

Механические свойства материалов

1. Требования к материалу

- **Эксплуатационные требования** имеют первостепенное значение. Материал должен выполнять свое функциональное назначение, т.е. обладать определенными значениями механических и физических характеристик, которые должны сохраняться в допустимых пределах во весь период эксплуатации в рабочих средах и рабочем диапазоне температур. Комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу материала в условиях эксплуатации называется **конструкционной прочностью**.
- **Технологические требования** (технологичность материала) направлены на обеспечение наименьшей трудоемкости изготовления деталей и конструкций. Технологичность материала характеризуют все возможные методы его обработки. От технологичности материала зависят производительность и качество изготовления деталей.
- **Экономические требования** направлены на обеспечение конкурентоспособности материала и изготавливаемых из него изделий. Стоимость материала должна быть как можно ниже при условии выполнения эксплуатационных требований. Технологические и экономические требования приобретают особое значение при массовом производстве.

2. Конструкционная прочность

- **Конструкционная прочность материала** – комплексная характеристика, включающая сочетание конструктивных критериев:
 - прочности,
 - надежности,
 - долговечности.

2.1. Критерии прочности

- В качестве *критериев прочности* выбираются такие механические характеристики, получаемые при испытаниях, которые наиболее полно отражают прочность в условиях эксплуатации.
- Примеры критериев прочности:
 - временное сопротивление σ_B ;
 - условный предел текучести $\sigma_{0,2}$;
 - модуль упругости E ;
 - предел выносливости σ_{-1} .

