

II часть «Материалы, применяемые в машиностроении»

6 глав

Глава I «Конструкционная прочность материалов»

Глава II «Стали, обеспечивающие жесткость, статическую и циклическую прочность»

Глава III «Материалы с особыми технологическими свойствами»

Глава IV «Материалы малой плотности»

Глава V «Материалы, устойчивые к воздействию повышенной температуры и рабочей среды»

Глава VI «Материалы с высокой удельной прочностью»

19 часов = 9,5 лекций ~ 6 недель □ модуль-экзамен

Глава I «Конструкционная прочность материалов»

Конструкционная прочность (КП) – комплексная характеристика, включающая в себя несколько критериев и показывающая способность материала работать надёжно и долго в конкретных условиях эксплуатации.



§ 1. Критерии работоспособности материала в детали при конкретных условиях эксплуатации

Для повторения некоторых механических свойств смотри часть I главу III «Формирование структуры при ПД» § 2+3

предел текучести σ_T

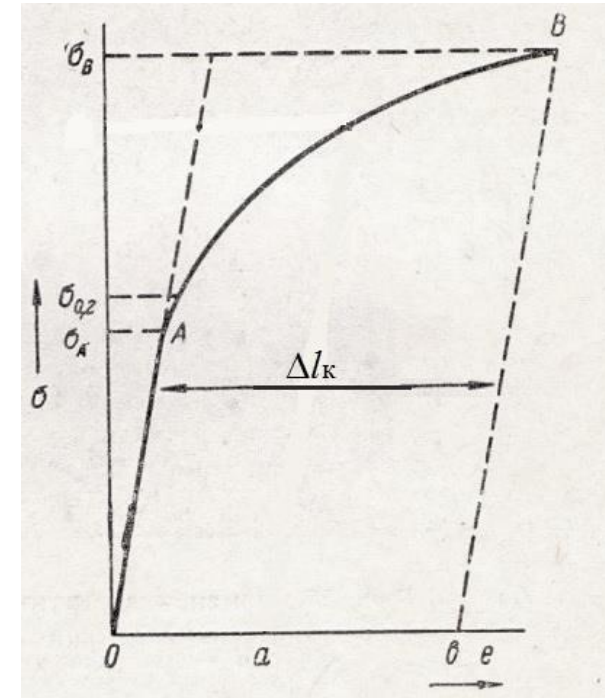
предел прочности σ_B

предел пропорциональности (переход от упругой деформации к пластической) σ_A (пр)

модуль упругости $E = \sigma/e$

предел упругости (max величина механического напряжения, при которой деформация данного материала остаётся упругой, то есть полностью исчезает после снятия нагрузки) $\sigma_{0,01}, \sigma_{0,005}, \sigma_{0,002}$

+ плотность ρ



P.S. 1) обозначение σ_B - что выступает в виде критерия оценки

2) рассмотрение (оценка) критериев возможна только для конкретных примеров

● Пример 1. Деталь нагружена $\sigma_{\text{раб}}$

$$\sigma_{\text{раб}} < \sigma_{0,2}$$

$\sigma_{\text{раб}} < \sigma_{A(\text{пц})}$ - у очень осторожных конструкторов

Пример 2. Деталь нагружена $\sigma_{\text{раб}}$ и образует опорную поверхность
высокоточного изделия

