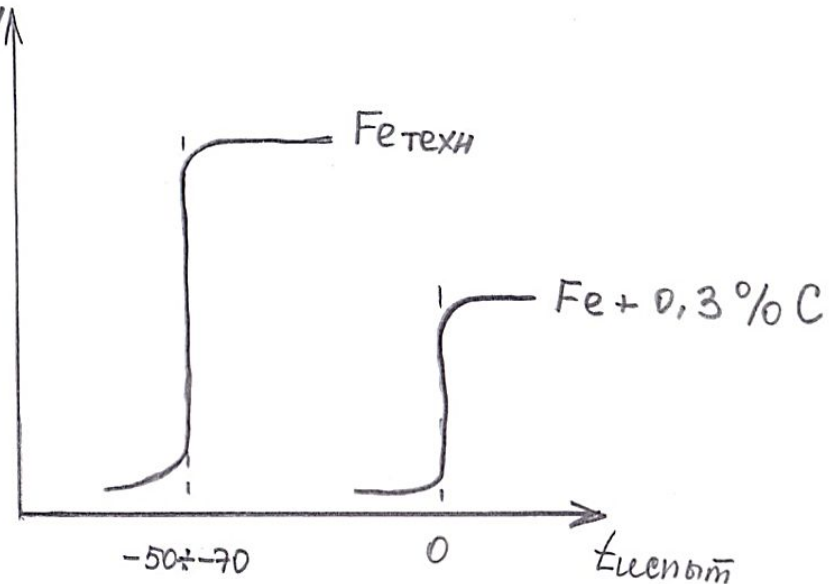
● увеличением углерода в стали:

→ значительно увеличивается прочность (особенно после закалки); «+»

- снижаются показатели  $\delta$  и КСЧ;  $K_{CV}$
  - повышается порог хладноломкости;
- ухудшается надёжность «-»

- хуже свариваются;
- хуже литейные свойства;
- труднее обрабатываются давлением;
- труднее обрабатываются резанием;
- прокаливаются на меньшую глубину;
- при закалке требуются большие  $v_{охл}$  (коробление, трещины);

→ хуже технологичность «-»



□ цена дешевле (!) «+»

(~70 % от всех конструкционных сталей – это стали углеродистые)

## § 2.2. Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества ( $\Sigma S+P < 0,1 \%$ )

марка	% C			Применение
Ст0				это Ст1-Ст4 с пониженной пластичностью («брак», используется на , гвозди и др. )
Ст1	~ 0,06	в среднем 0,06 % C *	~ 330	Выпускаются в виде проката (прутки, уголки и др.); используются для небольших и средних нагрузок, для климатических температур, в самых металлоёмких отраслях промышленности: - строительные (Ст1-Ст4 [кп или пс], арматура и др.) - с/х машиностроение (Ст1-Ст4, рамы и др.) - ж/д транспорт (Ст5-Ст6, рамы, стойки и др.) - ПТМ (Ст5-Ст6, каркасы и др.) Как правило, не подвергаются Т.О.
Ст2	~ 0,12		~ 400	
Ст3	~ 0,18		~ 450	
Ст4	~ 0,24		~ 500	
Ст5	~ 0,30		~ 550	
Ст6	~ 0,45			

← все с низкой прочностью (300-600 МПа)

Маркировка: Б или В Ст одна цифра

← может быть; Б – для поковок; В – для сварки

↘ номер по ГОСТу

## § 2.3. Углеродистые конструкционные качественные стали

$\Sigma S+P < 0,075 \%$

марка			Применение
	после нормализации		
08	320-340	~ 35-40	
10			
15	~ 400-450	~ 25	для Х.Т.О. (цементация) + упрочняющая Т.О. называются <u>цементуемые</u> (для зуб. колёс)
20			
25			
30	~ 500-650	~ 20-13	
35			
40			
45			
50			
55			
60	~ 700-850	~ 12-8	закалка + средний отпуск пружины (марки 60,65), рельсы (марки 70, 75), кованые колёса.
65			
70			
75			

маркировка  
две цифры

(содержание  
углерода в  
сотых долях  
процента  
(40 □  
0,37-0,45 % C  
)).

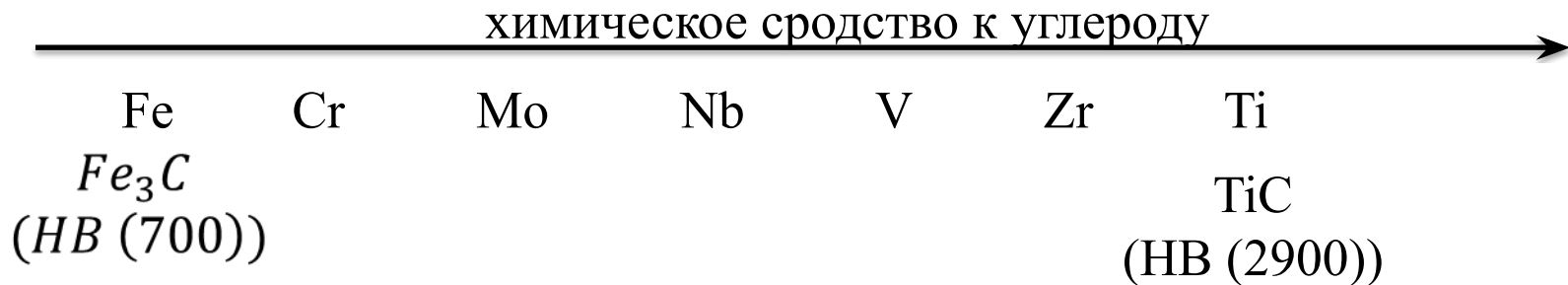


Итог по § 2: углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества и качественные являются дешёвыми, имеют широкий диапазон свойств, однако закаливаются в воде или соляном растворе (следовательно, имеют коробление), имеют небольшую прокаливаемость (до 12 мм); поэтому применяются для некрупных, несложных и неответственных деталей машин.

## § 3. Легированные конструкционные стали

### § 3.1. Влияние легирующих элементов на свойства сталей

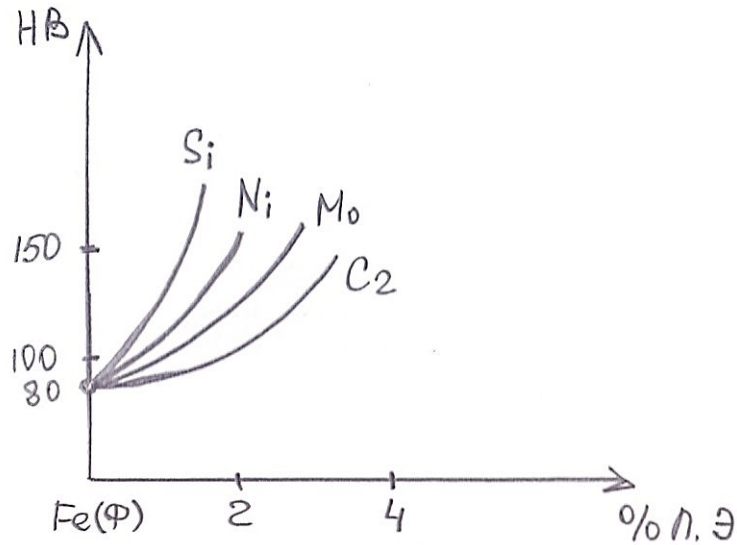
- все легирующие элементы (Л.Э.), кроме Pb и Ag растворяются в решётке Fe (являясь атомами замещения); лучше в  $\alpha$ -Fe, похуже в  $\gamma$ -Fe;
- некоторые Л.Э. являются карбидообразователями, т.е. образуют с углеродом карбидные фазы:



