

КУРС ЛЕКЦИЙ-ПРЕЗЕНТАЦИЙ

по дисциплине

**«Проектирование  
сварных конструкций»**

лекция №11

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ:

к.т.н., ст. преп. кафедры «ОиТСП»

БЕНДИК Татьяна Ивановна

# СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИИ

## **Тема 6. Работоспособность сварных соединений при высоких температурах.**

- Механические свойства основного металла и сварных соединений при высоких температурах.
- Ползучесть и релаксация.
- Пределы ползучести, длительной прочности и их определение. Влияние механической неоднородности на свойства сварных соединений при высоких температурах.
- Жаропрочность сварных соединений.
- Расчет сварных соединений на прочность при высоких температурах.

## Механические свойства основного металла при высоких температурах

Модули упругости  $E$  и сдвига  $G$  снижаются с ростом температуры, в то время как коэффициент Пуассона  $\mu$  несколько возрастает

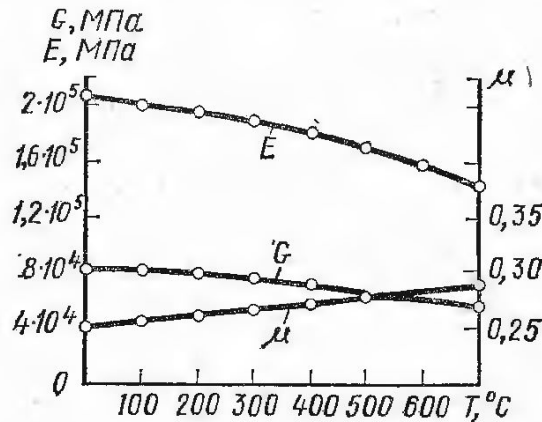


Рис. 7.3. Зависимость модулей упругости  $E$ ,  $G$  и коэффициента Пуассона  $\mu$  от температуры для стали 25

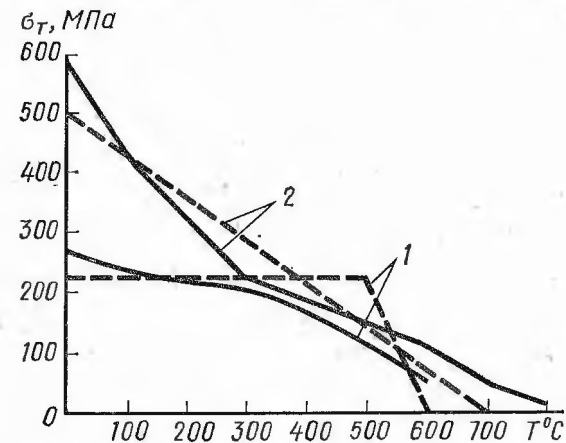


Рис. 7.5. Зависимость предела текучести металлов от температуры:  
1 — низкоуглеродистая сталь; 2 — титановый сплав

Экспериментальные сложные графики заменяют схематизированными (пунктирные линии). Для низкоуглеродистой стали предел текучести при изменении температуры от 0 до 500 °С принимают постоянным, а затем понижающимся до нуля при 600 °С. В действительности и при  $T \gg 600$  °С предел текучести металла не равен нулю.

С ростом температуры в металле снижается прочность межатомных связей. Деформации и напряжения могут изменяться во времени при постоянных нагрузках.

Различают два основных процесса: **ПОЛЗУЧЕСТЬ И РЕЛАКСАЦИЮ**.