станина станка

$$E \rightarrow \max \quad \rho \rightarrow \max$$

из чугуна

платформа гироскопа

$$E \rightarrow \max \quad \rho \rightarrow \min$$

из Ве

Пример 3. Деталь нагружена $\sigma_{\text{раб}}$ и является пружиной

силовая пружина, рессора

$$E \rightarrow \max \quad \sigma_{\text{раб}} < \sigma_{0,01}$$

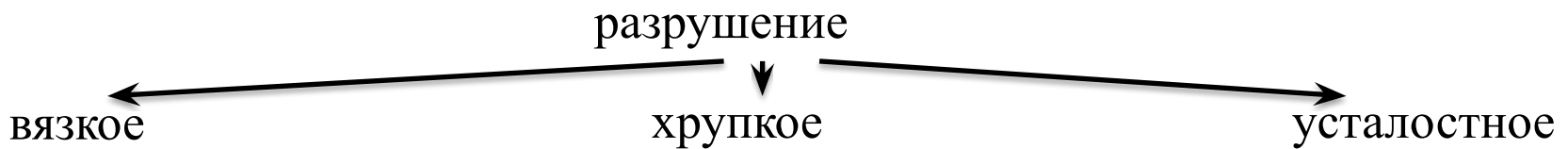
измерительная пружина

$$E \rightarrow \min \quad \sigma_{\text{раб}} < \sigma_{0,002}$$

Итог: Критерии, по которым оценивается работоспособность материала в детали
различные: по допустимым нагрузкам, по жёсткости материала (допустимым
деформациям) и по его плотности.

§ 2. Критерии надёжности материала в детали при конкретных условиях эксплуатации

Надёжность материала – это свойство материала противостоять внезапному разрушению при напряжениях ниже расчётных и при аварийных ситуациях.



может оказаться внезапным;
материал надёжен только тогда, когда
он не склонен к хрупкому
разрушению;
необходимо рассмотреть ситуации,
когда склонность к хрупкому
разрушению возрастает

Пример 1. Использование высокопрочных материалов.

Если материал высокопрочен, значит его пластичность понижена

относительное удлинение после разрыва δ

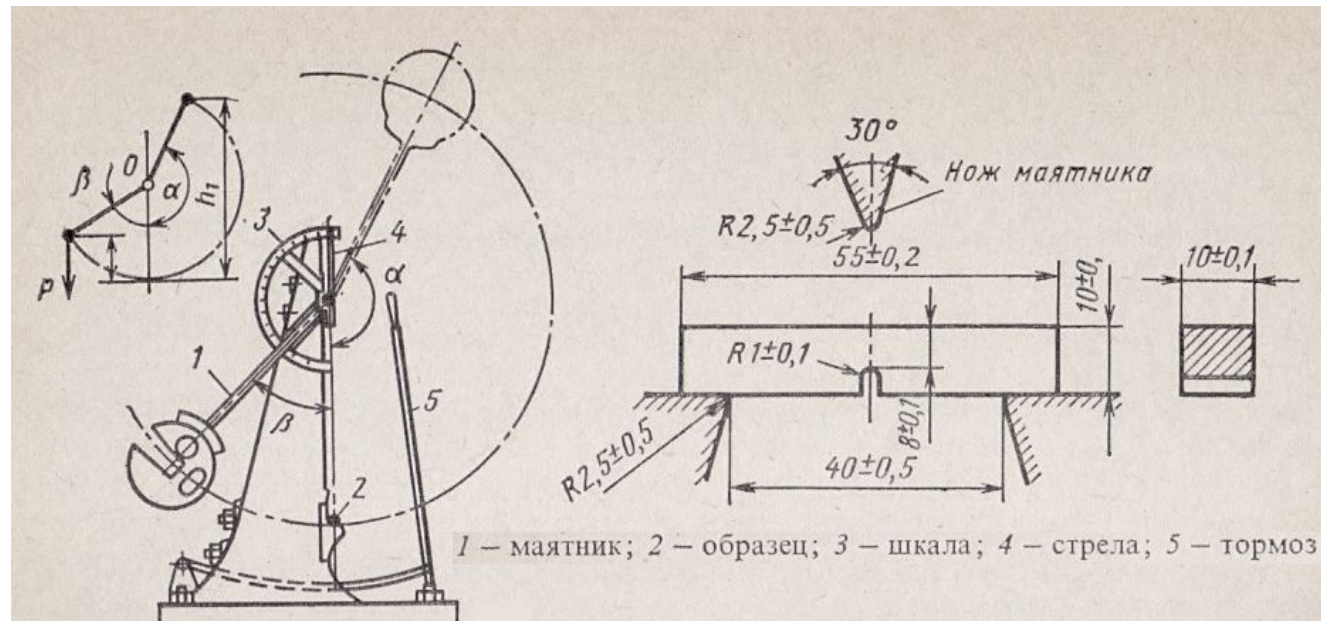
относительное сужение ψ

Чем выше δ и ψ , тем материал надёжнее

Пример 2. Материал работает при динамических (ударных) нагрузках.

$$KCU (KCV) = \frac{A}{F}$$

A - работа на зарождение и распространение трещины; F – площадь сечения около концентратора.



