

# Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении

Проф., д.т.н. *Скотникова Маргарита Александровна*  
Skotnikova@mail.ru

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

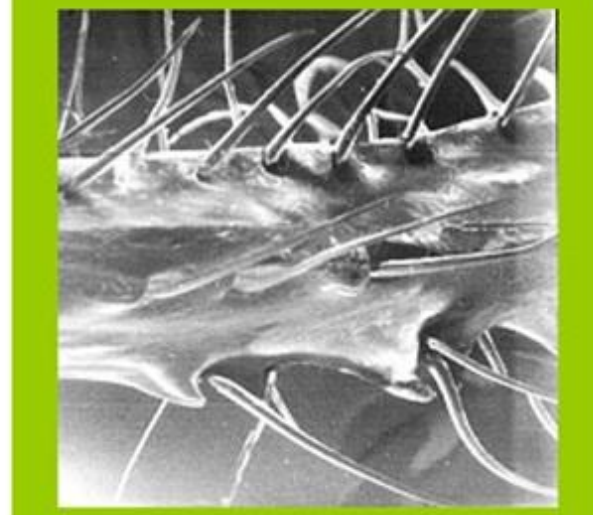
Кафедра "Машиноведение и  
основы конструирования"  
ИММиТ САБПУ



x 1



x 100

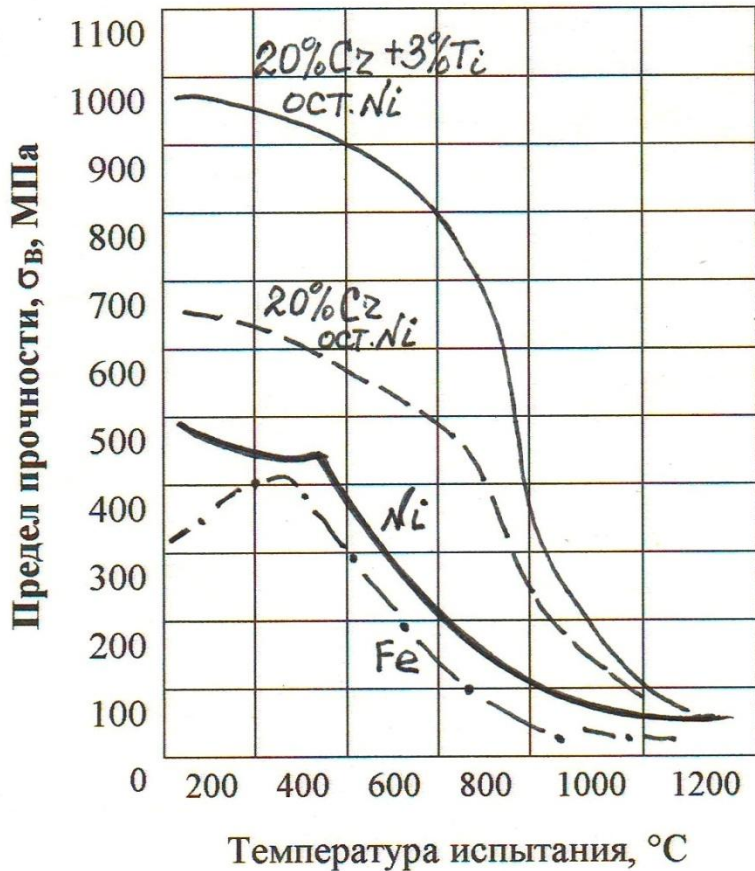


x 10000

# Тема 5. Обеспечение повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин, работающих при длительном статическом нагружении .

1. Влияние высоких температур на механические свойства при кратковременном и длительном растяжении.
2. Испытания материалов на длительную прочность. Определение предела длительной прочности.
3. Длительная пластичность и ее роль в обеспечении работоспособности изделий.
4. Жаропрочность материалов. Явление ползучести. Экспериментальная оценка предела ползучести.
5. Основные закономерности структурообразования в условиях ползучести.
6. Жаропрочные материалы. Способы повышения жаропрочности.

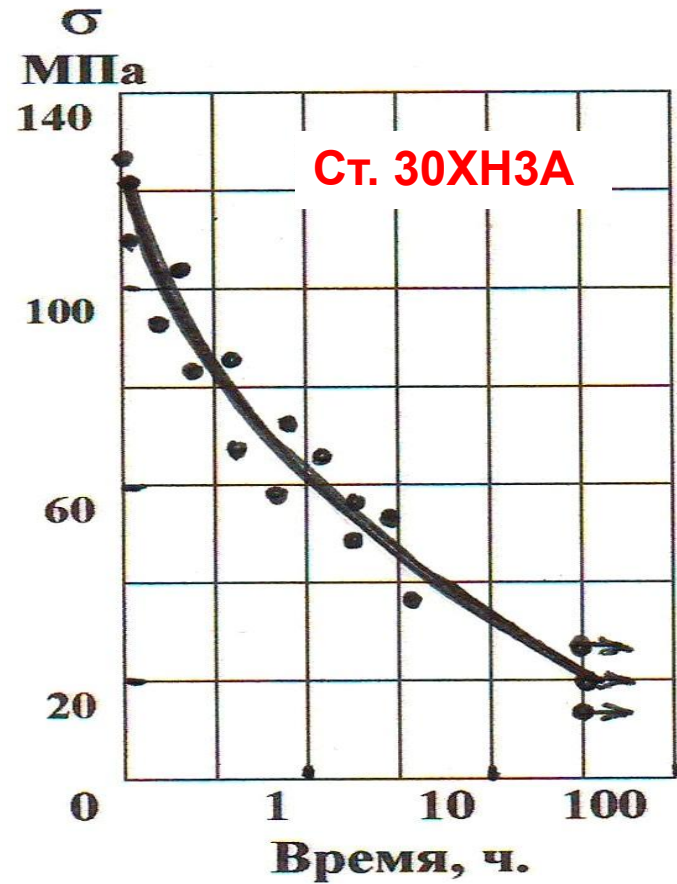
## 5.1. Влияние высоких температур на механические свойства при кратковременном и длительном растяжении.