- некоторые Л.Э. друг с другом способны создавать интерметаллиды (например,  $Ni_3Ti$ ,  $Fe_2Mo$  (фаза Лавеса));

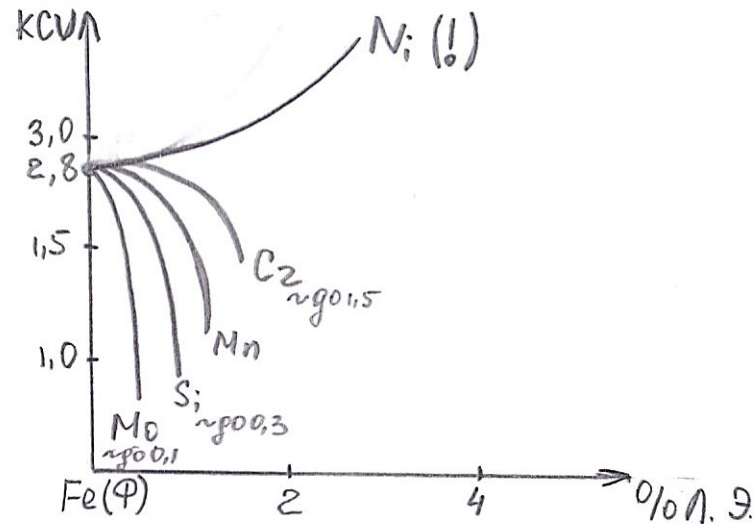


□ все Л.Э. при растворении в Fe способствуют повышению его твёрдости

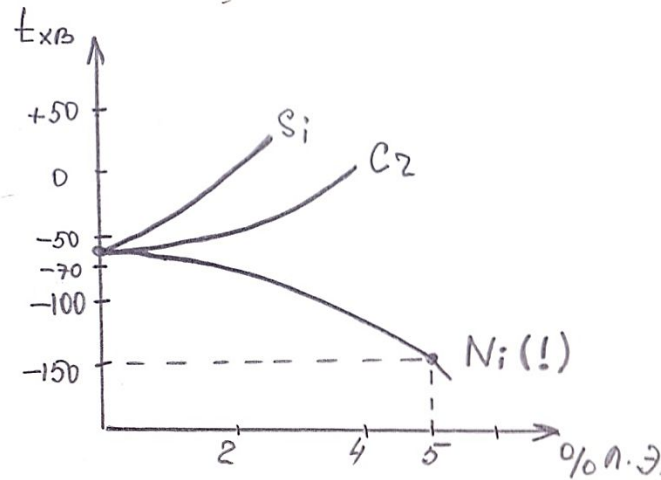


примечание: Л.Э. не добавляют, чтобы увеличить твёрдость стали, проще добавить десятые доли углерода

□ все Л.Э., кроме Ni и Cr (до 1,5 %) снижают ударную вязкость, а значит ухудшают надёжность

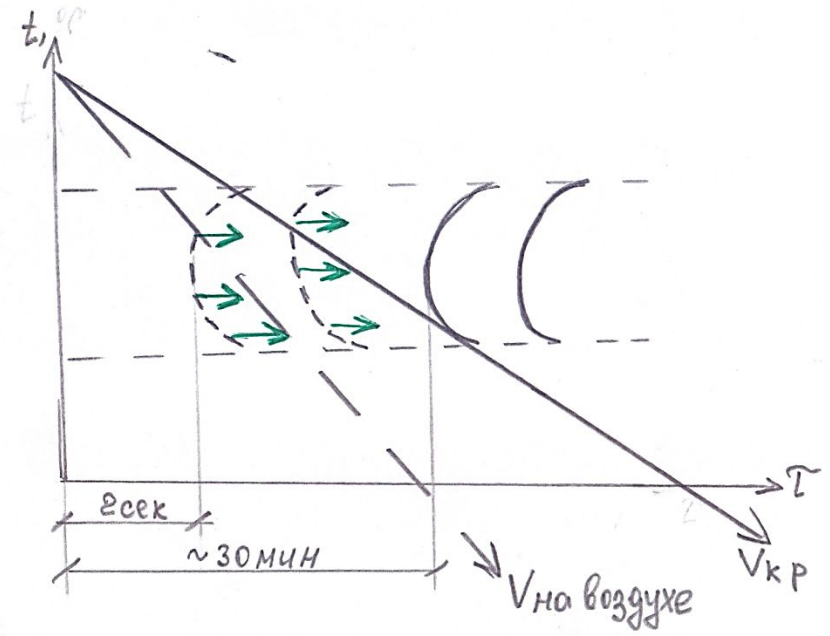


□ все Л.Э., кроме Ni повышают порог хладноломкости



□ все Л.Э., кроме Co, смещают линии «С-образной» диаграммы вправо, поэтому все легированные стали закачиваются в масле (уменьшение коробления и возникновения трещин), а некоторые и на воздухе.

сильнее всего смещают Ni, Cr, а ещё сильнее комбинация Ni+Cr (!)

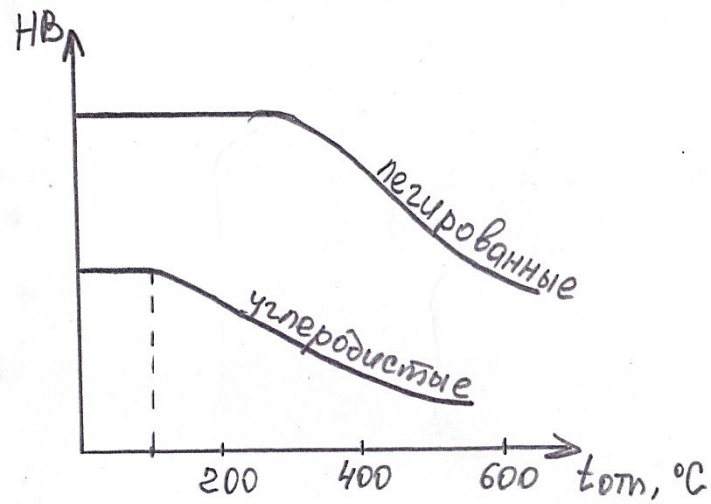


□ некоторые Л.Э. затрудняют рост зёрен

добавление 0,01-0,03 % карбидообразующих элементов (Mo, W, V, Nb, Zr, Ti) делают сталь природно мелкозернистой