концентратор напряжений в форме буквы U ($r=1 \pm 0,007$ мм) или в форме буквы V ($r=0,25 \pm 0,025$ мм)

Чем выше ударная вязкость KCU или KCV, тем материал надёжнее (очень надёжно, если $KCU = KCV$)

Пример 3. Работа материала при пониженных температурах

Материал при понижении температуры меняет характер разрушения с вязкого на хрупкий. Такое явление называется хладноломкостью. (т.е. сталь работает на холоде хорошо, а если ударим...)

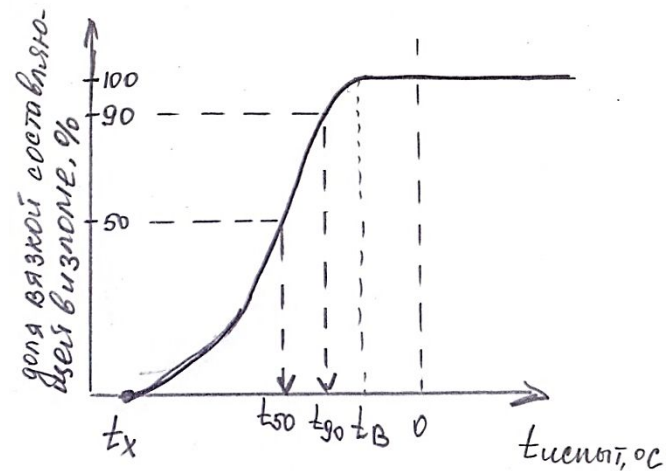
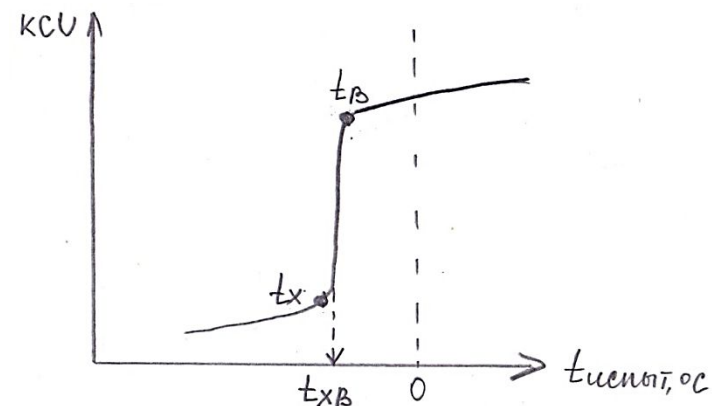
$t_{ХВ}$ - порог хладноломкости
для сталей простого состава

t_{50} - порог хладноломкости, температура, при которой в изломе 50 % хрупкой составляющей;
ответственные детали

t_{90} - порог хладноломкости, температура, при которой в изломе 10 % хрупкой составляющей;
для авиации

для сталей сложного состава

Материал надёжен, если $t_{ЭКСПЛ} > (t_{ХВ}, t_{50В}, t_{90})$. И чем разница больше, тем надёжнее.



Пример 4. Работа материала при наличии в нём трещин и трещиноподобных (скопление дислокаций) дефектов

Трещины в металле есть ВСЕГДА! *Вопрос – опасны ли они?*

Материал ответственного назначения испытывается на трещиностойкость.

Трещиностойкость – это способность материала сопротивляться развитию трещин (разрушения) при: а) ударных нагрузках; б) при статических нагрузках.