*Изменение деформационного состояния металла с течением времени при постоянных напряжениях называют **ПОЛЗУЧЕСТЬЮ**.*

*Изменение напряжений во времени при постоянных деформациях – **РЕЛАКСАЦИЕЙ**.*

При температура 0.3-0.4Тпл процесс ползучести выражен слабо. При более высоких температурах характерные кривые ползучести имеют 3 основных стадии:

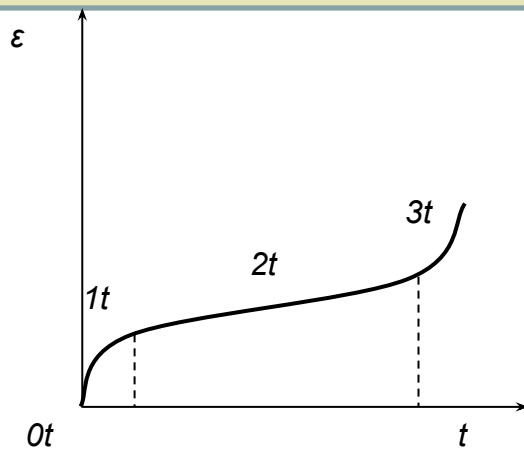


Рис. 4.1. Кривая ползучести

1 – стадия неустановившейся ползучести, скорость ползучести уменьшается во времени;

2 – стадия установившейся ползучести, скорость ползучести слабо меняется с течением времени либо постоянна;

3 – стадия разрушения, интенсивный рост скорости ползучести.

При эксплуатации конструкций наибольший интерес представляет вторая стадия как самая продолжительная во времени и третья стадия, связанная с разрушением.

С ростом напряженного состояния и температуры скорость ползучести возрастает и описывается уравнением ползучести:

$$\dot{\varepsilon}_{\min} = k \cdot \sigma^n$$

где  $\dot{\varepsilon}_{\min} = \frac{d\varepsilon}{dt}$  изменение пластической деформации во времени (скорость) на второй стадии ползучести;

$k, n$  – коэффициенты, зависящие от температуры и состава металла,  
 $\sigma$  - напряжение при одноосном растяжении.

## Механические характеристики металлов при высоких температурах

Одной из характеристик конструкций, работающих при высоких температурах, является **предел ползучести  $\sigma_p$** , который может определяться двояко:

1) Для машин, работающих с малой длительностью (не более сотен часов), за **предел ползучести принимают напряжение, при котором деформация за данный промежуток времени достигает значения, установленного техническими условиями**. Деформация включает в себя первую и вторую стадии.

2) Для машин, работающих длительное время, учитывают деформацию на установившейся стадии. **Пределом ползучести в данном случае является напряжение, при котором скорость деформации соответствует установленной техническими условиями**.

Для деталей энергетических установок скорость ползучести принимают равной 1 % за  $10^5$  часов (примерно 11,5 лет) и предел ползучести обозначают как  $\sigma_{T_{10^5}}$ , где  $T$  – температура испытания, °C.

Испытания для определения предела ползучести проводят в течение  $2 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^3$  часов при заданной температуре и заданных (обычно трех) уровнях напряжений. Затем, используя формулу (1) откладывают результаты испытаний на графике  $\sigma = f(\dot{\varepsilon}_{\min})$

и экстраполируют прямую в точку установленной скорости деформации, например,  $10^{-5} \%$ /ч (для получения значения  $\sigma_n$ )

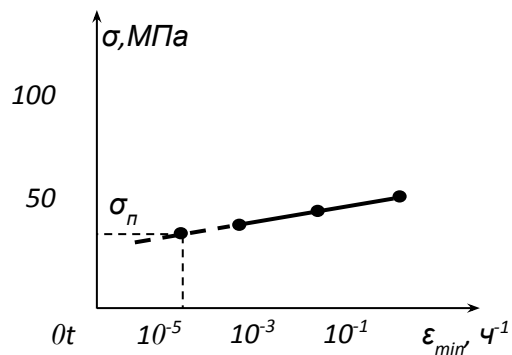


Рис. 4.2. Зависимость  $\sigma = f(\dot{\varepsilon}_{\min})$

Испытания металла на длительную прочность проводят до разрушения образца. Чем выше температура и напряжения, тем раньше происходит разрушение. Точка перелома прямой линии (рис.4.3) соответствует переходу от вязких разрушений с образованием «шейки», к разрушению хрупкому (межзеренному). Переход к хрупким разрушениям происходит за счет постепенного ослабления границ зерен. На каждом из прямолинейных участков (рис. 4.3) справедлива степенная зависимость

$$t = A \cdot \sigma^{-m}$$

где  $t$  – время до разрушения,  $A$  и  $m$  – постоянные для данного материала, температуры, характера разрушения.