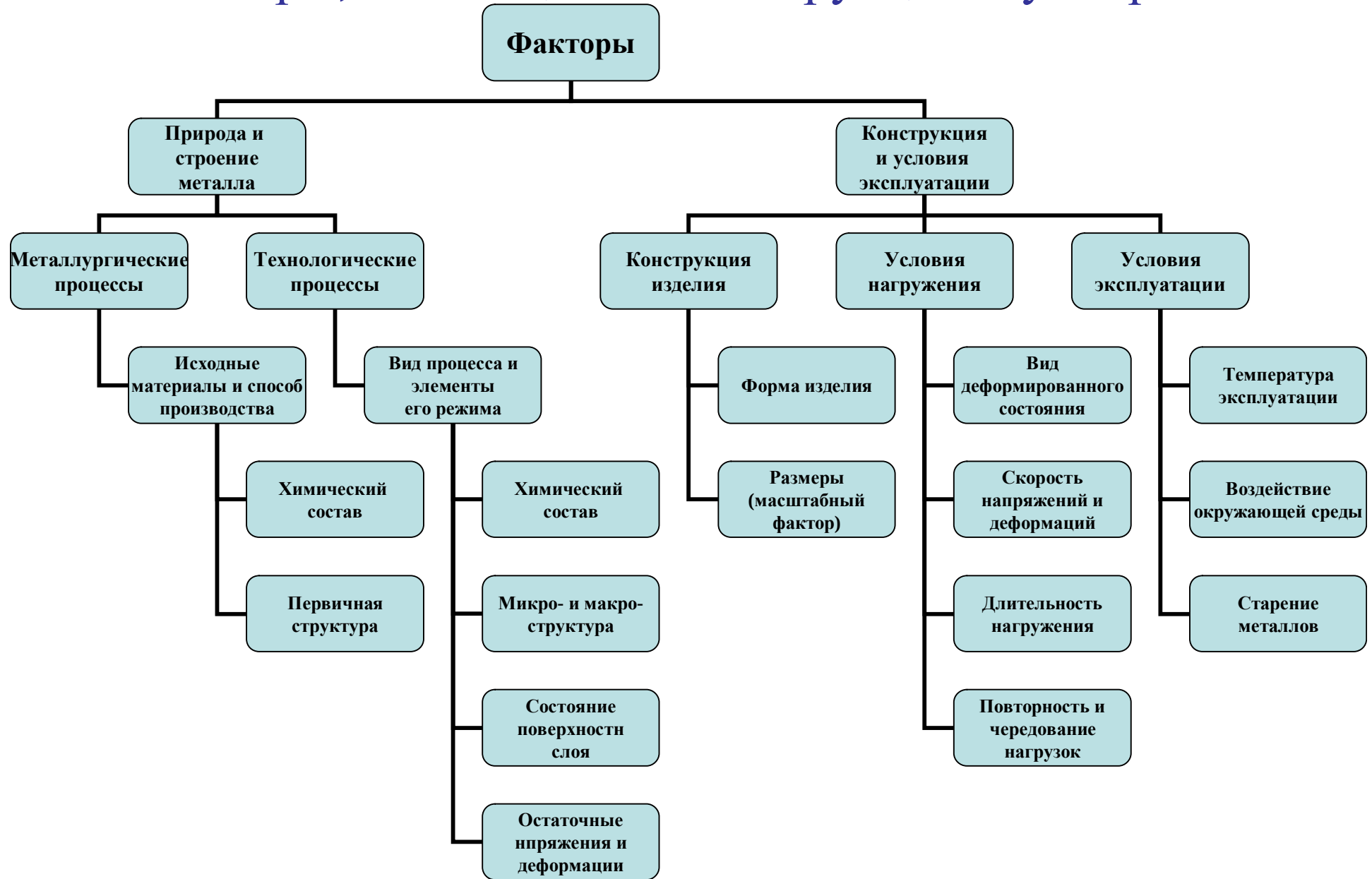
2.2. Критерии надежности

- **Надежность** – свойство материала противостоять хрупкому разрушению.
- **Хрупкое разрушение** особо опасно из-за большой скорости протекания при напряжениях, ниже расчетных, и создания аварийных ситуаций.
- В условиях эксплуатации действуют факторы, увеличивающие опасность хрупкого разрушения:
 - различные концентраторы напряжений (надрезы, трещины и микротрещины),
 - понижение температуры,
 - динамические нагрузки,
 - увеличение размеров деталей (масштабный фактор).
- Примерами **критериев надежности** являются:
 - **относительное удлинение после разрыва** δ ;
 - **относительное сужение после разрыва** ψ ;
 - **ударная вязкость** KCT, KCV, KCU ;
 - **вязкость разрушения** K_{1c} ;
 - **температурный порог хладноломкости** t_{50} .

2.3. Критерии долговечности

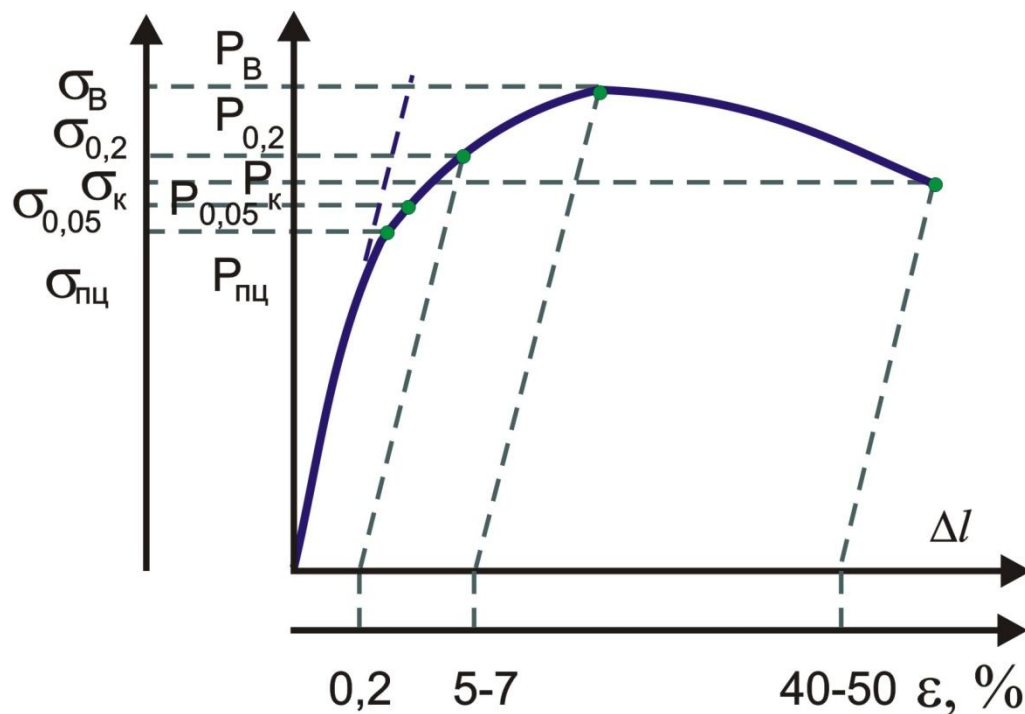
- **Долговечность** – свойство материалов сопротивляться развитию постепенного разрушения (постепенного отказа), обеспечивая работоспособность деталей в течение заданного времени (ресурса).
- **Причины постепенного отказа:**
 - усталость,
 - изнашивание,
 - ползучесть,
 - коррозия,
 - радиационное разбухание и др.
- Эти процессы при эксплуатации вызывают постепенное накопление необратимых изменений в материале и его разрушение. Обеспечение долговечности материала означает уменьшение до требуемых значений скорости его разрушения.
- Для большинства деталей машин долговечность определяется:
 - сопротивлением материала усталостным разрушениям (**циклической долговечностью**),
 - сопротивлением изнашиванию (**износостойкостью**).