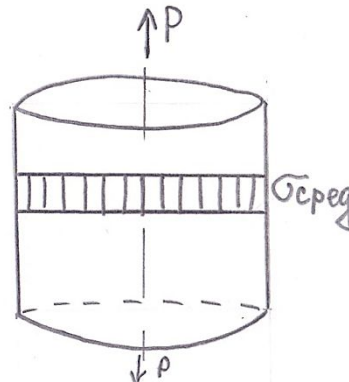
а) ударные нагрузки

$$KCT = \frac{A}{F} \quad \text{концентратор напряжений в форме Т (трещина)}.$$

A - работа на распространение трещины; F – площадь сечения целого металла над трещиной.

Чем выше ударная вязкость KCT, тем материал надёжнее (сверх очень надёжно, если $KCT \approx KCV$)

а) статические нагрузки

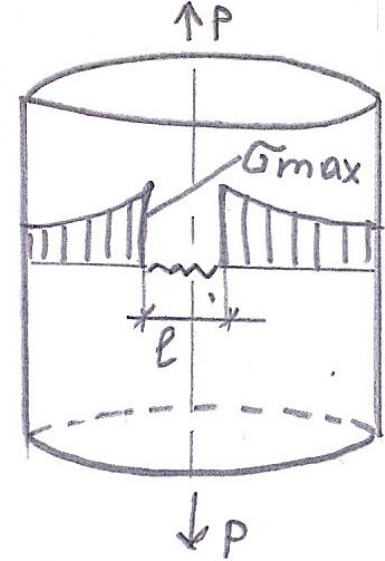


$$\sigma_{кр} = 2\sigma_{ср} \sqrt{\frac{l}{r}}, \text{ где}$$

l – длина трещины; r – радиус кривизны трещины, $\sigma_{ср}$ – средние номинальные напряжения.

Коэффициент интенсивности напряжений:

$$K = \sigma_{ср} \sqrt{\alpha \cdot \pi \cdot l}$$



если металл пластичен, то в вершине трещины происходит ПД, трещина затупляется и дальше не идёт

если металл не пластичен, то в вершине трещины накапливается упругая энергия до тех пор, пока K не достигнет критической величины K_{Ic} , тогда трещина мгновенно распространяется на весь металл, т.е. она гонит сама себя

α (1,1...3) – коэф-т, учитывающий геометрию трещины;
 K_{Ic} - расчётный критерий трещиностойкости

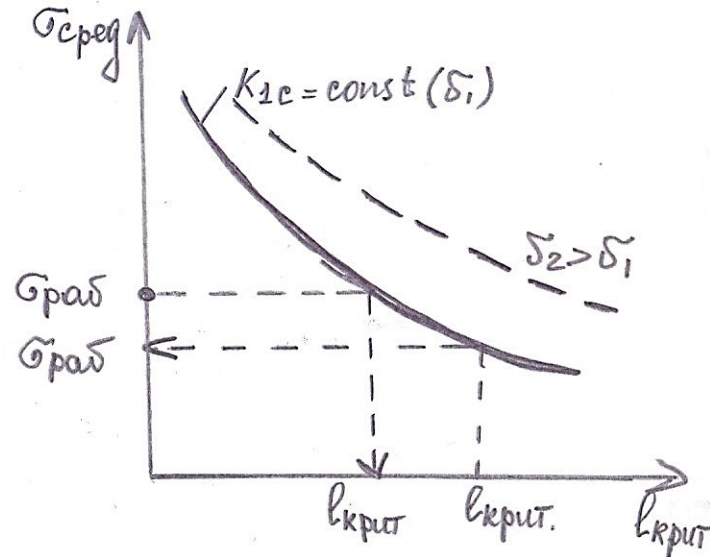
$$K_{Ic} = \sigma_{ср} \cdot \sqrt{\alpha \cdot \pi \cdot l_{кр}}$$

Если K_{Ic} const, то для каждого материала известна взаимосвязь между $\sigma_{ср}$ и $l_{кр}$

$$l_{кр} = \frac{1}{\pi \alpha^2} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ср}} \right)^2$$

Если в металле есть трещина, но $K < K_{Ic}$ (или $l < l_{кр}$), то такие трещины неопасны.

Чем пластичнее металл, тем выше K_{Ic} , тем большие трещины для него неопасны (т.е. большие $l_{кр}$ могут быть), тем он надёжнее.