Многие детали машин и конструкций подвергаются весьма длительному воздействию **постоянных длительных статических нагрузок**, а также воздействию коррозионных или поверхностно-активных сред при нормальных или при повышенных температурах (**крепежные детали, пружины, детали судов и котлов**, нагруженных внутренним давлением, химической и нефтяной аппаратуры, паровых и газовых турбин и т. п.).

**При длительных статических нагружениях** значительную опасность может представлять *преждевременное разрушение*. У многих деталей из конструкционных сталей и сплавов на алюминиевой и титановой основе (**затянутые болты, пружины, сварные соединения** и др.) наблюдается *склонность к замедленному разрушению*. Многие металлы и жаропрочные стали и сплавы при высоких температурах обнаруживают при длительных статических нагрузках значительное **понижение прочности, пластичности и вязкости**.

## 5.2. Испытания материалов на длительную прочность. Определение предела длительной прочности.



Замедленное разрушение конструкционных материалов наступает, как правило, при комнатной температуре за время на несколько порядков большее чем при кратковременном испытании, при напряжении меньшем кратковременной прочности данного материала. **Особенностью замедленного разрушения** является то, что оно происходит в напряженной системе без подгрузки внешними силами во время развития процесса разрушения. **Характерным признаком замедленного разрушения** является макрорупкий межзеренный излом детали (образца).

Склонность к замедленному межзеренному разрушению проявляется обычно у высокопрочных материалов в деталях сложной формы или крупных размеров с нестабильной или неоднородной структурой, в жестких сварных соединениях **под воздействием внутренних растягивающих напряжений**. На рис. представлена временная зависимость прочности при испытании образцов на кручение **из стали 30ХН3А** в закаленном без отпуска состоянии. При осевом растяжении в стали такого состояния была обнаружена временная зависимость прочности только на образцах с кольцевым надрезом.

## 5.2. Испытания материалов на длительную прочность.

### Определение предела длительной прочности.

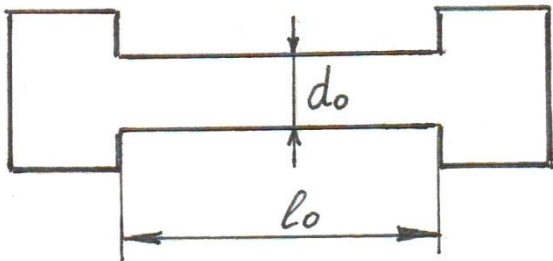
**Длительной прочностью** – называется сопротивление материала механическому разрушению под действием длительно приложенной постоянной нагрузки при высокой температуре.

Различают **длительную прочность** при *растяжении, кручении и изгибе*, а также в сложнапряженном состоянии, например, *растяжение и изгиб, растяжение и кручение*.

Длительная прочность характеризуется **пределом длительной прочности**, который чаще всего определяют при растяжении. **Предел длительной прочности** характеризует способность материала противостоять разрушению при длительном воздействии **температуры и напряжения**. **Длительная прочность** большинства материалов с повышением температуры снижается; она зависит от химического состава, микроструктуры (размера зерна, формы, размера и характера распределения упрочняющих частиц), состояния поверхности образцов (снижение при увеличении шероховатости), окружающей среды.

**Испытание на длительную прочность** при температурах до  $1200^{\circ}\text{C}$  заключается в том, что образец доводится до разрушения под действием **постоянной растягивающей нагрузки** при **постоянной температуре**. Результатом испытания каждого из серии образцов являются **три характеристики**: **время до разрушения (долговечность)**, **относительное удлинение**, **относительное сужение**. В результате испытаний определяют **предел длительной прочности на базе испытаний 50...10.000 ч**.

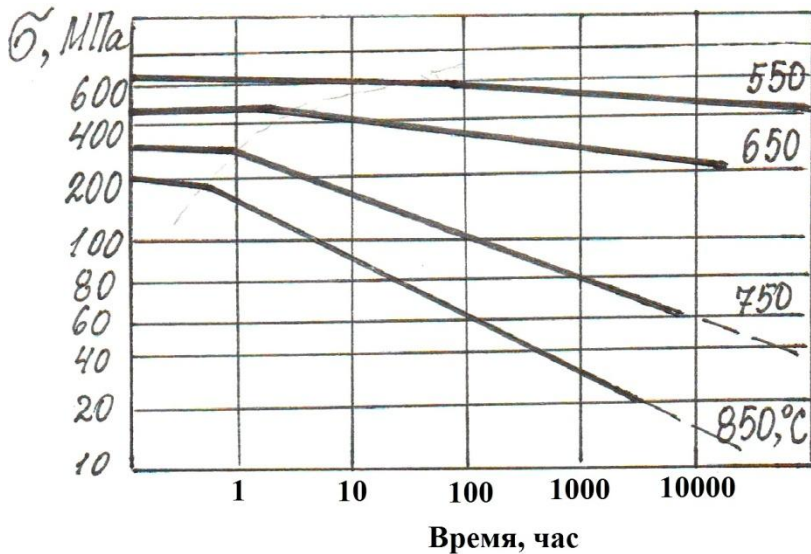
**Пределом длительной прочности** – называется **наибольшее напряжение, вызывающее разрушение металла при определенной температуре за установленное время испытания (срок службы)**.