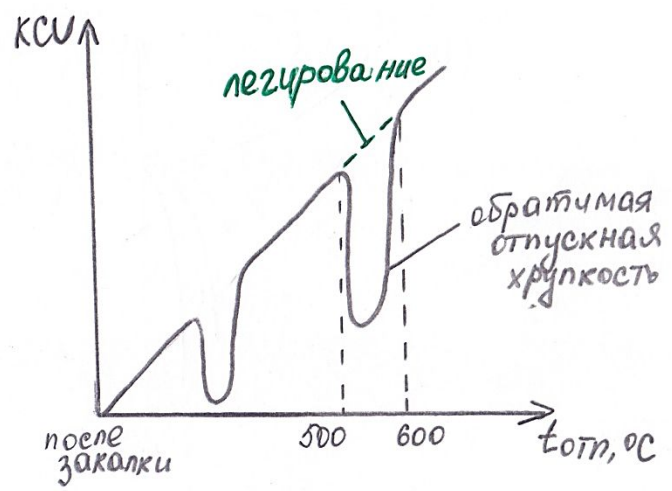
□ некоторые Л.Э. затрудняют распад мартенсита при отпуске

особенно сильно Si, Mo, W  
можно, сохраняя твёрдость, полнее  
снять закалочные напряжения



□ некоторые Л.Э. устраняют обратимую отпускную хрупкость

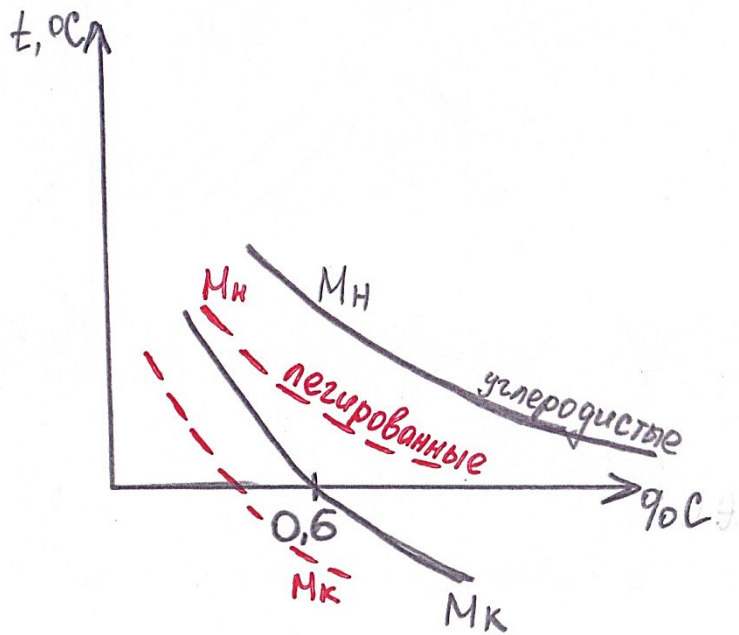
добавка ~ 0,3 % W или Mo



→ все Л.Э. снижают критические точки  $M_H$  и  $M_K$ , что может привести к сохранению  $A_{ост}$

Ni уменьшает критические точки  $M_H$  и  $M_K$  на 40 °C / на 1 % Ni.

добавление Ni хорошо для надёжности и прокаливаемости, но нужно быть осторожным !



Итоги: - легированные стали дороже, но при правильном выборе легирующих элементов такие стали всегда прочнее, надёжнее (!) и технологичнее.

- обычное количество Л.Э.:

	Ni	Si	Mn	W и Mo	Cr	Ti, Nb, V
стали обычного назначения				~ 0,3 %	~ 1,5-2 %	~ 0,01-0,03 %
специальные стали	до 20 %	до 3 %	до 13 %	W до 18% Mo до 14 %	до 28 %	сверх 3 %

- маркировка легированных сталей

две цифры

↓  
среднее  
содержание  
углерода в сотых  
долях  
37, 20, 18, ...

буквы+цифры

↓  
Л.Э. и их количество в целых  
процентах;  
если Л.Э.  $\leq 1-1,5\%$ , то цифра не  
ставится.

Cr – X, Ni – H, Mo – M, Mn – Г,  
Ti – Т, Co – К, Si – С, W – В, V – Ф,  
Al – Ю, Nb – Б, В – Р, ...

↓  
показатель качества:  
качественная - \_\_\_\_\_  
высококачественная - А  
особовысококачественная -  
ВДП, ЭШП, ЭЛП

Пример, сталь 40ХН2МА:

- 0,4 % С;
- Cr до 1 %;
- Ni до 2 %;
- Mo до 1 %;
- высококачественная

*самое главное – уметь прочесть сталь !*

## § 3.2. Низколегированные стали нормальной и повышенной прочности

ΣЛ.Э. ≤ 5 (6) % - 1 (2 или 3) элемента

нормальная прочность

$$\sigma_B < 1000 \text{ МПа}$$

$$\% \text{ C} \cong 0,1 - 0,25$$

прокаливаемость

15X – до 20 мм

18ХГТ – до 60 мм

25ХГМ- до 60 мм

20ХН3А – до 100 мм

38Х2Н4МА – >100 мм + М класс

...

→ для деталей, работающих на трение+удар (зуб. колёса, поршневые кольца, кулачки и др.)  
цементация+упрочняющая Т.О.



цементуемые

повышенная прочность

$$\sigma_B \approx 1000 - 1500 \text{ МПа}$$

$$\% \text{ C} \cong 0,3 - 0,5$$

прокаливаемость

40X – до 20-25 мм

30ХГСА – до 40 мм

40ХН2МА – до 100 мм

38ХН3МА – >100 мм + М класс

38Х2МЮА – до 70 мм

...

→ для деталей, работающих при статических, циклических и небольших ударных нагрузках (валы, оси и др.)

Закалка+высокий отпуск



улучшаемые ( $C_{отп}$ )

➔ для деталей, работающих без трения  
(статические+ударные нагрузки)

закалка+низкий отпуск ( $M_{отп}$ )  
 $\sigma_B \sim 700 - 1000$  МПа;  
 $\delta \sim 10 - 12$  %;  
 $KCU \sim 0,6-1,0$  МДж/м<sup>2</sup>

$\sigma_B \sim 1000 - 1200$  МПа;  
 $\delta \sim 10 - 12$  %;  
 $KCU \sim 0,6-0,8$  МДж/м<sup>2</sup>

➔ улучшение+азотирование  
необходимо брать стали без Ni  
(типа 38X2MЮА)

Итоги: 1) по марке низколегированной стали можно выявить следующую дополнительную информацию:

- по содержанию углерода: - уровень прочности;
  - типичную Т.О.;
  - типичное применение;
- по подбору Л.Э.: - уровень прокаливаемости;
  - температуру эксплуатации (с Ni – пониженные, с Mo, W, V – немного повышенные);
  - цену (с Ni – дорого);
- по показателю качества: - уровень надёжности;
  - цену;



## Сталь 35ХМА:

повышенной прочности; типичное Т.О. – улучшение; типичное применение – валы, оси и др.; прокаливаемость – до 40-50 мм; можно использовать при незначительно повышенных температурах; высококачественная; относительно дорогая (нет Ni).