Итог: Материалы ответственного назначения всегда проверяются по критериям надёжности, которые различны. Но суть одна: материал более надёжен, если он менее склонен к хрупкому разрушению.

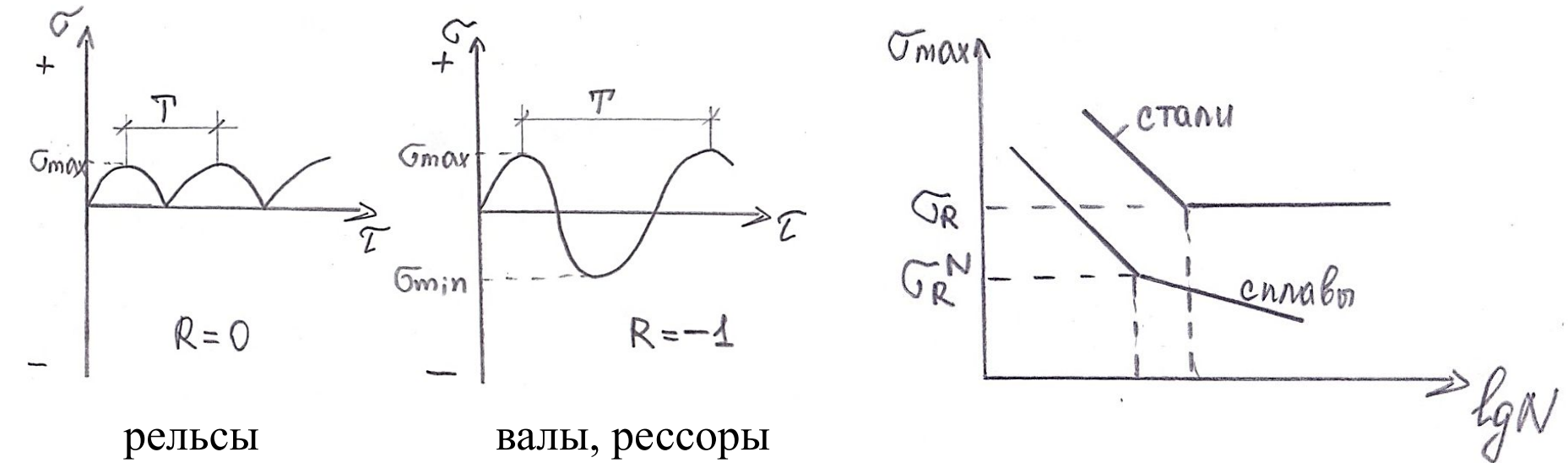
§ 3. Критерии долговечности материала в детали при конкретных условиях эксплуатации

Долговечность – свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения (постепенного отказа), обеспечивая работоспособность детали в течение заданного времени (ресурса). При накоплении повреждений материал преждевременно выходит из строя.

Пример 1. Постепенное повреждение при циклическом нагружении (явление усталости).

Усталость – постепенное накопление повреждений в металле под действием циклических нагрузок, приводящее к образованию трещин и разрушению.

Выносливость – свойство металла противостоять усталости.



σ_R - физический предел выносливости ($\sigma_{-1}, \sigma_0, \dots$) – только у сталей; нагружая ниже σ_R можно избежать усталости (но это очень маленькие величины)

σ_R^N - условный предел выносливости для заданного числа циклов ($\sigma_{-1}^{10^7}, \sigma_0^{10^8}$)

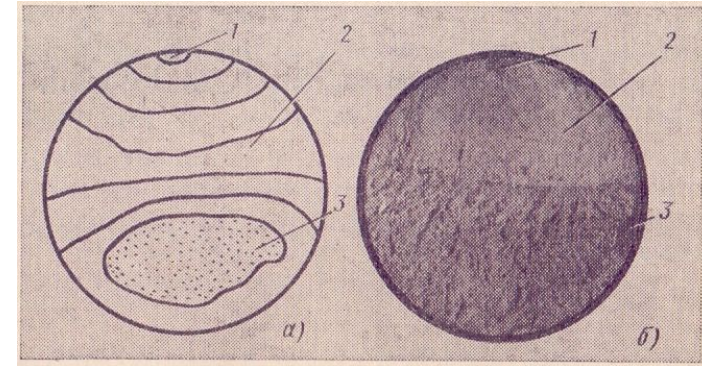
Испытания на усталость проводят на специальных машинах (по ГОСТ 25.502-79). Для не менее 10 образцов при $10^7 - 10^8$ циклов строят кривые усталости.

