

# Лекция № 14

«Сварочный термический цикл.  
Напряжения и деформации при  
сварке»

# ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ ПРИ СВАРКЕ

Распределение температуры в свариваемом металле зависит от мощности теплового источника, физических свойств металла (теплоемкость, температура плавления и др.), размеров свариваемой конструкции, скорости перемещения источника теплоты и т.д.

$T_0$  – температура окружающей среды

$q$  – источник теплоты;

$V_{св}$  – скорость сварки;

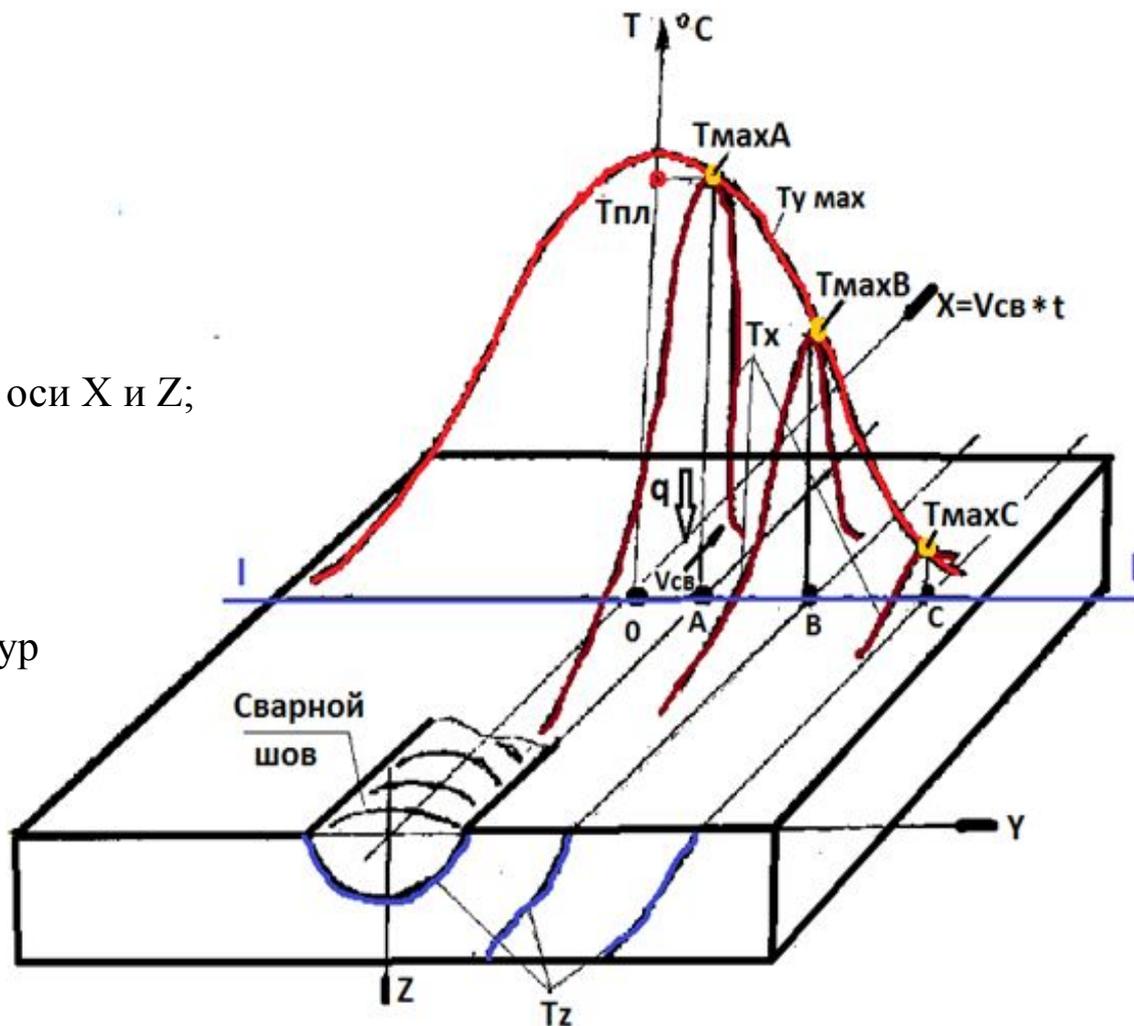
$T_{пл}$  – температура плавления металла;

$T_x$  и  $T_z$  – распределение температур по оси X и Z;