*Что видно в марке стали?*

ВСЁ !

- инженерный взгляд на марку стали

2) низколегированные стали нормальной и повышенной прочности закаливаются в масле, а некоторые на воздухе, имеют глубокую прокаливаемость; поэтому применяются для средних и умеренных (больше средних) нагрузок для сложных, ответственных изделий разного сечения (в том числе и массивных)

*Авто сделаем, трактор сделаем, а шасси на аэробус или ИЛ96, а броню, а корпус подводной лодки, а сосуды для сжиженных газов сделаем? – Нет!*

### § 3.3. Высокопрочные конструкционные легированные стали

$$\sigma_B \geq 1500 \text{ МПа};$$

$$\delta \sim 10 - 12 \%; \quad \square \text{главное}$$

$$K_{CU} \geq 0,2 \text{ МДж/м}^2 \quad \square \text{удержать}$$

$$K_{1c} \geq 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} \quad \square \text{надёжность} \quad \text{Пути два.}$$

Путь № 1 – комплексное легирование

0,35-0,4 % С + Л.Э.  $\geq 4$  (5, 6 лучше) штук + особо чистая выплавка

$\sigma_B \geq 1500 \text{ МПа}$   
при структуре М

$$\text{Ni} \geq 2-3 \%;$$

Si }  $\square$  удержать распад

Mo } мартенсита при

W } отпуске;

V }  $\square$  удержать мелкое

Nb } зерно;

B }  $\square$  очистить границы

высококачественная

А

Например, 40ХН2СВА }  
40ХН5МФА } Закалка в масле (на воздухе) + низкий отпуск 250-350 °С

$$\sigma_B \geq 1850 - 2000 \text{ МПа}; \delta \sim 11 - 13 \%; K_{CU} \sim 0,5 \text{ МДж/м}^2; K_{1c} \geq 50 - 60 \text{ (нижний предел) МПа}\sqrt{\text{м}}$$

Путь № 2 – мартенсито-стареющие стали

Идея:  углерод исключить (8 «-»);

Ni max (10-20 %);

для создания высокой прочности использовать Mo, Ti и Al, которые имеют разную растворимость в  $\gamma$ -Fe и  $\alpha$ -Fe («как бы искусственно созданная переменная растворимость»)

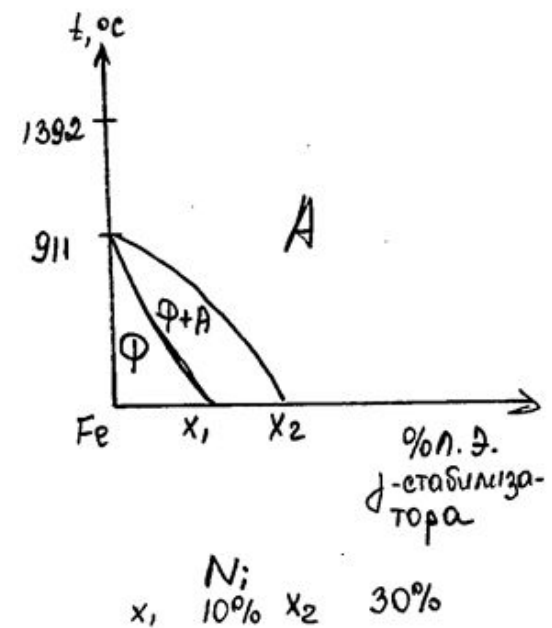
Т.О.: закалка + старение

- при закалке 820-850 °C (воздух) при нагреве в аустените растворяются все Л.Э., а после охлаждения получается мартенсит – пересыщенный твёрдый раствор замещения (!)

обработка давлением, резание  $\left\{ \begin{array}{l} \sigma_B \sim 1000 \text{ МПа}; \\ \delta \sim 10 - 25 \% ; \\ \psi \approx 70 \% (!) \end{array} \right.$

- при старении (500-550 °C, 2-6 часов) из мартенсита выделяются дисперсные частицы  $Ni_3Ti$ ,  $Ni_3Al$ ,  $Fe_2Mo$  (фаза Лавеса)

$\sigma_B \sim$  от 1500 до 3000 МПа



Сталь 03Н18К9М5Т  $\sigma_B \approx 2000$  МПа;

$\delta \sim 10 - 13$  %;

КСУ  $\sim 0,5$  МДж/м<sup>2</sup>, КСV  $\sim 0,3$  МДж/м<sup>2</sup>, КСТ  $\sim 0,2$  МДж/м<sup>2</sup> (!)

$K_{1c} \approx 100 - 150$  МПа $\sqrt{м}$

- углерода очень мало (может и не быть 00 – супер очистка от углерода);

- очень много Ni;

- много элементов

упрочнителей;

- всегда ВДП (никто не пишет)

Итоги: мартенсито-стареющие стали:

а) при очень высокой прочности исключительно надёжны; не чувствительны к концентраторам; не имеют хладноломкости;

б) исключительно технологичны: хорошо обрабатываются механически; закаливаются на воздухе; имеют неограниченную прокаливаемость ( $> 500$  мм); не имеют коробления и не изменяют размеры;

в) исключительно дорогие (как Ti сплавы);