Для испытаний на длительную прочность (ГОСТ 10145 – 81) устанавливают цилиндрические образцы «пятикратные» и «десятикратные» диаметром ( $d_0$ ) 5;10 мм с начальной расчетной длиной ( $l_0=5;10 \cdot d_0$ ) 50;100 мм, соответственно; плоские образцы с начальной расчетной длиной  $l_0 = 5,65 (F_0)^{1/2}$ , где  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца,  $\text{мм}^2$ .

## 5.2. Испытания материалов на длительную прочность. Определение предела длительной прочности.

**Машины** для испытания металлов на длительную прочность, как и на ползучесть, должны обеспечивать **постоянство нагрузки** в течение всего процесса испытания, плавность нагружения и разгружения образца, надежное центрирование образца, возможность проведения испытаний в вакууме и воздушной среде **при температурах от 150 до 1200°C**. Специальные устройства задают **скорость деформирования** образца и запись диаграммы в координатах "**нагрузка – время**". Этим требованиям отвечают **машины АИМА-5-2, 1243ПРЛ-5/1200, 1242П-1/1800**.



Для определения **предела длительной прочности** необходимо провести испытание **до разрушения** нескольких (5...6) образцов при разных напряжениях. Основным результатом испытания каждого образца является **время до разрушения ( $t_p$ )** при заданном напряжении ( $\sigma$ ). Связь между  $t_p$  и  $\sigma$  хорошо аппроксимируется уравнением:  $t_p = B \cdot \sigma^{-m}$ . В логарифмических координатах эта зависимость **прямолинейна** и, следовательно, дает возможность **экстраполировать** результаты на более длительное время (что сокращает время испытаний).

Иногда зависимость  **$\lg \sigma - \lg t_p$**  характеризуется **точкой перелома**. Она соответствует переходу от внутрикристаллитного или смешанного разрушения к полному межкристаллитному при низких температурах

**Предел длительной прочности** обозначается  $\sigma$  с двумя числовыми индексами: **верхний** – температура испытаний, °C; **нижний** – заданная продолжительность испытания до разрушения, ч., например  $\sigma^{750}_{1000}$  – **предел длительной прочности (80 МПа)** на базе испытания 1000 ч при температуре 750°C.

## 5.3. Длительная пластичность и ее роль в обеспечении работоспособности изделий.

**Относительное удлинение  $\delta$**  (%) после разрыва цилиндрических образцов подсчитывают по формуле:

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

где,  $l_0$  – начальная расчетная длина образца, измеренная при комнатной температуре перед испытанием, мм;

$l_k$  – расчетная длина образца после испытания на разрыв, мм; для чего, части образца плотно складываются так, чтобы оси их образовывали прямую линию.

**Относительное сужение  $\psi$**  (%) после разрыва подсчитывают по формуле:

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

где,  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца, измеренная при комнатной температуре перед испытанием, мм<sup>2</sup>;

$F_k$  – минимальная площадь поперечного сечения образца после разрушения, мм<sup>2</sup>;

## 5.4. Жаропрочность материалов. Явление ползучести.

### Экспериментальная оценка предела ползучести.

По мере развития техники все большее число деталей машин и механизмов работают при **повышенных температурах**: лопатки турбин, обшивка фюзеляжа и крыльев самолетов, клапаны мощных двигателей, узлы атомных реакторов, паровые котлы.

Надежность их работы определяется жаропрочностью металлических материалов, из которых они изготовлены.

**Жаропрочностью** – называется комплекс свойств металлов, обеспечивающих их работоспособность под напряжением в условиях повышенных температур без заметной пластической деформации и разрушения.

При длительной работе металла при высоких температурах первостепенное значение приобретает явление ползучести металлов.

**Ползучестью** – называется свойство металлов медленно и непрерывно пластически деформироваться с течением времени при постоянном напряжении (нагрузке) и постоянной температуре.

Например, у сталей **ползучесть** наблюдается в интервале температур **350...400°С**. Она опасна тем, что может привести к недопустимым *остаточным изменениям расчетных размеров деталей*.

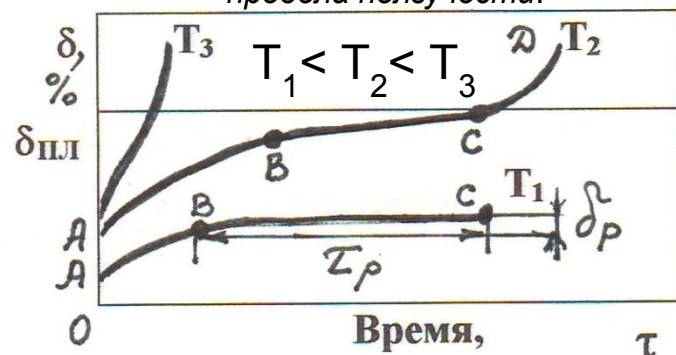
Например, между лопатками и корпусом паровой турбины должен быть очень небольшой зазор. Если вследствие ползучести хотя бы одна лопатка увеличится в размере настолько, что закроет этот зазор, то в связи с трением может произойти авария турбины.

Основным первичным результатом испытания на ползучесть при заданной температуре и постоянном напряжении  $\tau > \tau_{кр}$ , является **кривая ползучести в координатах относительная деформация – время**, которую строят по данным систематического измерения деформации (обычно относительного удлинения  $\delta$ ) образца в процессе испытания.

**Основными стадиями ползучести** являются:

- стадия нагружения;
- неустановившейся ползучести;
- установившейся (равномерной) ползучести ( $V_p = \delta_p / \tau_p = const$ );
- стадия разрушения.

Экспериментальная оценка предела ползучести.