$T_{maxA}$ ;  $T_{maxB}$ ;  $T_{maxC}$  – макс. температура нагрева в точках A, B и C;

$T_{y\ max}$  – распределение макс. температур вдоль оси Y;

$t_{maxA}$ ;  $t_{maxB}$ ;  $t_{maxC}$  – время достижения макс. температуры в точках A, B и C;

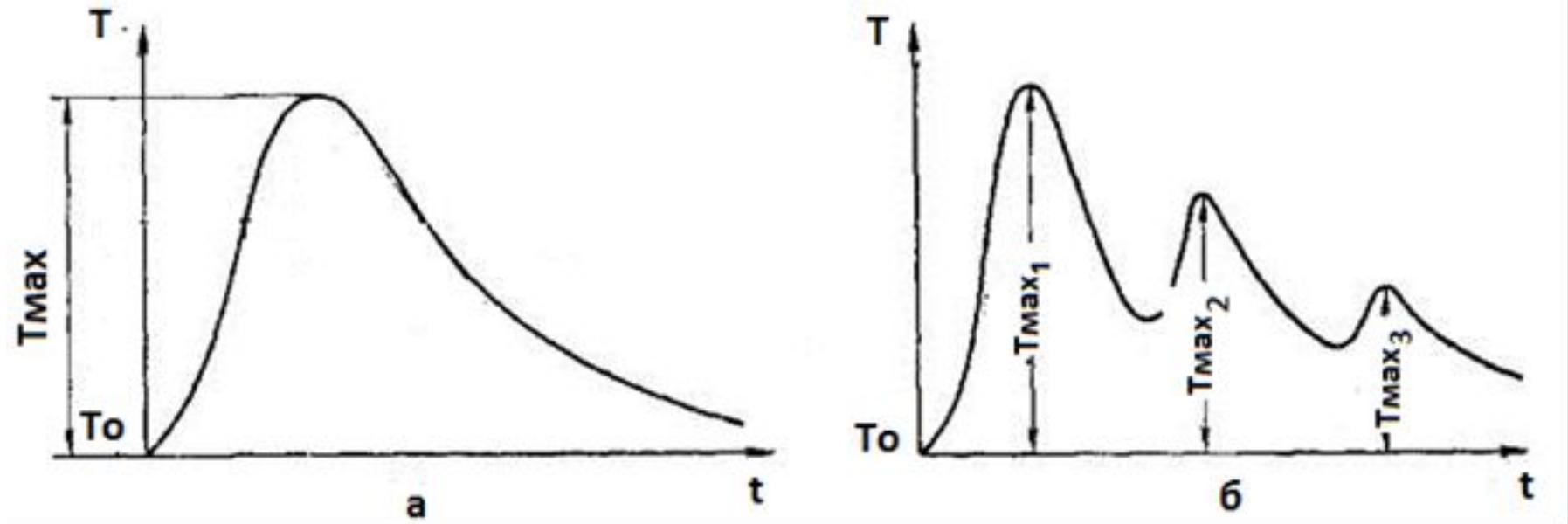


**Температурное поле, создаваемое источником теплоты в металле сварного изделия**

## Термический цикл сварки

Металл в любой точке **сварного соединения (Св-С)** испытывает нагрев и последующее охлаждение.

Изменение  $T$  в какой либо точке Св-С от времени ( $t$ ) называется сварочным термическим циклом (СТЦ) (рис. а и б).



а и б – термический цикл однопроходной и многопроходной сварки

$T_{max}$  – максимальная  $T$  нагрева в точке Св-С при укладке одного валика при однопроходной сварке;

$T_{max_1}$  - ... в точке Св-С при укладке первого валика многопроходного соединения;

$T_{max_2}$  - .....в той же точке Св-С при укладке второго .....

$T_{max_3}$  - ..... в той же точке Св-С при укладке третьего .....