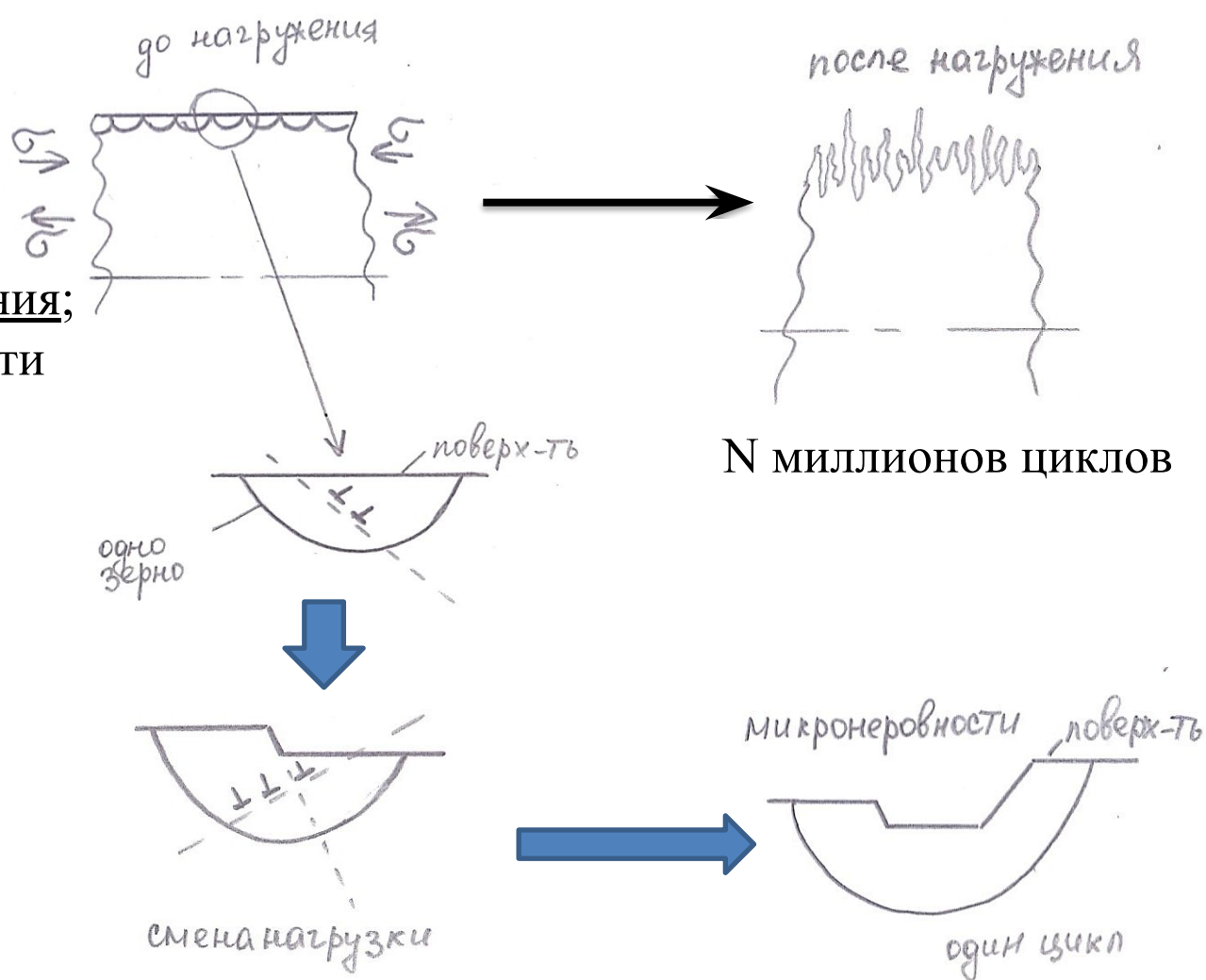
г) применяются для силовых высокоточных тяжелонагруженных изделий сложной формы и ответственного назначения (спецболты для космонавтики, корпуса подводных лодок, гребные винты подводных лодок, сосуды для сжиженных газов).

## § 3.4. Стали для циклического нагружения и методы их обработки

Анализ явления усталости (более детальный)

### 1. Особенности работы детали при циклическом нагружении

- появление трещины
- при циклическом нагружении детали дислокации «скользят» в сторону поверхности в разных системах скольжения; в результате на поверхности формируются микронеровности, самые глубокие из которых становятся зародышами трещин.
- чтобы трещины не возникали, необходимо «заблокировать» все дислокации, т.е. материал должен быть прочным.



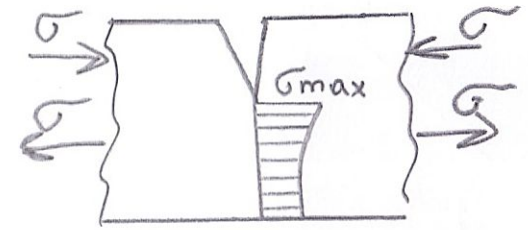
□ распространение трещин

- чтобы трещина не распространялась, материал должен быть пластичным; тогда в вершине трещины пройдёт ПД, трещина затупится и дальше не пойдёт

Парадокс № 2:

Материал выносив к циклическому нагружению тогда, когда он одновременно и прочен и пластичен !

*Найдутся ли такие материалы ?* - Конечно, найдутся.