2.4. Факторы, влияющие на конструкционную прочность



3. Испытания на растяжение

- P – усилие;
- $\Delta l = l - l_0$ – абсолютное удлинение;
- $\sigma = P / F_0$ – условное напряжение;
- ε – относительное удлинение.
- $\sigma_{\text{пц}}$ – предел пропорциональности;
- $\sigma_{0,05}$ – предел упругости;
- σ_T – физический предел текучести;
- $\sigma_{0,2}$ – предел текучести условный;
- σ_B – временное сопротивление (предел прочности);
- $S_K = P_K / F_K$ – истинное напряжение разрушения;
- $\Psi = [(F_0 - F_K) / F_0] \cdot 100\%$ – относительное сужение после разрыва;
- $\delta = [(l_K - l_0) / l_0] \cdot 100\%$ – относительное удлинение после разрыва;
- $E = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon$ – модуль упругости.



3.1. Определения

- **Предел пропорциональности** – напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой деформации в точке $P_{пл}$ с осью нагрузок, увеличивается на 50 % своего значения на линейном участке.
- **Предел упругости** – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05% от длины участка образца, равного базе тензометра; **характеризует сопротивление упругой деформации.**
- **Физический предел текучести** отвечает напряжению, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки – образуется область (площадка) текучести.
- **Предел текучести условный** – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % начальной длины образца; **характеризует сопротивление пластической деформации.**
- **Временное сопротивление (предел прочности)** – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующее разрушению образца и отнесенное к начальной площади его поперечного сечения до испытания; **характеризует сопротивление разрушению.**

3.2. Определения

- **Истинное напряжение разрушения** – отношение усилия в момент разрушения (P_k) к минимальной площади сечения образца в месте разрыва (F_k).
- **Относительное сужение после разрыва** – отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к начальной площади его поперечного сечения, **характеризует пластичность материала – способность пластически деформироваться без разрушения.**
- **Относительное удлинение после разрыва** – отношение приращения расчетной длины образца $\ell_k - \ell_0$ после разрыва к его первоначальной расчетной длине ℓ_0 , **характеризует пластичность материала.**
- **Модуль упругости** – отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительного удлинения в пределах упругой (линейной) деформации в соответствии с законом Гюка; **характеризует упругость материала.**

4. Испытания на ползучесть

- **Ползучесть** представляет собой зависящую от времени t пластическую деформацию.
- Скорость этой деформации невелика, но материалы, использующиеся при высокой температуре, подвергаются воздействию напряжения в течение длительного времени.
- **Предел ползучести**, найденный при допуске на остаточную деформацию, например, 0,2 % за 100 часов испытания при 700 °С, обозначают $\sigma_{0,2/100}^{700}$, указывая суммарную или остаточную деформацию. Предел ползучести, определяемый по скорости ползучести, например, $1 \cdot 10^{-5}$ %/ч при 700 °С, обозначают $\sigma_{1 \cdot 10^{-5}/ч}^{700}$, указывая время испытания, за которое была достигнута заданная скорость ползучести.

5. Испытания на длительную прочность

- **Длительная прочность** – прочность материала, находящегося длительное время в напряженном состоянии при высокой температуре. Она характеризуется **пределом длительной прочности** – напряжением, которое вызывает разрушение материала при заданной температуре.
- В обозначении предела длительной прочности указывают температуру и время до разрушения:
 $\sigma_{10000}^{600} = 130 \text{ МПа}$. Это означает, что при 600 °С материал выдерживает напряжение в 130 МПа в течение 10000 ч.

6. Динамические испытания

- За результат испытания принимают **работу удара K** или **ударную вязкость (удельная работа, затраченная на разрушение образца)** $KC = K / F_0$, где F_0 – площадь начального сечения образца в месте концентратора, для образцов с концентраторами видов U , V и T (трещина): KCU , KCV и KCT .
- Допускается обозначать ударную вязкость двумя индексами (a_i): первый (a) – символ ударной вязкости, второй (i) – номер типа образца в соответствии с ГОСТ. В литературе используется также обозначение a_n .
- Концентрация напряжений увеличивается в ряду концентраторов $U \rightarrow V \rightarrow T$, поэтому для одного материала при одинаковых условиях испытания $KCU > KCV > KCT$.

7. Испытания на усталость

- Разрушение, возникающее под действием циклически изменяющихся напряжений, называется **усталостью**.
- Усталостью определяется степень долговечности почти всей техники. Это основной путь разрушения фюзеляжей, вагонов, мостов, шестерен, тросов, рельсов, подшипников и т.д.
- Многие металлы имеют **предел выносливости** σ_{-1} (τ_{-1}), т.е. при напряжении ниже предела выносливости металл не подвержен усталостному разрушению (обычно приводится с числом циклов испытаний).
- **Усталостная долговечность** N – характеристика выносливости материала, определяемая числом циклов, пройденных образцом перед разрушением при задаваемом напряжении.