## 5.4. Жаропрочность материалов. Явление ползучести. Экспериментальная оценка предела ползучести.

По основными стадиями ползучести оценивают сопротивление металла ползучести, определяют напряжения, вызывающие допустимую величину остаточной деформации детали за срок ее службы (см. табл.). (100000 ч. – 12 лет)

Назначение изделия	Допустимая степень деформации, $\epsilon, \%$ , $[\delta]$	Срок службы, ресурс час, $[\tau]$	Допустимая скорость ползучести, $[V_p]$ , % / час
Детали моторов	0,1...1	50...1000	–
Трубы пароперегревателей	2,0	20.000	$1 \cdot 10^{-4}$
Паропроводы	0,3	100.000	$3 \cdot 10^{-6}$
Цилиндры паровых турбин	0,1	100.000	$1 \cdot 10^{-6}$

Величину **допустимой остаточной деформации** устанавливают в зависимости от условий эксплуатации оборудования и точности сохранения размеров деталей.

Испытания на ползучесть проводят на специальных **машинах**, в которых длительное время поддерживают постоянными нагрузку и температуру образца. Обычно эти машины с рычажным нагружением **усилием до 5000 кг**, что позволяет испытывать образцы до 10 мм. Температуру образца измеряют термопарой, и **постоянство температуры** поддерживают с помощью электронного потенциометра. Через определенные **промежутки времени** (например, через 2 или 4 часа) измеряют **деформацию** с помощью индикаторов с ценой деления 0,01...0,001 мм. **Длительность испытания** образца на ползучесть зависит **от срока службы детали или конструкции**:

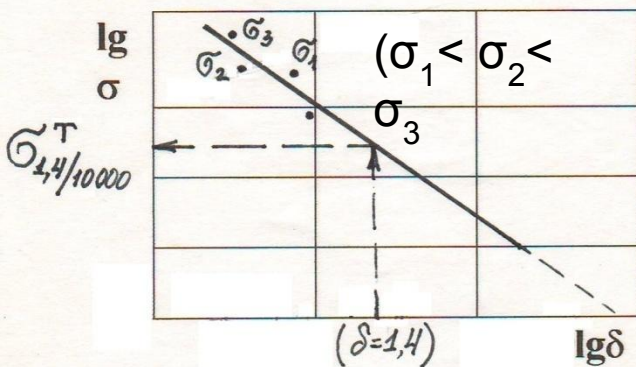
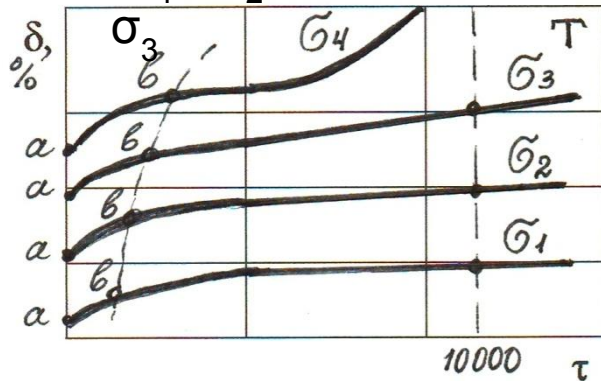
- при **кратковременном сроке службы** деталей до 10.000 часов, база испытания образцов принимается **равной сроку службы**  $t_{исп.} = 10.000$  час.;

- при **длительном сроке службы** деталей **более 100.000 часов**, база испытания принимается  $t_{исп.} = 10.000$  час.;

## 5.4. Жаропрочность материалов. Явление ползучести. Экспериментальная оценка предела ползучести.

По результатам испытаний строят кривые ползучести в координатах **относительное удлинение – время**,

рис. ( $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ )



На кривой ползучести **определяют участок установившейся ползучести** и **скорость равномерной ползучести** на этом участке:  $V_p = \delta_p / \tau_p$ , % / час, где  $\delta_p$  – относительная деформация на участке установившейся ползучести,  $\tau_p$  – продолжительность этого участка. Чем выше **напряжение и температура**, тем интенсивнее ползучесть (больше скорость равномерной ползучести) и, следовательно, больше деформация детали за равный промежуток времени. При высоких напряжениях, обычно недопустимых в конструкциях, наблюдается **участок ускоренной ползучести, приводящий к разрушению**.

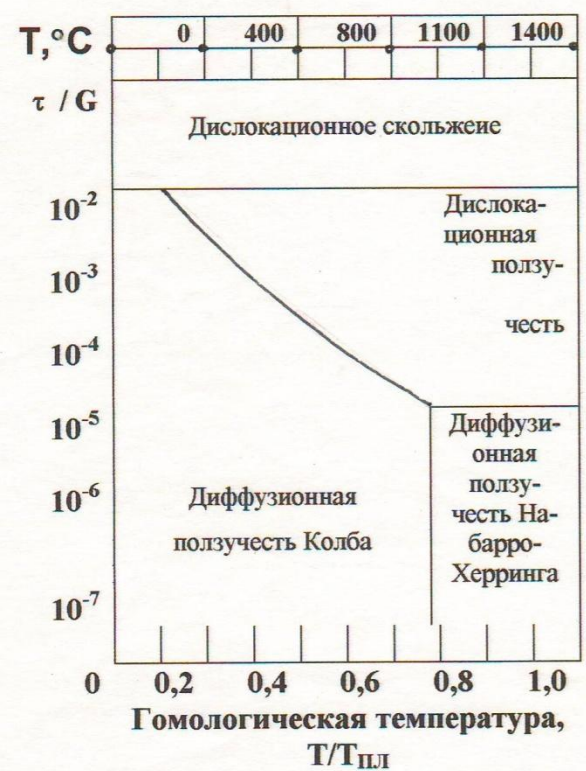
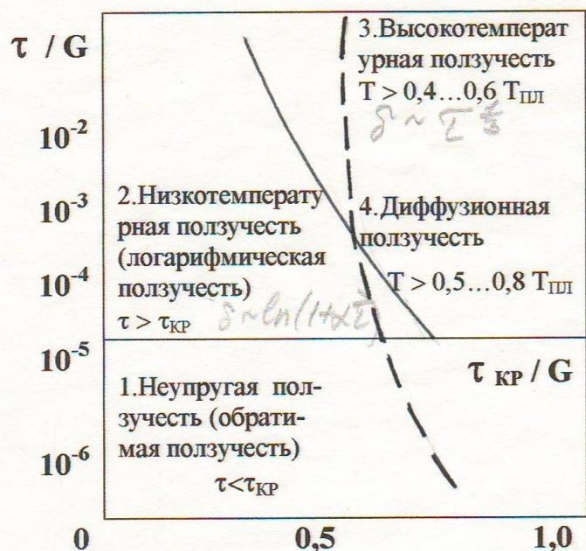
Критерием для оценки сопротивления металла ползучести служит так называемый **условный предел ползучести**.