Зависимость (4.2) позволяет экстраполировать результаты кратковременных испытаний на более длительный срок, но не более чем на порядок.

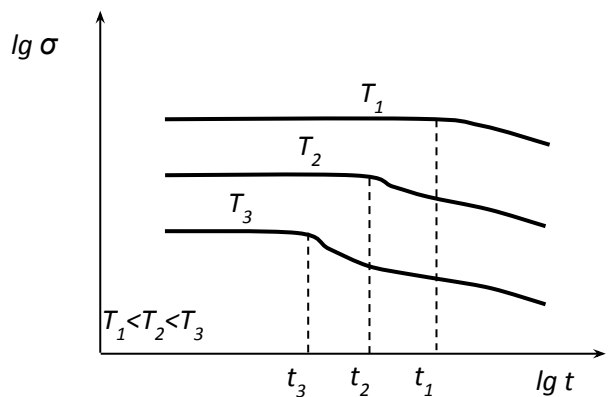


Рис. 4.3 Зависимость  $\lg \sigma = f \lg t$

Прочность материала при высокой температуре, находящемся под нагрузкой в течение длительного периода времени, оценивается **пределом длительной прочности  $\sigma_{д.п.}$  – напряжением, вызывающим разрушение при заданной температуре через определенный промежуток времени (см рис 6.5).**

Для стационарных установок принимают:  $\sigma_{д.п.} = \sigma_{10^5}$ , т.е. напряжение, приводящее к разрушению через  $10^5$  часов.

Для транспортных установок используют:  $\sigma_{10^2}$ ,  $\sigma_{10^3}$ ,  $\sigma_{10^4}$ .

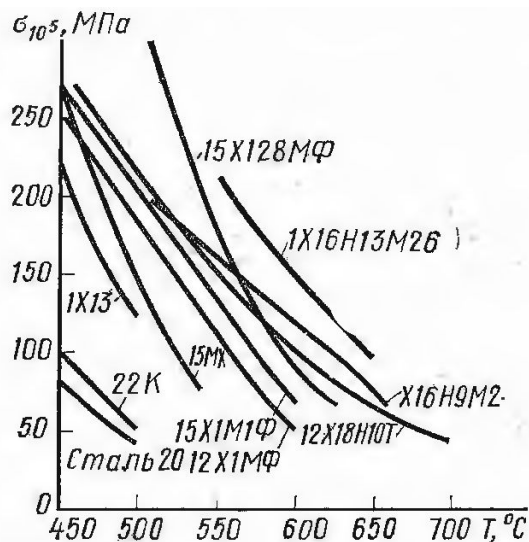


Рис. 6.5. Пределы длительной прочности  $\sigma_{10^5}$  для металлов в зависимости от температуры

Для определения длительной прочности сварного соединения чаще всего используют испытание на одноосное растяжение (рис. 4.5). Образец включает в себя металл шва, околошовную зону и основной металл.

Испытание при расположении шва поперек образца (рис. 4.5,б) позволяет выявить наименее прочный участок, а при расположении шва вдоль образца (рис. 4.5,а) – наименее пластичный участок сварного соединения.