8. Испытания на твердость

- **Твердость** – характеристика прочности материала в условиях сложнапряженного состояния, возникающего при внедрении **индентора** и сопровождающегося большими пластическими деформациями в зоне испытания (поверхностных слоях материала).
- **Способы** измерения твердости вдавливанием:
 - **по Бринеллю** (***HB***, мерой твердости служит отношение нагрузки к площади поверхности сферического отпечатка шарика);
 - **по Роквеллу** (***HRA, HRB, HRC*** – условная величина, обратная глубине вдавливания шарика или алмазного конуса в зависимости от твердости испытуемого металла, с соответствующим отсчетом на приборе Роквелла);
 - **по Виккерсу** (***HV*** – определяется отношением нагрузки к квадрату средней длины диагоналей отпечатка от вдавливания четырехгранной алмазной пирамидки).

9. Механические свойства нанокристаллических материалов

- Твёрдость чистых нанокристаллических металлов (размер зерна $d \approx 10$ нм) в 2–10 или более раз превышает твёрдость металлов с $d > 10$ мкм.
- Сопротивление хрупкому разрушению сильно возрастает, например, при замене монокристаллического слоя твёрдой керамики типа TiN толщиной 3–4 мкм (твёрдость 22–25 ГПа) на многослойный пакет TiN и других твёрдых нитридов, карбидов или боридов с толщиной слоёв 20–100 нм (т.к. трещина не может прорасти через весь пакет). При этом твёрдость возрастает нелинейно.
- Аналогично работают чередующиеся эпитаксиальные кристаллические слои 1 и 2 двух разных материалов с близкими параметрами решёток, но с различающимися упругими модулями $E_1 < E_2$: дислокациям из слоя 1 перейти в слой 2 мешает отталкивающая **сила изображения** (поляризационная сила на границе раздела отличающихся сред), возникающая из-за упругой деформации слоя 2 при приближении к нему дислокации. Например: TiN/NbN, TiN/VN. Сверхтвёрдые нанокомпозиты типа нк-TiN/a-Si₃N₄ показывают твёрдость ≥ 60 ГПа при термостабильности 1250 °С.

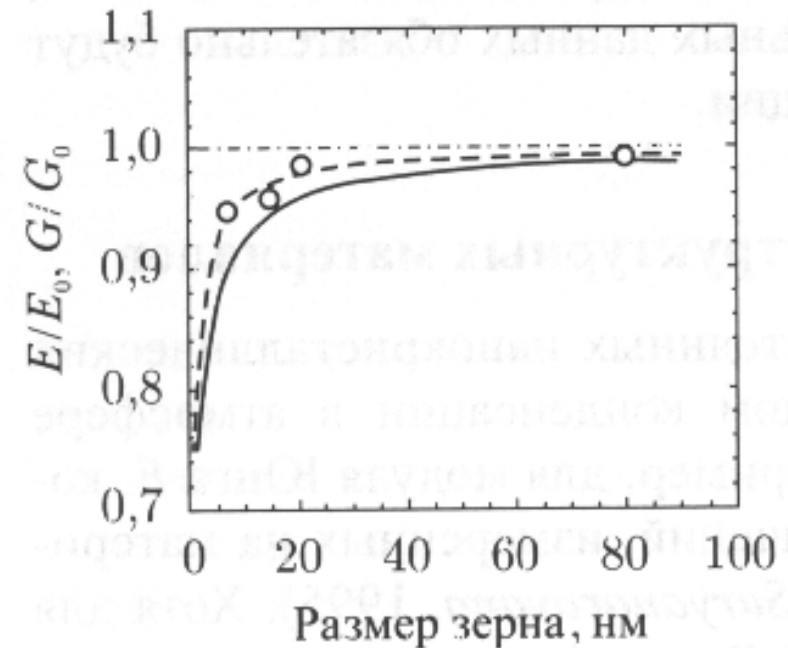
9.1. Углеродные нанотрубки

- Углеродные нанотрубки (УНТ) бывают в 100 раз прочнее стали ($\sigma_b \leq 30$ ГПа, $E \leq 1,8$ ТПа) и достигают до 2мм в длину. Они легки, гибки, термоустойчивы и химически инертны, проявляют свойства металла или полупроводника в зависимости от геометрии закручивания трубки.
- ОСУНТ – однослойная, МСУНТ – многослойная.