● Материал долговечен, если $\sigma_{\text{раб}} < (\sigma_R, \sigma_R^N)$. Это поверхностный взгляд, т.к. испытания проводятся на образцах, а не на деталях.

Зоны: 1 – очаг разрушения (зарождение трещины, как правило, у концентратора);

2 – зона распространения трещины;

3 – зона долома.



а – схема излома;

б – макроструктура излома

а) Концентратор может ускорить разрушение. Это нужно учитывать. Материал необходимо подбирать по чувствительности к концентраторам напряжений.

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_R \text{ без концентратора}}{\sigma_R \text{ с концентратором}} \quad k_{\sigma} > 1 (!)$$

Чем ближе k_{σ} к 1, тем материал не чувствительнее к концентраторам напряжений.

б) Металл может долго работать с трещиной

$$\beta = 1 - \frac{\tau_0}{\tau_{\text{разр}}}, \text{ где } \beta < 1 (!)$$

Чем ближе β к 1, тем больше живучесть ($\tau_{\text{разр}} \gg \tau_0$), т.е. дольше работает материал.

τ_0 - время работы до появления трещины; $\tau_{\text{разр}}$ - полное время работы

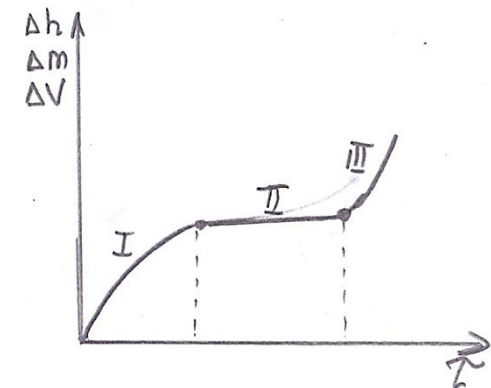
Ресурс работы детали можно определить по критериям, приведённым выше, при этом при подборе материала можно учесть все особенности детали.

Пример 2. Постепенное повреждение при изнашивании.

Изнашивание – это процесс отделения и уноса частиц материала с поверхности детали при трении.

Результат изнашивания – износ: линейный (Δh); массовый (Δm), объёмный (ΔV)

Для всех материалов кривая изнашивания имеет одинаковый характер:



Зоны: I – участок приработки (параболическое возрастание скорости изнашивания);

II – зона установившегося трения (уменьшение скорости изнашивания до const и удержание её такой определённое время);

III – зона задира или повреждаемости (катастрофический рост скорости изнашивания).

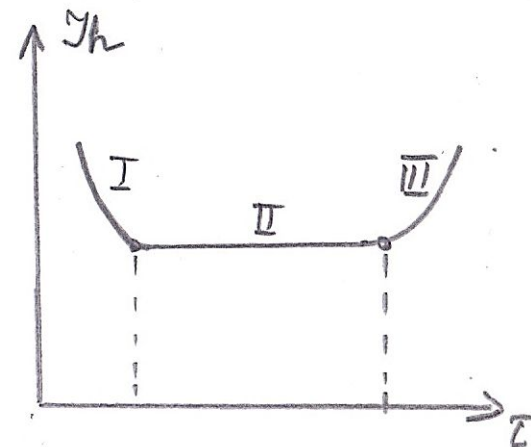
$$v_{\text{изн}} = \frac{(\Delta h, \Delta m, \Delta V)}{\tau} \quad \tau_{\text{раб}} = \frac{\Delta h_{\text{допустимое}}}{v_{\text{изн}}} \quad \text{поверхностный подход, т.к. время может быть разное}$$

Интенсивность изнашивания $J_h = \frac{\Delta h}{L}$, где

Δh – толщина изношенного слоя; L – путь трения

$$L = \frac{\Delta h}{J_h} \quad \text{более точная оценка}$$

По J_h установлены классы износостойкости (от 3 до 12, чем больше класс, тем ответственнее деталь)



Примеры 3 (постепенное повреждение при высоких температурах и нагрузках, т.е. при ползучести), 4 (постепенное повреждение в агрессивной среде, т.е. при коррозии) будут рассмотрены в главе V.