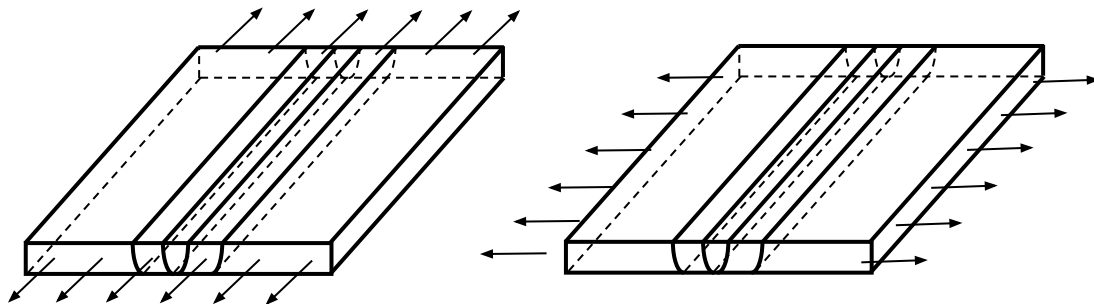


Рис. 4.5. Испытания: а – на пластичность, б – на прочность

Пластичность металла оценивается по удлинению образцов до разрушения и существенно зависит от характера разрушения. При вязком разрушении происходит монотонное уменьшение пластичности по мере увеличения времени до разрушения (рис. 4.4). При переходе от вязкого разрушения к хрупкому пластичность резко падает.

**Разрушение конструкций, в том числе и сварных, при высоких температурах происходит без заметной пластической деформации, т.е. хрупко.**

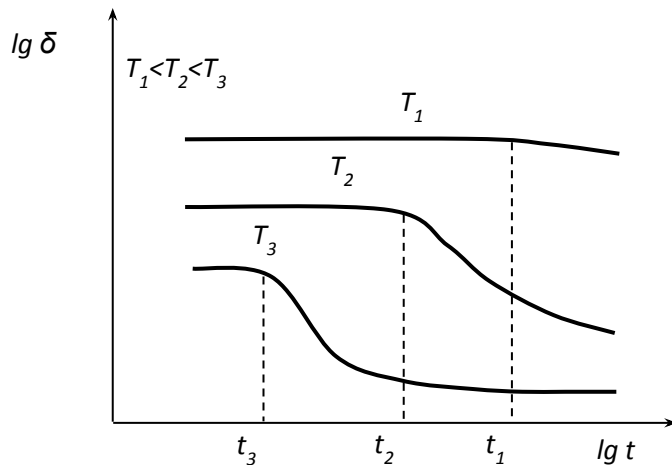


Рис. 4.4. Зависимость  $\lg \delta = f \lg t$

### Закономерности изменения пластичности при высоких температурах состоят в следующем:

- 1) При относительно невысоких температурах в случае вязкого разрушения пластичность снижается с уменьшением скорости деформации
- 2) С увеличением температуры и уменьшением скорости деформации происходит переход к межзеренному разрушению, что влечет за собой существенное снижение пластичности
- 3) В некотором диапазоне скоростей деформации пластичность достигает минимума, и при дальнейшем уменьшении скорости либо не меняется, либо слабо повышается.

Значения минимума пластичности определяются характером легирования, структурой, зависящей от термообработки, предварительной пластической деформацией, снижающей пластичность, наличием концентраторов напряжений.



Свойства сварных соединений при высоких температурах эксплуатации отличаются от свойств основного металла при тех же температурах главным образом по двум причинам:

- 1) В сварных соединениях возникают участки (металл шва, зона термического влияния) с иными механическими свойствами, чем у основного металла. Отличия также наблюдаются в химическом составе и структуре.
- 2) В сварных соединениях возникает концентрация напряжений, которая при высоких температурах действует как фактор концентрации пластической деформации ползучести.

Таблица 4.2

Марка стали	Тип электрода	$T_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	Длительная прочность, МПа								
			Основной металл			Металл шва			Сварное соединение		
			Продолжительность испытания, ч								
			$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^3$	$10^4$	$10^5$
20	Э42А	420	170	125	80	210	140	90	170	125	80
15ХМ	ЭХМ	510	240	165	120	260	170	110	170	125	80
12Х1МФ	ЭХМФ	565	170	130	100	190	130	80	170	120	80
12Х18Н12Т	ЭА1М2Фа	650	130	100	70	180	140	100	130	100	70
Х15Н35В3Т	ЭА4В3Б2	650	240	210	185	260	210	170	240	200	160

Длительная прочность сварных соединений термически упрочненных сталей может быть существенно ниже прочности основного металла вследствие разупрочнения в зонах термического влияния.