Материал	E , ГПа	σ_b , ГПа	Плотность, кг/м ³
ОСУНТ	1054	75	1300
МСУНТ	1200	150	2600
Связка ОСУНТ	563	150	1300
Графит (в плоскости)	350	2,5	2600
Алмаз	1100	130	3500
Кевлар (волокно полипарафенилен-терефталамида)	186	3,6	1450
Сталь	208	0,2-1,5	7800
Древесина	16	0,008	600

9.2. Упругие свойства

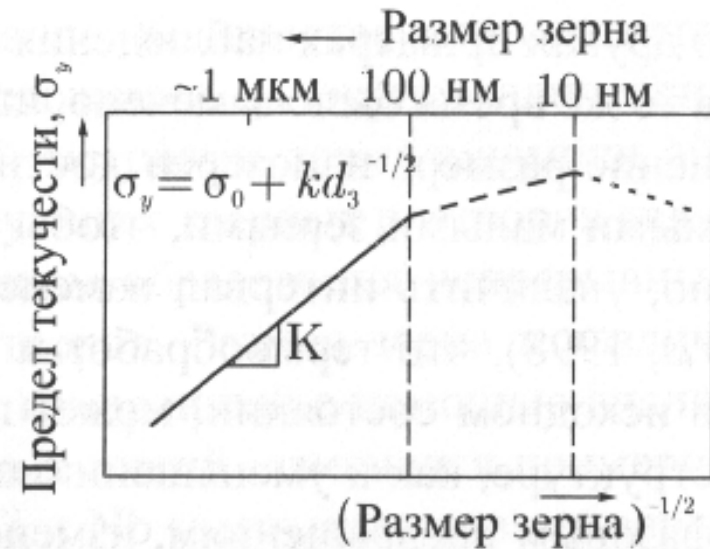
- Модули Юнга (E) и сдвига (G) плотных нанокристаллических материалов остаются практически теми же, что и модули материалов с зёрнами обычных размеров, пока размер зерна не станет < 5 нм.
- К снижению значений модулей в реальных нанокристаллических материалах приводит пористость.



Штриховая и сплошная кривые – расчёт для границ зёрен толщиной 0,5 и 1,0 нм соответственно. Кружки – эксперимент для Fe. [Коч К. и др. Конструкционные нанокристаллические материалы. Научные основы и приложения. М.: Физматлит, 2012. 448 с.]

9.3. Прочностные характеристики

- Например, предел текучести нк-Си с размером зерна $d = 23$ нм в 22 раза выше $\sigma_{0,2}$ для Си с размером зерна 20 мкм.
- Для поликристаллов с размером зерна >1 мкм справедливо эмпирическое **уравнение Холла–Петча**: $\sigma_{0,2} = \sigma_0 + kd^{-1/2}$, где σ_0 – напряжение трения, ниже которого дислокации не будут скользить в монокристалле; k – коэффициент Холла–Петча [Hall E.O. Proc. R. Soc. Land. 1951. V.364. P.474. Petch N.J. J. Iron Steel Inst. 1953. V.174. P.25.]. Сравни с соотношением Гриффитца: $\sigma_{кр} = K_{1с} / (\pi l_{кр})^{1/2}$.
- Механизм: **МЗГ – препятствие для движения дислокаций**.
- При $d < 100$ нм k уменьшается, а при $d < 10$ нм: $k < 0$.
- В зёрнах с $d < 10$ нм дислокационная активность прекращается из-за действия сил изображения, перемещающих дислокации в границы зёрен (решёточные дислокации не наблюдаются).



[Коч К. и др. Конструкционные нанокристаллические материалы. Научные основы и приложения. М.: Физматлит, 2012. 448 с.]

- Хорошо подтверждается приближение Табора: $\sigma_{0,2} = \frac{1}{3}HB$ [МПа].

9.3.1. Прочность керамик

- Размер зерна $d \downarrow \Rightarrow$ твёрдость и прочность керамических материалов $\uparrow$, но механизм этого явления иной, чем в пластически деформируемых материалах типа металлов, – **размеры дефектов в керамике симбатны d .**
- При снижении d до наноуровня прочность перестаёт увеличиваться.
- В мелкозернистой керамике разрушение начинается на изначально присутствующих в материале дефектах $\Rightarrow$ прочность и твёрдость практически не зависят от d .

9.4. Твёрдорастворное упрочнение

- Влияние легирующих элементов на твёрдость нанокристаллических твёрдых растворов отличается от подобных зависимостей для обычных поликристаллических твёрдых растворов из-за сильного влияния на энергию МЗГ и коэффициент зёрнограничной диффузии.
- В результате изменяются механизмы деформации и возврата.
- Если примеси приводят к $d \downarrow \Rightarrow$ упрочнение и наоборот.

9.5. Пластичность и вязкость разрушения

- Уменьшение размера зерна низкоуглеродистой стали в 5 раз приводит к понижению температуры вязко-хрупкого перехода на 40 °С.
- Для большинства металлов с $d < 30$ нм относительное удлинение $\delta < 2-3$ % (при обычных размерах зёрен может достигать $> 50\%$).
- Причины ограничения пластичности нанокристаллических материалов:
 - технологические артефакты (например, пористость, остатки ПАВ и технологических добавок);
 - потеря устойчивости при растяжении (образование шейки с уменьшением деформационного упрочнения – снижение вклада дислокационного механизма);
 - неустойчивость при зарождении и росте трещин ($l_{кр}$).
- Бимодальное распределение нанозёрен по размерам повышает и прочность, и пластичность: крупные зёрна деформируются по обычным дислокационным механизмам и испытывают деформационное упрочнение, а мелкие обеспечивают прочность и твёрдость (например, для нк-Сu с бимодальным распределением зёрен по размерам $\delta = 30\%$, а $\sigma_{0,2}$ в 7 раз выше обычного).