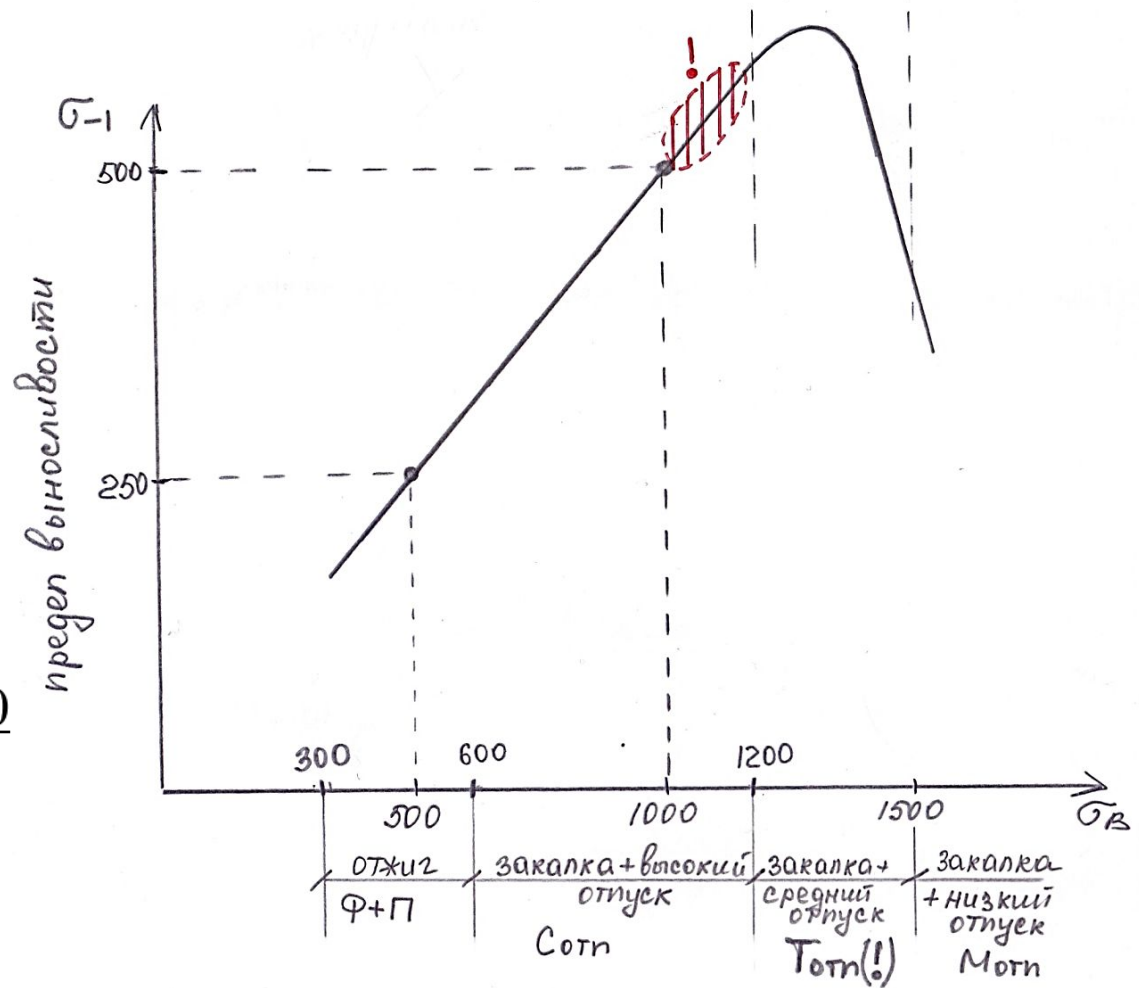


$$\sigma_{max} \sim 2\sigma_{сред} \sqrt{\frac{l}{r}}$$

## 2. Требования к структуре и свойствам сталей для циклического нагружения

### Итоги:

- максимальную выносливость стали имеют при  $\sigma_B = 1200-1500$  МПа и структуре  $T_{отп}$ , однако такую структуру можно использовать только для пружин, где min ударные нагрузки;
- для циклического нагружения нельзя использовать стали с  $\sigma_B > 1500$  МПа со структурой  $M_{отп}$ , т.к. малейшая трещина будет легко распространяться;
- для деталей машин, работающих при циклических нагрузках целесообразно применять стали после улучшения ( $S_{отп}$ ), особенно хорошо – стали при прочности  $\sigma_B = 1000-1200$  МПа





### 3. Используемые стали и методы их обработки

□ типичные детали: валы, оси и др. (циклические+ударные нагрузки);

□ типичные стали: улучшаемые

←  
углеродистые  
30,35,40,45

(«-»): закалка в воде – коробление;  
маленькая прокаливаемость)

→  
легированные

40X (до 25 мм)

40ХН (до 40 мм)

40ХН2МА (до 100 мм+без отпускной  
обратимой хрупкости (есть Mo))

→ типичная Т.О.: улучшение (закалка [ $A_{c3} + 30 - 50^{\circ}\text{C}$ , вода или масло] +  
высокий отпуск 500-600 °C)

→ структура:  $S_{отп}$ ;

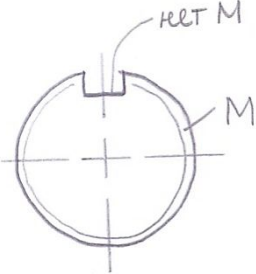
→  $\sigma_{-1} \approx 0,5 \cdot \sigma_B$

→ для повешения долговечности необходимо затруднить зарождение трещин!

→ дополнительные меры: - убрать лишние концентраторы;  
- при механической обработке сделать min  
шероховатость;

как сделать сразу?

{ - дополнительно упрочнить поверхность;  
- на поверхности создать остаточные напряжения  
сжатия.

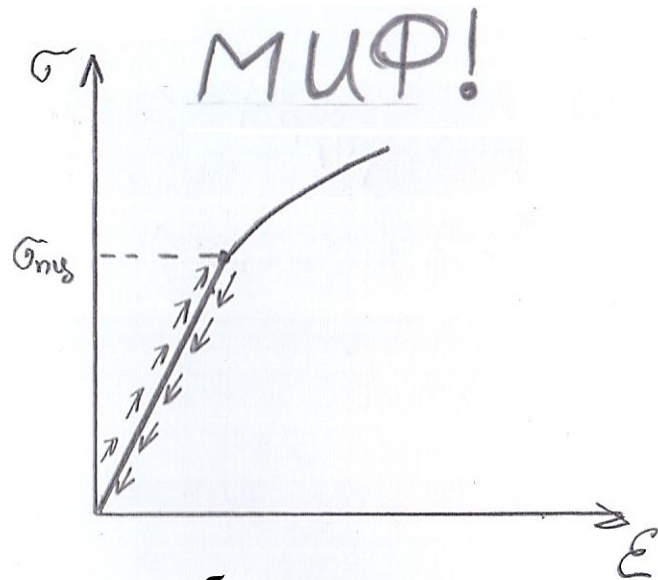
метод	результат	примечание
закалка ТВЧ		ограничение: валы со сложной геометрией 
поверхностная пластическая деформация (ППД): - обдувка дробью; - обкатка роликами		
ТВЧ+ППД		
азотирование		самые ответственные и сложные детали

**Итог:** такая дополнительная обработка увеличивает цену, однако долговечность возрастает в 1,5-2 (иногда в 3) раза, такая обработка «как бы нейтрализует вред от концентраторов».

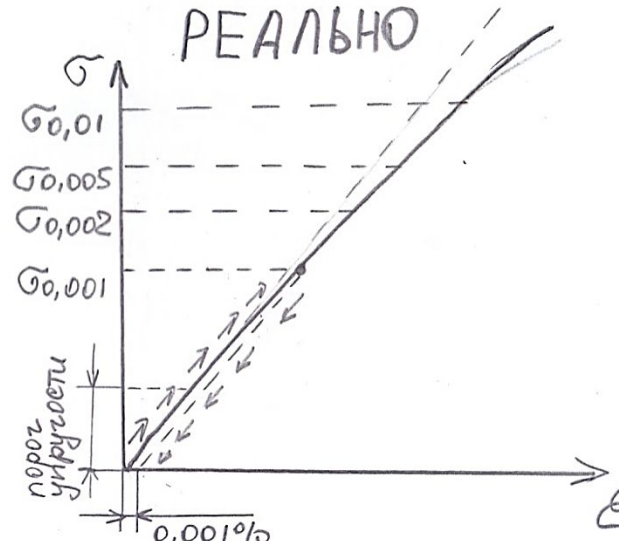
## § 4. Конструкционные материалы с высокими упругими свойствами (пружинные материалы)

### § 4.1. Требования к структуре и свойствам пружинных материалов

- Пружина должна восстановить форму и размеры после нагружения и разгрузки



грубая регистрация  
(десятые доли процента)

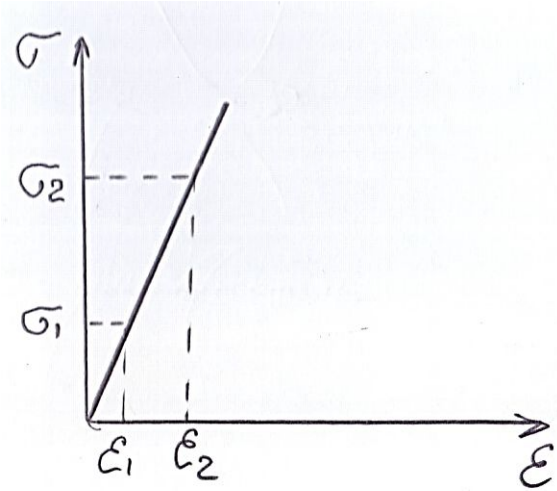


точная регистрация  
(тысячные доли процента)

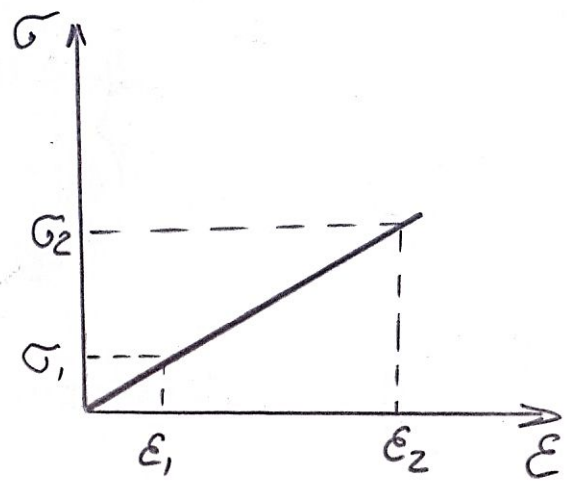
$\sigma_{0,01}, \sigma_{0,005}, \sigma_{0,002}, \sigma_{0,001}$   
- условные пределы упругости с допуском на остаточную деформацию.