В хромомолибденованадиевых сталях разупрочняется участок высокого отпуска и неполной перекристаллизации, в аустенитных сталях и сплавах с интерметаллидным упрочнением — участок вблизи линии сплавления, нагреваемый до температур аустенизации.

Зоной разупрочнения может быть и сам шов, если не обеспечена его равнопрочность основному металлу, что обычно более вероятно в сталях с высокой степенью легирования.

## Расчет сварных соединений на прочность при высоких температурах

Расчет сварных соединений, работающих при высоких температурах, выполняется по допускаемым напряжениям, которые назначают в зависимости от допускаемых напряжений для основного металла, способа сварки, термической обработки и контроля качества сварных соединений. Допускаемые напряжения для основного металла принимают равными минимальному из следующих соотношений:  $[\sigma] = \sigma_B/n_1$ ;  $[\sigma] = \sigma_T/n_2$ ;  $[\sigma] = \sigma_{д.п}/n_3$ ;  $[\sigma] = \sigma_{п}/n_4$ , где  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{д.п}$  и  $\sigma_{п}$  — гарантированные при температуре эксплуатации соответственно временное сопротивление, предел текучести, предел длительной прочности и предел ползучести (для весьма точных узлов). Коэффициенты запаса  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$  принимают в соответствии с табл. 6.2.

Таблица 6.2

Коэффициенты запаса

Тип конструкции	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
Стационарные котельные установки (трубы, барабаны и т.п.)	2,6	1,5	1,5	1,0
Стационарные турбинные установки	3,75—4,0	1,65—2,0	1,5—3,0	1,0

В зависимости от рабочей температуры характеристиками для расчета на прочность являются:

при температуре ниже 250 °С (для углеродистых сталей и стали 12Х1МФ) — временное сопротивление  $\sigma_b$ ;

при температуре 260—420 °С (для углеродистых сталей) и ниже 550 °С (для стали 12Х18Н10Т) — предел текучести  $\sigma_t$ ;

при температуре выше 420 °С (для углеродистых сталей), выше 470 °С (для стали 12Х1МФ), выше 550 °С (для сталей 12Х18Н10Т и 12Х18Н12Т) — предел длительной прочности  $\sigma_{д.п.}$

Допускаемые напряжения для сварных соединений [ $\sigma'$ ] определяют умножением допускаемых напряжений для основного металла [ $\sigma$ ] на коэффициент прочности  $\phi$ , учитывающий отрицательное влияние сварки. При полном проваре по всей толщине, проведении в необходимых случаях термической обработки и контроле качества шва по всей длине неразрушающими методами  $\phi = 1$  для углеродистой, низколегированной марганцовистой и хромомолибденовой сталей, сталей типа 12Х18Н10Т и им подобных;  $\phi = 0,8$  для хромомолибденованадиевой и высокохромистой сталей. Коэффициент прочности стыковых соединений углеродистой и низколегированной марганцовистой сталей, контроль качества которых неразрушающими методами производится не по всей длине, принимается в зависимости от способа сварки:  $\phi = 0,85$  при автоматической двусторонней сварке под флюсом, электрошлаковой сварке, контактной сварке, односторонней ручной и автоматической сварке под флюсом на подкладке или с подваркой корня шва, ручной сварке в  $\text{CO}_2$  или аргоне;  $\phi = 0,7$  при всех других, не указанных выше видах сварки.

Для других сварных соединений и новых марок сталей допускаемые напряжения должны устанавливаться по результатам испытаний сварных соединений.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

**КАКИЕ БУДУТ ВОПРОСЫ?**