9.6. Дефекты

- ТЕМ-исследования *in situ* нанокристаллических плёнок показывают зарождение и распространение дислокаций даже в зёрнах с $d \sim 10$ нм $\Rightarrow$ зёрнограничное скольжение в нанокристаллических плёнках вносит небольшой вклад в полную пластическую деформацию.
- Деформационная активность в плёнках интенсивнее, чем в объёмных материалах.
- В нанокристаллических материалах при деформации наблюдается двойникование даже в ГЦК-металлах, в которых при обычных размерах зёрен двойникование не происходит.

9.7. Сверхпластичность

- Границы нанозёрен легко поддаются структурным трансформациям, связанным с изменением их длины и формы. Ускоренная локальная миграция МЗГ облегчает рост зёрен и процессы зернограничного скольжения.
- При сверхпластичности удлинение при растяжении достигает 200–2000 %.
- Уменьшение размера зерна позволяет увеличить скорость деформирования материалов и понизить температуру, при которой возможен сверхпластический характер деформации.
- Общее уравнение при температурной кристаллической пластичности, включая сверхпластическую деформацию, для установившейся скорости деформации:
$$\dot{\varepsilon} = A \frac{DGb}{k_B T} \left(\frac{b}{d} \right)^p \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n$$
, где A – константа; D – коэффициент диффузии (решёточной или по границам зёрен); G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса; k_B – постоянная Больцмана; T – температура испытания; d – размер зерна; σ – приложенное напряжение; p и n – показатели степени.
- Уменьшение зерна до наноразмеров повышает скорость деформации на несколько порядков и снижает температуру проявления сверхпластичности (иногда даже до комнатной, например, в сплаве Zn-Al при 22 % вес. Zn). При этом сверхпластичность возможна при более высоких скоростях деформации.

9.8. Ползучесть

- Основные режимы ползучести (зависят от температуры, приложенного напряжения и микроструктуры материала):
 - скольжение дислокаций (высокие напряжения, независимость от температуры);
 - дислокационная ползучесть (скольжение и переползание дислокаций, контролируемые диффузией – высокие напряжения и относительно высокие температуры);
 - ползучесть Набарро-Херинга (миграция вакансий внутри зёрен – низкие напряжения и высокие температуры);
 - ползучесть Кобла (миграция вакансий по границам зёрен – низкие напряжения и температуры).
- В нанокристаллических материалах существенных отличий ползучести от обычных поликристаллов не обнаружено, если не считать рост размера зерна при высокотемпературных испытаниях.

9.8.1. Диаграмма Виртмана-Эшби

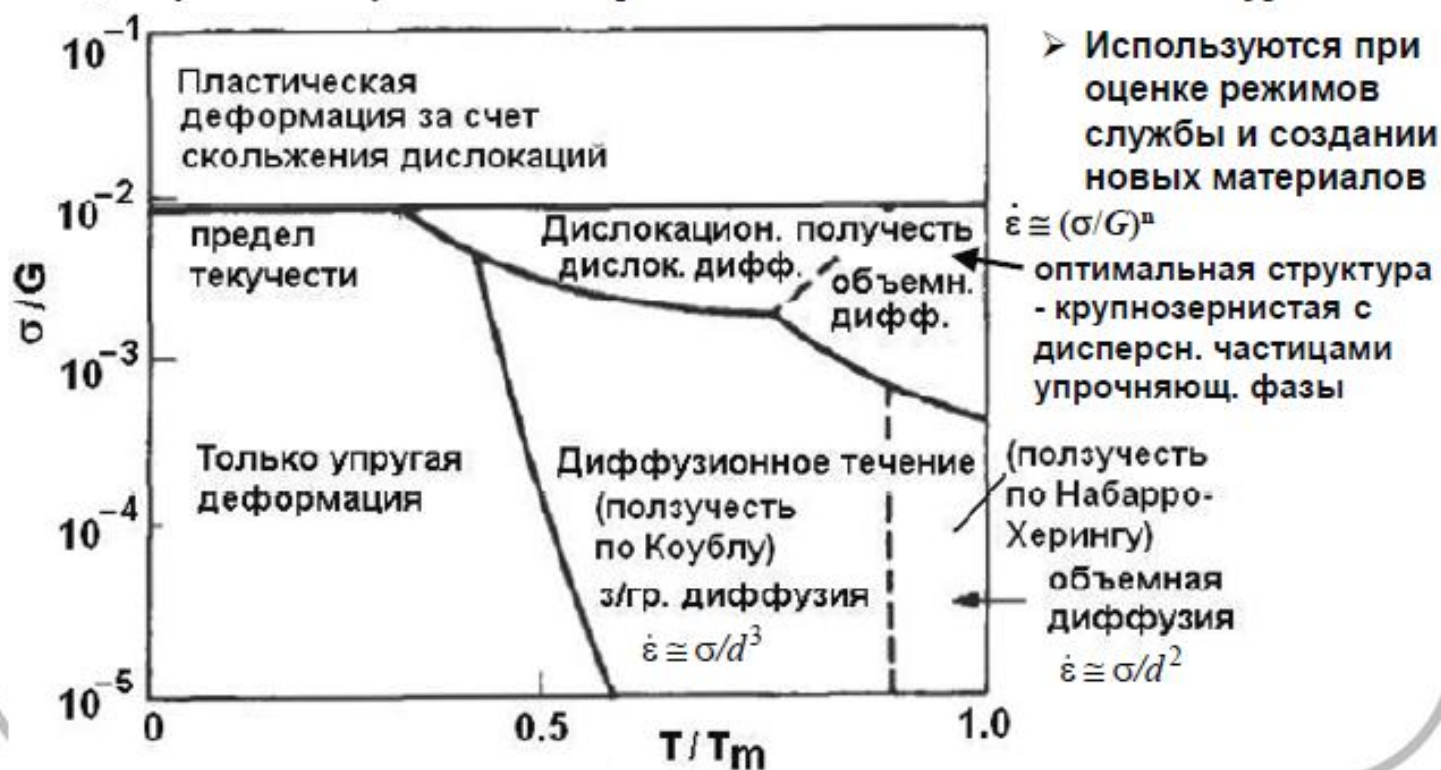
Карты механизмов деформации в поликристаллах