## Параметры сварочного термического цикла

$T_0$  - температура окр. среды;

$T_{max}$  – макс. температура нагрева;

$T_{upz}$  – температура интенсивного роста зерна (зависит от хим. состава металла ~ 900-1100 °C);

$t_{upz}$  – время пребывания выше температуры интенсивного роста зерна, с;

$t_{8/5}$  - время пребывания в интервале температур 800 – 500 °C;

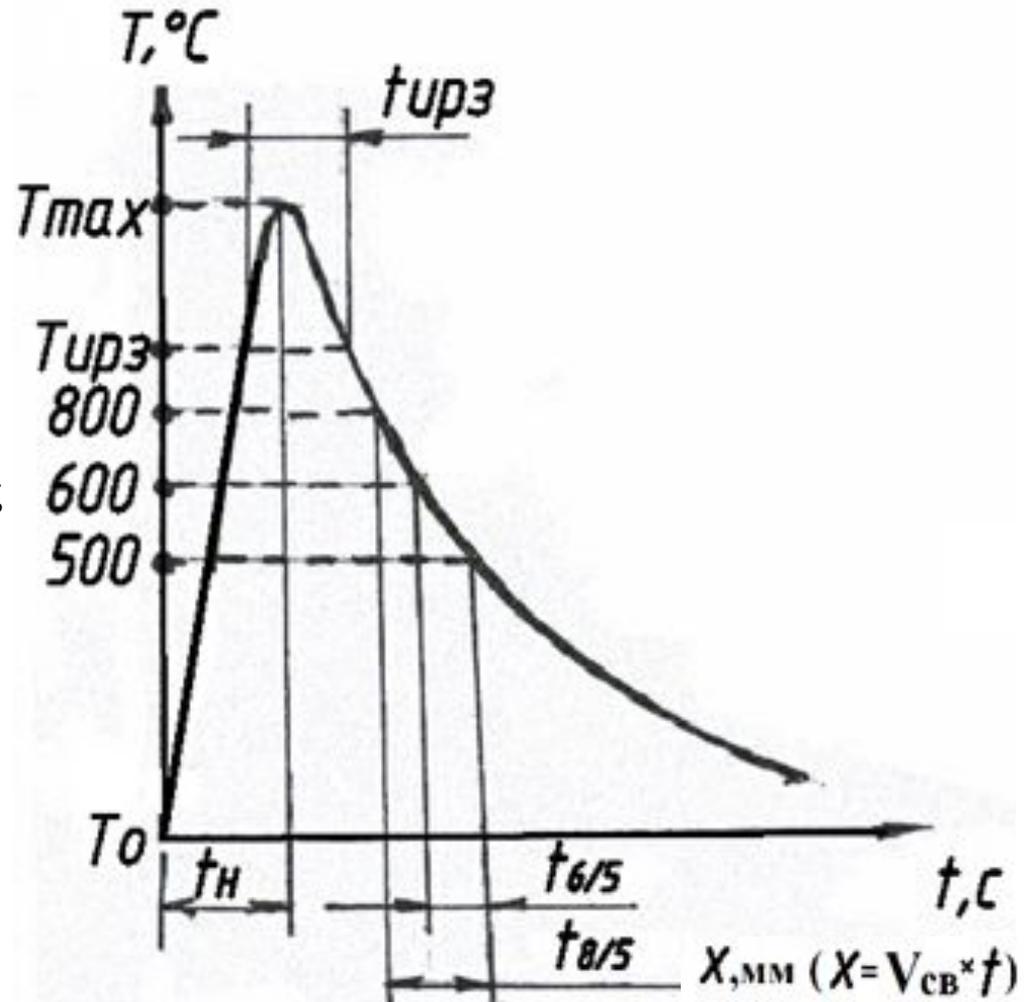
$t_{6/5}$  – время пребывания в интервале температур 600 – 500 °C, с;

$t_H$  – время нагрева до максимальной температуры, с;

$V_{св}$  – скорость сварки, м/ч;

$W_{6/5}$  – скорость охлаждения в интервале температур 600–500 °C/с.

$W_{6/5} = (600-500) / t_{6/5} = 100 / t_{6/5}, \text{ } ^\circ\text{C/с}$



# ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ НА СВОЙСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ (СВ-С)

Под действием температурного поля источника теплоты в металле Св-С происходят *физико-химические* и *термодеформационные процессы*.

**I. Физико-химические процессы** при сварке характеризуются фазовыми и структурными превращениями.

Полнота и степень этих превращений зависит от параметров СТЦ и химического состава материала

## ***1. Фазовые:***

а - полиморфные превращения (образование в зависимости от скорости охлаждения перлита, сорбита, троостита, бейнита и мартенсита);

б - растворение (при нагреве) и выделение (при охлаждении) новых фаз при изменении растворимости примесей.

## ***2. Структурные:***

а - рост зерна в условиях сварочного термического цикла;

б - рекристаллизация (рост новых зерен в области низких температур).