**Условным пределом ползучести – называется напряжение вызывающее заданную скорость ползучести или степень деформации детали за срок ее службы.**

Например,  $\sigma^{750}_{1,4/10000}$  – напряжение, вызывающее суммарную остаточную деформацию 1,4%, за 10000 часов при температуре 750°C.

**Для определения предела ползучести** при **заданной температуре** проводят испытания обычно **трех образцов** при разных напряжениях  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , строят **кривые ползучести** и определяют накопившуюся деформацию за срок службы –  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ . Построив график зависимости **напряжение – деформация** в логарифмических координатах (рис.), по **допускаемой деформации**  $[\delta]$  определяют величину **условного предела ползучести**  $\sigma_{[\delta]}$  путем **линейной экстраполяции**.

## 5.5. Основные закономерности структурообразования в условиях ползучести



По современным представлениям ползучесть металлов рассматривают как результат ряда одновременных процессов:

- упрочняющих** – наклепа, увеличения дислокационной плотности, дисперсионного твердения, измельчения зерен, старения в результате распада неравновесных твердых растворов;
- разупрочняющих** – отдыха, перераспределения дислокаций, рекристаллизации, коагуляции и сфероидизации частиц второй фазы, обеднении твердого раствора жаростойкими легирующими элементами.

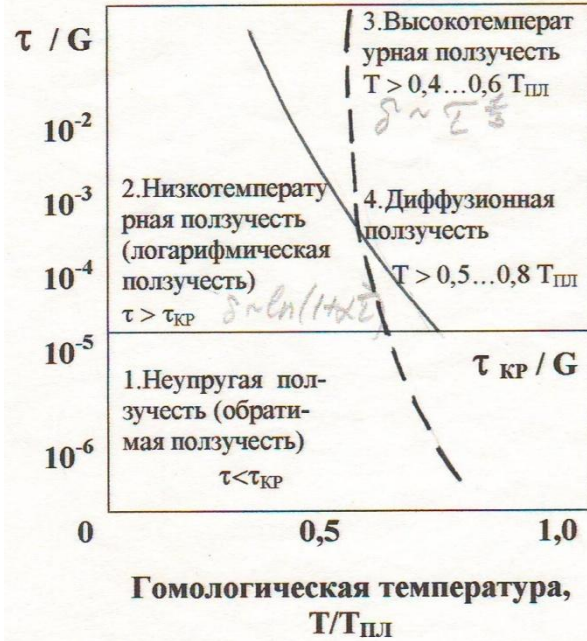
**Релаксацией напряжения** – называется самопроизвольное уменьшение напряжений в материале при постоянном значении деформации.

Сочетание этих процессов в зависимости от температуры и уровня приложенного напряжения, ползучесть протекает по **разным законам**. Наиболее известны **четыре вида ползучести**. По оси абсцисс отложена температура ( $T/T_{пл}$ ), а по оси ординат – отношение приложенного напряжения к модулю сдвига ( $\tau / G$ ).

1. При напряжениях ниже критического напряжения сдвига  $T < T_{кр}$  протекает **неупругая обратимая ползучесть**. При разгрузке материала, имеет место упругое последствие, запаздывание во времени перестройки кристаллической решетки. Она обычно не опасна для конструкций, поэтому специальных испытаний на ползучесть в этих условиях не проводят.

2. При напряжениях выше критического напряжения сдвига  $T > T_{кр}$  протекает **низкотемпературная логарифмическая ползучесть**, по закону:  $\delta = a \ln(1 + \alpha t) + b$ . В этих температурно-временных условиях интенсивно развивается поперечное скольжение дислокаций и не успевает проходить достаточно полный термический возврат.

## 5.5. Основные закономерности структурообразования в условиях ползучести



- При температуре  $T > 0,4...0,6 T_{пл}$  развивается наиболее важная для практики **высокотемпературная ползучесть**. На неустановившейся стадии **скорость ползучести** подчиняется уравнению:  $V_p = a \tau^{-2/3}$ . Относительное удлинение аппроксимируется уравнением:  $\delta = \beta \tau^{1/3}$ . В этих температурно-временных условиях интенсивно развивается **переползание дислокаций**. Эта ползучесть может развиваться при напряжениях значительно меньших макроскопического предела текучести поликристаллического материала.
- При температуре  $T > 0,5...0,8 T_{пл}$  и низких напряжениях реализуется **диффузионная ползучесть**.