➤ Общая диаграмма:

определяет области реализации различных механизмов деформации в координатах "гомологическая температура T/T_m " -

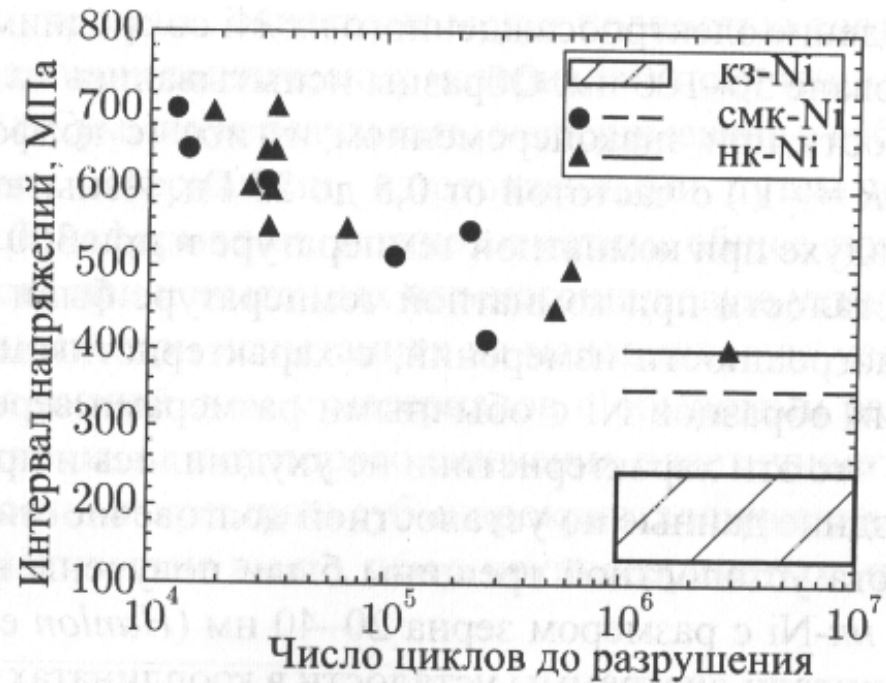
"нормализованное напряжение σ/G " (deformation mechanism maps)

- диаграммы Виртман-Эшби [Julia Weertman and Michael Ashby]



9.9. Усталость

- В субмикроструктурных материалах ($d \geq 100$ нм), полученных интенсивной пластической деформацией:
 - повышается долговечность при испытаниях на многоцикловую усталость;
 - уменьшается долговечность при испытаниях на малоцикловую усталость (из-за снижения пластичности);
 - значительно возрастает скорость роста усталостных трещин.
- Нанокристаллическая структура повышает усталостную долговечность, но снижает сопротивление росту усталостных трещин.