В зависимости от  $V_{охл}$  аустенит переходит в одну из структур с одинаковой природой (феррит + цементит); перлит, сорбит, троостит, бейнит и мартенсит.

|                  | <b>Твердость<br/>НВ</b> |
|------------------|-------------------------|
| <b>Перлит</b>    | <b>150-200</b>          |
| <b>Сорбит</b>    | <b>250-300</b>          |
| <b>Троостит</b>  | <b>300-400</b>          |
| <b>Бейнит</b>    | <b>400-550</b>          |
| <b>Мартенсит</b> | <b>600-650</b>          |

Мартенсит снижает пластичность металла и может привести к образованию холодных трещин в шве и ЗТВ

**Размер зерна** зависит от:

- химического состава стали;
- максимальной температуры нагрева  $T_{max}$ ;
- времени пребывания ( $t_{ирз}$ ) выше температуры интенсивного роста зерна ( $T_{ирз}$ )

Чем больше  $t_{ирз}$ , тем больше размер (площадь) зерна.

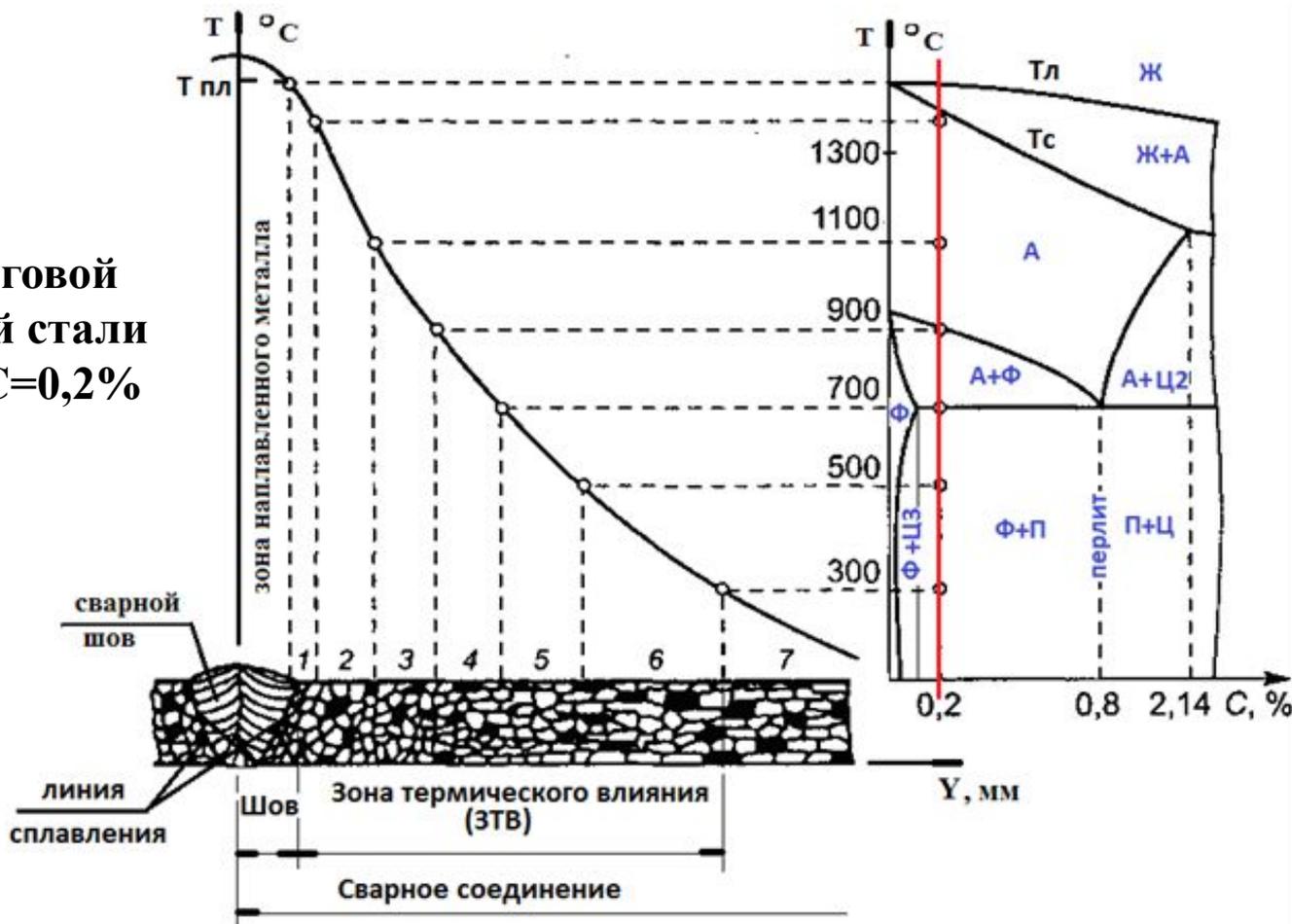
Крупнозернистая структура приводит к снижению пластичности металла и может стать причиной образования трещин в сварном шве и ЗТВ