Пружина может восстановить форму и размеры только в пределах заранее оговорённого допуска на остаточную деформацию.

□ Пружина должна обеспечивать определённую деформацию при определённых нагрузках



при большой разнице в нагрузках должна быть небольшая разница в деформациях  
 силовые пружины  
 высокий E



при небольшой разнице в нагрузках должна быть ощутимая разница в деформациях  
 измерительные пружины (для УЧЭ – упруго-чувствительных элементов)  
 низкий E

→ большинство силовых пружин должны работать при циклическом нагружении

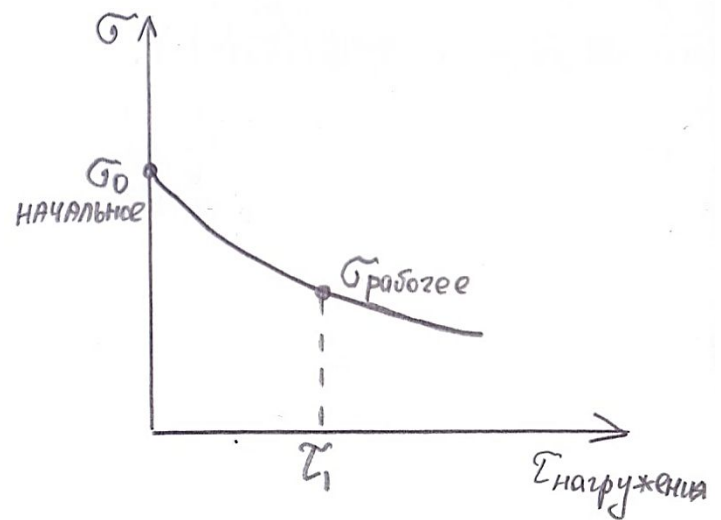
$$\sigma_{\text{раб}} < \begin{cases} \sigma_R \\ \sigma_R^N \end{cases}$$

□ при работе пружин необходимо предельно уменьшить все неупругие дефекты

Релаксация напряжений (Р.Н.) –

$$P. N. \tau_1 = \frac{\sigma_0 - \sigma_{раб}}{\sigma_0} * 100 \%$$

определяет просаживаемость пружины



Итоги:

пружинные материалы		
силовые пружины (рессоры, подвески, амортизаторы)	измерительные пружины (для УЧЭ – датчики и др.)	
высокий	модуль упругости E	низкий
просаживаемость до 5-10 %	Р.Н.	просаживаемость < 5 % (реально 2 %)
иногда: коррозионная стойкость, теплостойкость	дополнительные требования	всегда коррозионная стойкость; как правило: немагнитность, электропроводность

Для упругой деформации пружины необходимо при нагружении исключить любые перемещения дефектов (!), поэтому главное требование к структуре любого пружинного материала – максимальное закрепление дефектов.

Как закрепить? - Смотря какой материал.

## § 4.2. Пружинные материалы общего назначения

т.е., материалы для силовых пружин.

E – высокий □ материалы – стали ( $E = 210\,000$  МПа)

типичные стали:

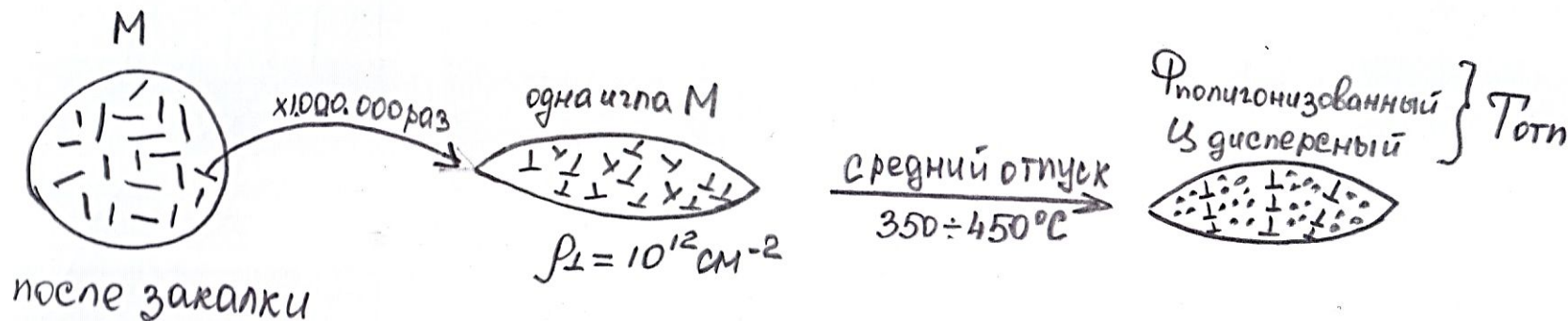
- повышенное количество углерода;
- очень небольшое легирование;
- нет Ni

углеродистые (прокаливаемость до 10-12 мм)  
60, 65, 70, 60Г, 65Г, 70Г,...

легированные  
60С2 (до 18 мм),  
60С2ХА, 50ХФА, 55СГФ (до 50-80 мм)

типичная Т.О.: навивка пружины + закалка ( $A_{c3} + 30 - 50$  °С, вода или масло, в специальном приспособлении) + средний отпуск (350 - 450 °С)

структура:  $T_{отп}$



преимущества  $T_{отп}$ : - двойная блокировка дефектов;

- самая большая выносливость к циклическим нагрузкам  
(для стали 60  $\sigma_{0,01} \cong 600$  МПа; для стали 60С2ХА  $\sigma_{0,01} \cong 900 \div 1100$  МПа [для  
рессор ж/д вагонов])

дополнительные меры упрочнения: - обдувка дробью (повышает выносливость);  
- заневоливание (небольшой перегруз при  
нагреве; слабо закреплённые дефекты могут встать в необходимое место).