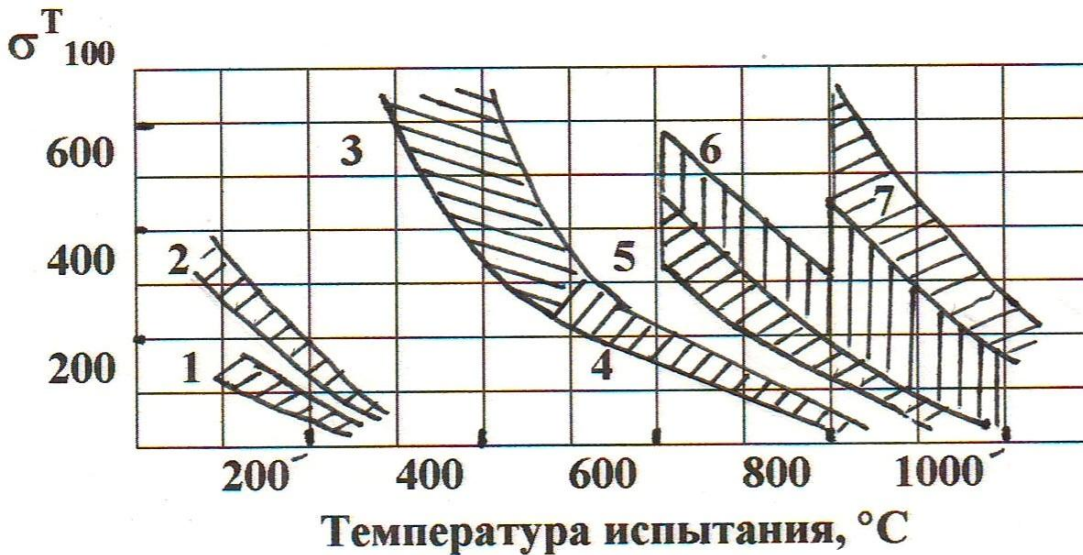
Показано, что окончание стадии **неустановившейся ползучести** сопровождается формированием в испытуемом материале дислокационной **субзеренной структуры**. Снижение напряжения и повышение температуры приводит к увеличению размера субзерен. На стадии **установившейся ползучести** устанавливается размер субзерен, отвечающий заданному уровню напряжения. По мере накопления деформации, происходит увеличение разориентировки между субзернами.



При  $T < 0,3 T_{пл}$  – **низкотемпературная ползучесть**. Границы зерен препятствуют внутризеренному скольжению и приводят к упрочнению.  
 При  $T > 0,5 T_{пл}$  – **высокотемпературная ползучесть**. Происходит проскальзывание по границам зерен.

## 5.6. Жаропрочные материалы. Способы повышения жаропрочности.

Развитие техники связано с ростом эффективности рабочих процессов. В паровых двигателях и двигателях внутреннего сгорания, в котельных и других нагревательных и теплообменных установках, в реакторах, арматуре и резервуарах для высокотемпературных сред, в штампах и литейных формах, в трущихся с высокой скоростью и нагрузкой деталях, в частности, в инструментах для обработки металлов резанием, требования к жаропрочности материалов весьма высоки. Достаточно сказать, что в современных паровых котлах и турбинах рабочие температуры достигают  $600^{\circ}\text{C}$ , в газовых турбинах  $800\text{...}1000^{\circ}\text{C}$  и более. Поэтому все время создаются новые жаропрочные материалы, повышаются требования к их эксплуатационным свойствам, особенно к длительной прочности ( $\sigma_{100}^{800} = 150 \text{ МПа}$ ), минимальной ползучести ( $\Delta l < 0,2\%$ ).



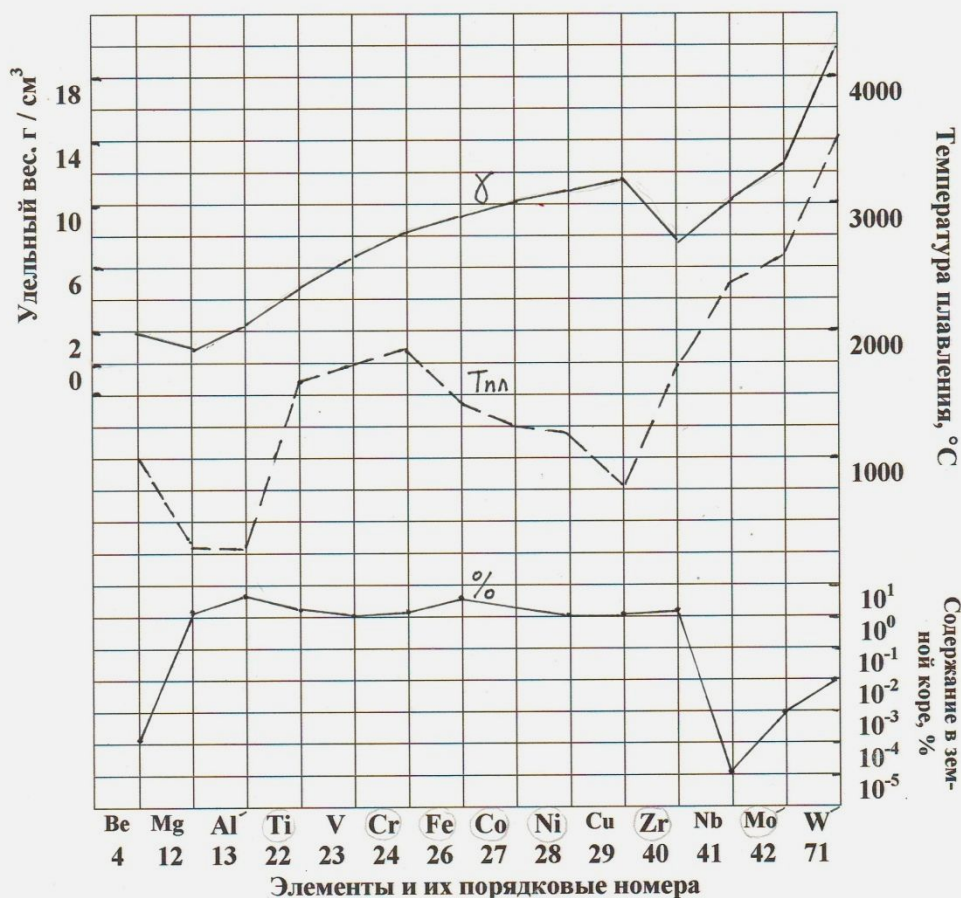
Сравнительная оценка различных материалов по длительной прочности при различных температурах. 1 – Магниево-алюминиевые сплавы; 2 – Алюминиевые сплавы; 3 – Титановые сплавы; 4 – Жаропрочные нержавеющие стали; 5 – Жаропрочные аустенитные стали; 6 – Никелевые сплавы; 7 – Молибденовые сплавы