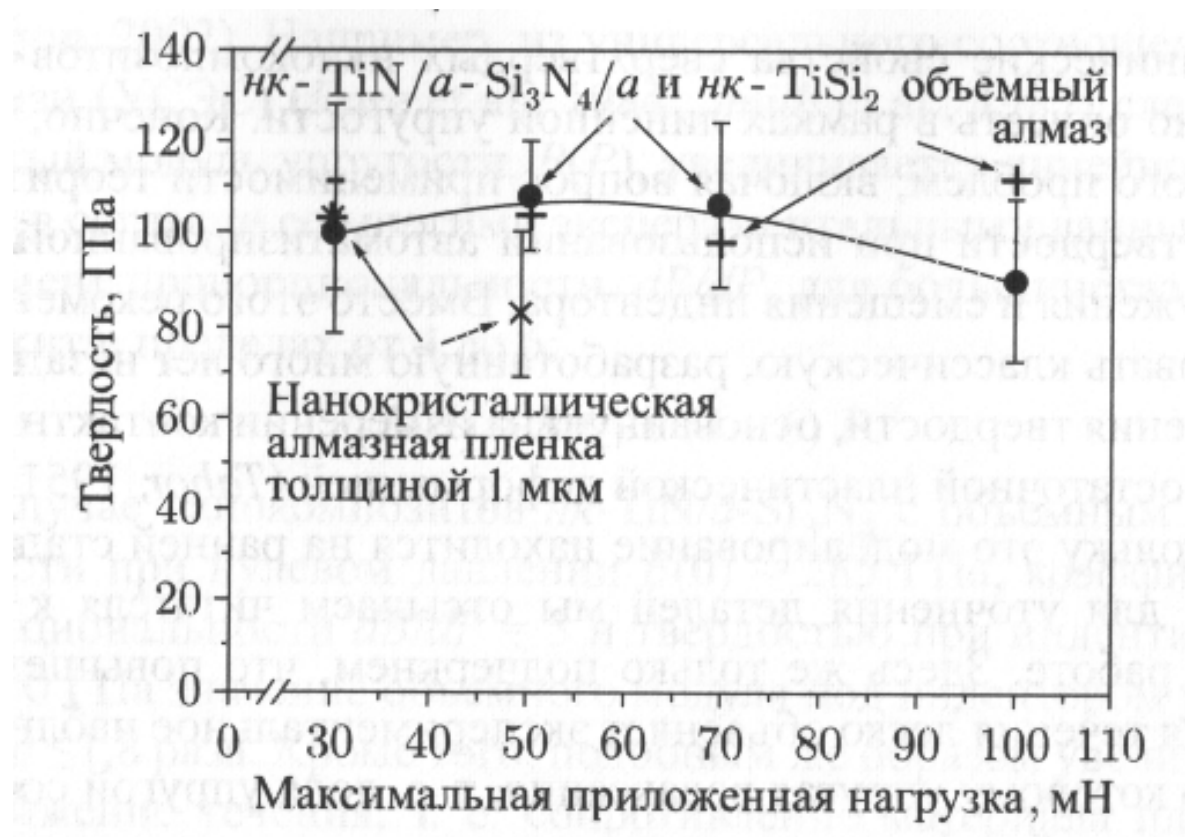
кз – крупное зерно; смк – субмикроструктурное зерно; нк – нанокристаллическое зерно.
[Коч К. и др. Конструкционные нанокристаллические материалы. Научные основы и приложения. М.: Физматлит, 2012. 448 с.]

10. Механические свойства сверхтвёрдых нанокристаллических покрытий

- Повышение твёрдости покрытий, упрочняемых интенсивной ионной бомбардировкой в процессе их осаждения связано с уплотнением, образованием точечных и протяжённых дефектов, формированием внутренних напряжений сжатия.
- Упрочнение гетероструктур достигается за счёт снижения дислокационной активности (при периоде сверхрешётки ≤ 20 нм в ней не действуют источники размножения дислокаций; упругие силы изображения препятствуют переходу дислокаций из более мягких в более жёсткие слои).
- В соотношении Гриффитца $\sigma_{кр} = K_{1с} / (\pi l_{кр})^{1/2}$ для нанокристаллов $l_{кр}$ стремится к межатомному расстоянию $\Rightarrow$ прочность стремится к теоретической прочности бездефектного материала. **Прочность и твёрдость нанокристаллических материалов ограничивается прочностью границ зёрен.**

10.1. Твёрдость

Примеси резко снижают твёрдость этих покрытий – сильные искажения кристаллической решётки и электронные эффекты.



[Коч К. и др. Конструкционные нанокристаллические материалы. Научные основы и приложения. М.: Физматлит, 2012. 448 с.]

10.2. Вязкость разрушения

- Вязкость разрушения – сопротивление материалу распространению (росту) трещин. При малом зерне (3–4 нм) длина трещины $l_{\text{тр}} \approx 1$ нм, и её отношение к радиусу кривизны $r \approx 0,3$ нм в вершине трещины даёт коэффициент концентрации напряжений $K < 5$, тогда как в зёрнах обычного размера $K = 20–60$.
- В нанокompозитах требуются большие пороговые напряжения для страгивания трещины.