### § 4.3. Пружинные материалы специального назначения

т.е. материалы для пружин УЧЭ

низкий E

коррозионная стойкость

электропроводность

немагнитность



Медные сплавы ( $E_{Cu} \cong 125000$  МПа)

два варианта блокировки дефектов

1-ый вариант латуни Cu+Zn

бронзы Cu+Sn, Cu+Si

твёрдые растворы замещения ( $\sigma_B$  низкая, а  $\delta$  высокая)  $\rightarrow$  сильная  
деформация (50-70 %) + дорекристаллизационный отжиг (250 - 280  
°C )

$\sigma_{0,005} \cong 600$  МПа



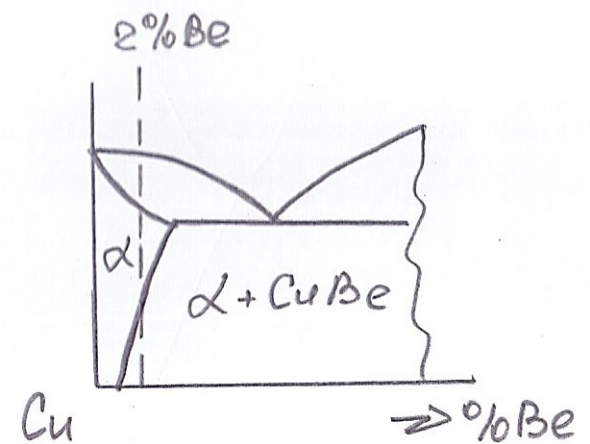
## 2-ой вариант бериллиевые бронзы Cu+Be

а) изготовление пружины → закалка (770 °С, вода) + старение (320 °С, 4-6 часов)

$$\sigma_{0,002} \cong 600 \text{ МПа}$$

б) закалка (770 °С, вода) + деформация (~30 %) + старение (320 °С, 4-6 часов)

$$\sigma_{0,002} \cong 800 \div 900 \text{ МПа}$$



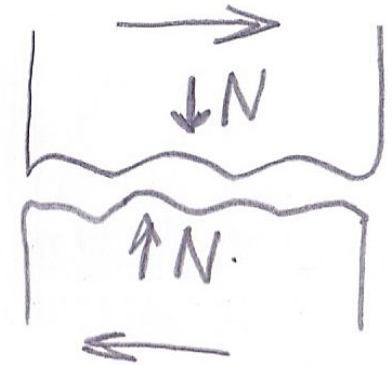
# III глава «Износостойкие материалы»

~ 80 % всех выходов из строя деталей – в узлах трения из-за износа.

## § 1. Работа металла в зоне трения и пути повышения износостойкости

«зона трения» - трущиеся поверхности деталей контактируют по микронеровностям; в зоне трения:

- большие контактные давления;
- деформация на сдвиг;
- локальный разогрев в микрообъёмах до  $t_{\text{плавл}}$ ;
- зажимание смазки в микрообъёмах;
- отдельные ситуации: пыль, вакуум, коррозия, циклические нагружения, удар и др.



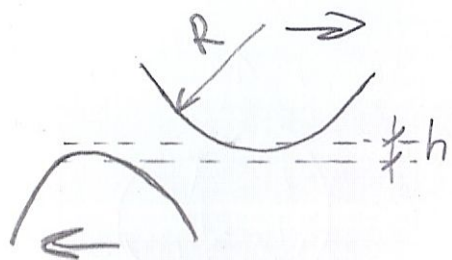
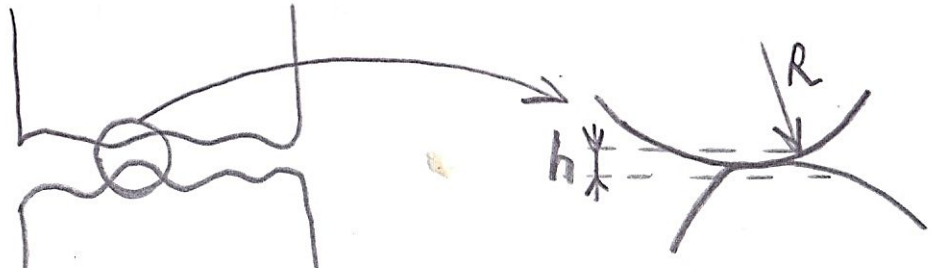
$$F_{\text{тр}} = N \cdot f_{\text{тр}}$$

При выборе материала для пары трения необходимо определить преобладающий процесс:

- А) механическое изнашивание (деформация микронеровностей, которые входят в зацепление);
- Б) молекулярно-механическое изнашивание (адгезия (или схватывание, «как бы сварка» трущихся поверхностей)

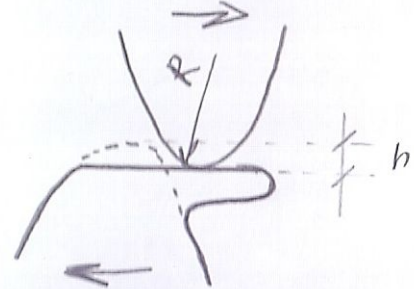
А. механическое изнашивание

$R$  – радиус микронеровности;  
 $h$  – зацепление микронеровностей;



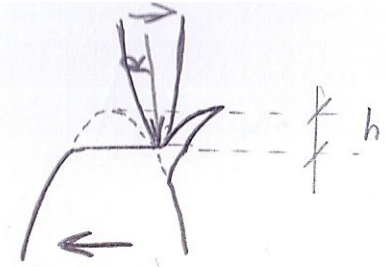
„отпружинивание неровностей“

$R$  – большое;  $h$  – мало;  
 в зоне контакта  
упругая деформация □  
 износа нет



„смятие неровности“

$R$  – меньше;  $h$  –  
 больше;  
 в зоне контакта – ПД,  
 т.е. наклёп □  
 выкрашивание



„резка неровности“

$R$  – маленькое;  $h$  – большое;  
 в зоне контакта –  
микрорезание (абразивными  
 частицами) □  
 катастрофический износ

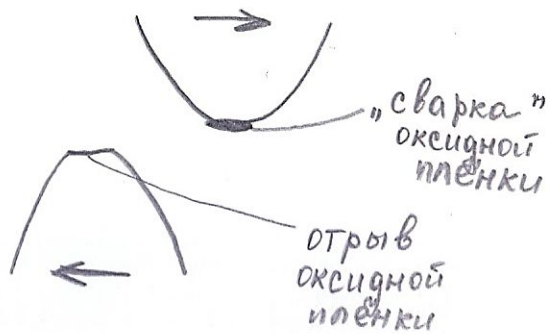
Итоги: если в зоне трения преобладает механическое изнашивание, то:

- 1) металл сопротивляется деформации микронеровностей, что даёт коэффициент трения деформационной природы  $f_{тр(дефор)}$ ;
- 2) интенсивность изнашивания пропорциональна соотношению  $h/R$ , следовательно она прямо зависит от шероховатости;

3) чтобы противостоять механическому изнашиванию, необходимо сделать:

- предельно уменьшить шероховатость;
- создать на поверхности высокую твёрдость, способную сохраняться при нагреве (карбиды, нитриды,...).

### Б. Молекулярно-механическое изнашивание



схватывание и вырывание фрагментов оксидной плёнки □  
износ небольшой;  
называется процесс  
«окислительное изнашивание»



схватывание чистых, т.е. ювенильных (нет оксидной плёнки) поверхностей и вырывание значительных микрообъёмов менее прочного металла □  
катастрофический износ называется процесс «схватывание» (или заедание, задир, нарост)