Представим сравнительные данные различных сплавов по их жаропрочности. Видно, что наиболее высокие прочностные свойства при температурах испытания  $800\text{...}1000^{\circ}\text{C}$  сохраняют сплавы на основе никеля и молибдена. Наименее жаропрочными, но и самыми легкими являются сплавы на основе магния и алюминия.

Металл основы	Максимальные рабочие температуры, $^{\circ}\text{C}$
Mg, Al	200...300
Fe, Ti	500... 800
Fe, Co, Ni	800...1000

## 5.6. Жаропрочные материалы. Способы повышения жаропрочности.

Перечислим основные условия выбора металла основы для создания жаропрочных сплавов: широкое распространение в природе; высокая температура плавления; небольшой удельный вес. На графике приведены данные по распространению в земной коре, температуре плавления и удельному весу важнейших металлов и металлоидов, имеющих значение в создании жаропрочных сплавов. В качестве металлов основы для сплавов, работающих при разных температурах, могут быть использованы:



Важнейшими элементами по их назначению в области применения в жаропрочных материалах являются: в качестве металла основы – **Mg, Al, Ti, Fe, Co, Ni, Zr, V, Cr, Mo, Nb**; в качестве металлоидов для тугоплавких соединений – **B, C, N, O, Si**

Бориды		Карбиды		Нитриды		Оксиды	
Состав	T <sub>пл</sub> , °C	Состав	T <sub>пл</sub> , °C	Состав	T <sub>пл</sub> , °C	Состав	T <sub>пл</sub> , °C
HfB <sub>2</sub>	3250	HfC	4200	TaN	3090	ThO <sub>2</sub>	3000
TaB <sub>2</sub>	3100	TaC	4150	ZrN	2980	ZrO <sub>2</sub>	2700
ZrB <sub>2</sub>	3040	ZrC	3800	TiN	2950	MgO	2640
NbB <sub>2</sub>	3000	NbC	3770	NbN	2300	CeO <sub>2</sub>	2600
TiB <sub>2</sub>	2980	TiC	3410	VN	2050	BeO	2520
VB <sub>2</sub>	2400	W <sub>2</sub> C	3130			CaO	2500
W <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	2600	VC	3023			Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2280
Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	2100	Mo <sub>2</sub> C	2960			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2020
CrB <sub>2</sub>	1900	WC	2867				
		SiC	2600				
		Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	1895				
		Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	1680				
		Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	1520				

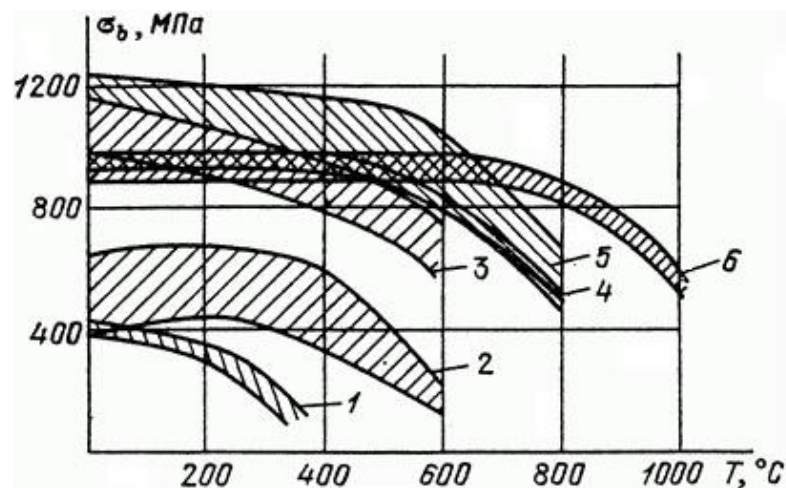
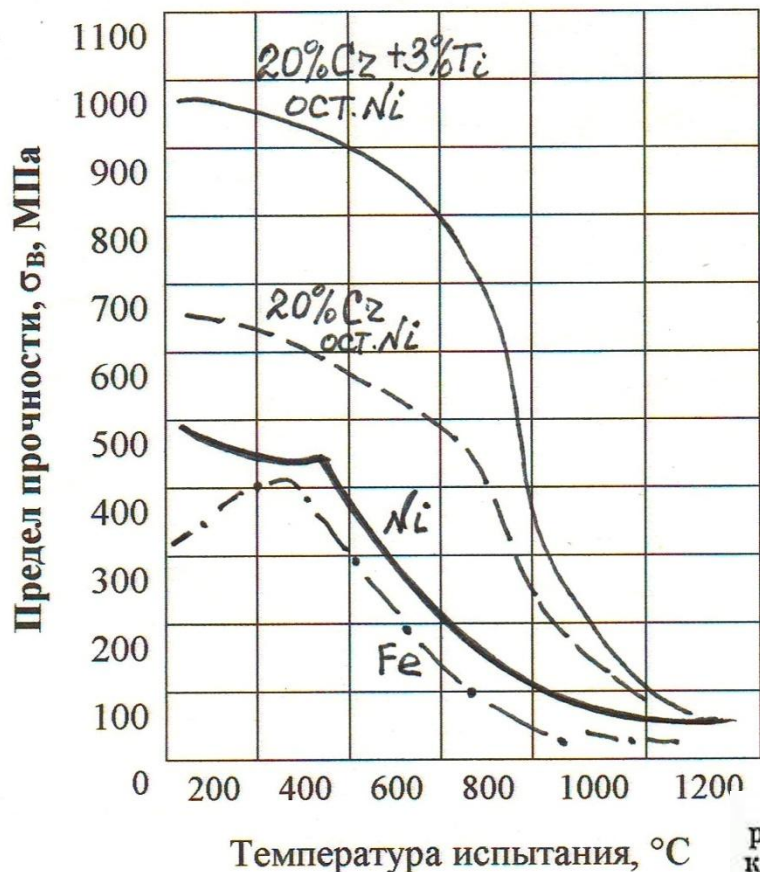
## 5.6. Жаропрочные материалы. Способы повышения жаропрочности.