Вывод: Критерии КП помогают для конкретной детали в конкретных условиях работы правильно подобрать материал.

§ 4. Пути повышения характеристик КП

А. Пути повышения прочностных свойств

$\sigma_T, \sigma_{A(\text{пц})}, \sigma_{\text{упр}}$ [$E=\text{const}, \rho=\text{const}$]

- 1 – количество дислокаций $\square 0$;
- 2 – количество дислокаций $\square \text{max}$;
- 3 – создание твёрдых растворов;
- 4 – создание мелких зёрен;
- 5 – создание дисперсных частиц.

Создание структуры, в которой перемещение дислокаций затруднено

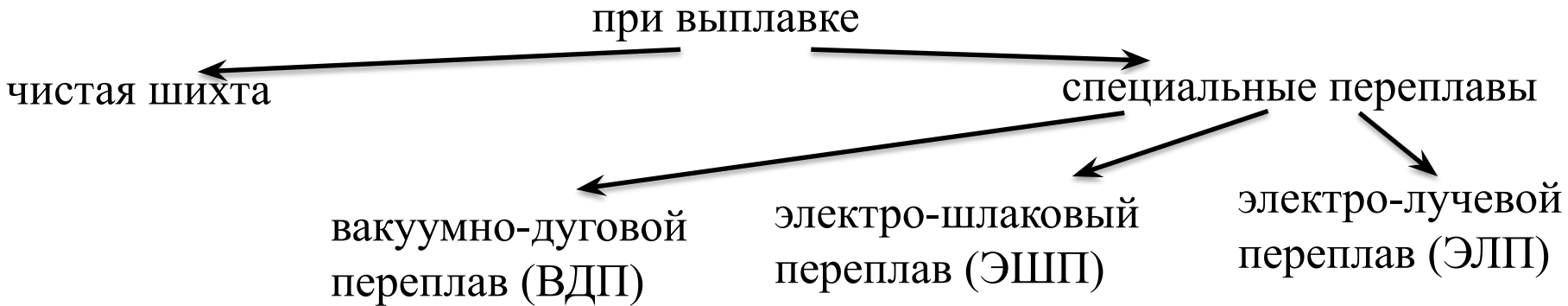
Путь 3+4+2 – в мартенсите (прочность – max, а надёжность – ноль)

При повышении прочностных свойств необходимо использовать способы 4 или 5 (а лучше сразу и 4 и 5 одновременно), при этих способах не происходит резкого ухудшения свойств надёжности (дислокации имеют хотя бы минимальную «подвижность»)

Б. Улучшение характеристик надёжности (! без снижения прочности !)

$\delta, \psi, KCU, KCV, t_{XB}, t_{50}, t_{90}, KCT, K_{Ic}$

1 – уменьшение содержания вредных примесей (у стали S, P, As, Sb), т.к. примеси осаждаются на границах зёрен при кристаллизации и ухудшают «сцепление» зёрен.



Чем чище металл от примесей, тем характеристики надёжности выше и он ДОРОЖЕ !

2 – измельчение зерна
! ЧЕМ МЕЛЬЧЕ ЗЕРНО, ТЕМ ВЫШЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЁЖНОСТИ !

чем меньше зерно, тем меньше примесей на единицу границы зёрен



3 – введение специальных добавок (очень мало, в микродозах)

B (0,001-0,002 %)

Mg (0,01-0,02 %)

Такие добавки «разгоняют» примеси с границ зёрен

В. Улучшение характеристик долговечности.

будут рассмотрены в главе V.