Важнейшими характеристиками, определяющими применение жаропрочных материалов, являются материалы, являются **кратковременная и длительная температурная прочность и ползучесть** при **высоких температурах**. Как видно из рис., при нагревании, чистые металлы быстро теряют пределы кратковременной и тем более длительной прочности. В чистом никеле снижение прочности начинается с 200°C. Характер изменения прочности технически чистого железа несколько иной. Сначала выявляется некоторое повышение предела прочности в интервале **150...300°C**. Это объясняется прохождением **дисперсионного упрочнения** с участием примесных элементов. Затем происходит резкое снижение предела прочности при нагревании.

Чистые железо и никель в интервале рабочих температур 800...900°C имеют предел кратковременной прочности не более  $\sigma_B < 20...30$  МПа. Предел длительной прочности будет еще ниже и составит примерно

$$\sigma_{1000}^{800} = (1/3...1/4)\sigma_B < 10 \text{ МПа.}$$

Приведенные данные показывают, что чистые металлы не могут служить в качестве жаропрочных материалов.



1 — алюминиевые сплавы (АК4-1, ВД-17); 2 — углеродистые стали (сталь 20, сталь 45); 3 — титановые сплавы ВТЗ; 4 — хромоникелевые стали; 5 — деформируемые жаропрочные сплавы на никелевой основе; 6 — литые жаропрочные сплавы на никелевой основе

## 5.6. Жаропрочные материалы. Способы повышения жаропрочности.

Существуют следующие **способы создания металлических систем** (жаропрочных сплавов), в которых имеет место высокотемпературное упрочнение чистых металлов.

1. Формирование многокомпонентных **ограниченных твердых растворов** за счет одновременного легирования атомами, *повышающими энергию межатомных связей*. С увеличением числа компонентов, повышается температура упрочненного состояния.

2. **Замедление диффузии** за счет **легирования** и **уменьшения дефектов** кристаллического строения (например, уменьшение предварительного наклепа), . Известно, что диффузия в металле замедляется при формировании атомами более плотной упаковки (например, **со структурой ГЦК (Ni), ГПУ (Ti) – типа**). Следовательно, металл в **литом состоянии** или подвергнутый полигонизации после деформации, является **более жаропрочным**.

3. Формирование, при распаде пересыщенных твердых растворов, **избыточных дисперсных металлических фаз**, их выделение и сохранение до высоких температур в течение длительного времени. Например, в сплаве ЭИ437 (нихром) состава **Ni + 20%Cr + 3% Ti**.

4. Высокотемпературное **упрочнение границ зерен** за счет добавок поверхностно-активных элементов (п.а.э.), например **бора** в количестве **0,010...0,025%**, повышающих энергию связи между атомами Fe и Ni. В этом случае наилучший эффект достигается на крупнозернистых материалах с меньшей протяженностью границ зерен. Однако, при этом, пластические свойства снижаются.

5. Создание **композиционных материалов** с волокнами сапфира ( $\alpha - Al_2O_3$ ), графита, карбидов ( $B_4C$ , SiC). В качестве пластической связки используются Cu, Al, Ni.

Перечислим широко известные жаропрочные материалы:

<b>На основе Fe</b>	<b>На основе Ni</b>
34ХН1МА	ЭИ437Б
18Х11МНФБ (ЭП291)	ХН55МВЮ (ЭП454)
20Х12ВНМФ (ЭП428)	ХН62МВКЮ (ЭИ867)
	ХН80ТБЮ (ЭЮ607)



## Контрольные вопросы по Теме 5

1. Перечислить основные стадии кривой ползучести во временной последовательности:
2. Понижение (повышение) температуры нагрева деталей машин во время их эксплуатации приводит к изменению (не изменению) предела ползучести?
3. Повышение (понижение) напряжения в материале деталей машин во время эксплуатации приводит к изменению (не изменению) предела длительной прочности?
4. Дать определение параметров, используемых при оценке предела ползучести:  $[\delta]$ ,  $[\tau]$ ,  $[V_p]$
5. Дать определение предела ползучести.
6. Основные известные механизмы ползучести?
7. Нарисовать кривую ползучести. По кривой определить предел ползучести.
8. Дать определение предела длительной прочности.
9. Нарисовать кривую длительной прочности. По кривой определить предел длительной прочности.
10. Условное обозначение предела ползучести (предела длительной прочности)?

**Спасибо  
за внимание**