# Влияние термического цикла сварки на структуру и свойства различных зон СВ-С

При сварке различные точки СВ-С имеют разные СТЦ,  $T_{max}$ ,  $t_{ирз}$ ,  $V_{охл}$ .

Следствие – в СВ-С можно получить слои металла, отличающиеся друг от друга по фазовому составу, структурному состоянию и механическим свойствам

**Схема строения ЗТВ  
СВ-С при однослойной дуговой  
сварке низкоуглеродистой стали  
с содержанием углерода  $C=0,2\%$**





**Зона наплавленного металла (СВАРНОЙ ШОВ)** – перемешанный в жидком состоянии с основным металлом материал электрода (прис. проволоки) или только основной металл.

Литая структура из столбчатых кристаллов (пониженные прочность и пластичность).

**1. Участок неполного расплавления (околошовная зона ОШЗ)** – область (0,1–0,4 мм) с  $T = 1530-1470\text{ }^{\circ}\text{C}$  – переходный от наплавленного металла к основному - проходит граница сплавления

Резкий рост зерен, скопление примесей - наиболее слабое место Св-С с пониженной прочностью и пластичностью.

**2. Участок перегрева** – (0,2... 4 мм) с  $T = 1470 - 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Крупнозернистая структура, пониженные мех. свойства (пластичность, ударная вязкость).

**3. Участок нормализации** — (0,2...4 мм) с  $T = 900... 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Мелкозернистая структура, механические свойства металла выше, чем у осн. металла.



**4. Участок неполной перекристаллизации** — (0,3...3 мм) с  $T = 700...900$  °С.

Смесь мелких перекристаллизовавшихся зерен и крупных зерен, которые не успели перекристаллизоваться.

Более низкие мех. свойства, чем металл предыдущего участка.

**5. Участок рекристаллизации** – (0,3...5 мм) с  $T = 500...700$  °С.

Рост зерна, огрубление структуры и разупрочнение.

**6. Участок старения** – (0,4...6 мм) с  $T = 300 - 500$  °С. Переход от ЗТВ к осн. металлу.

Старение из-за выпадения карбидов железа и нитридов – мех. свойства понижаются.

**7. Основной металл**, который не претерпевал заметных изменений в процессе сварки.

*Участки 1,2,3,4,5,6 – составляют зону термического влияния (ЗТВ)*

Ширина ЗТВ зависит от вида, способа и режимов сварки. Чем меньше тепловое воздействие, тем уже ЗТВ.

|  |                |
|--|----------------|
| При электрошлаковой сварке ЗТВ -       | 25 мм и более; |
| при газовой сварке -                   | 15-20 мм;      |
| при сварке под флюсом средних толщин - | около 10 мм;   |
| ручной дуговой сварке -                | 3–6 мм,        |
| при сварке в защитных газах -          | 1–3 мм;        |
| при лазерной и электронно-лучевой –    | 0,1–0,9 мм.    |

Чем выше скорость нагрева и охлаждения, тем меньше размеры ЗТВ

# МЕРОПРИЯТИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЗТВ

Протяженная ЗТВ, образование мартенсита и рост зерна снижают качество СВ-С. Эти факторы зависят от *вида сварки* и *параметров термического цикла сварки*.

## 1. Вид сварки

Последовательность уменьшения размеров ЗТВ по основным видам и способам сварки:

Электрошлаковая → газовая → автоматическая дуговая под флюсом → РДС → дуговая в защитных газах → контактная → плазменная → электронно-лучевая → лазерная.

## 2. Параметры термического цикла сварки

Оптимальную структуру и размер зерна ЗТВ дает идеальный термический цикл.

*а* – идеальный;

*б* – при электродуговой сварке;

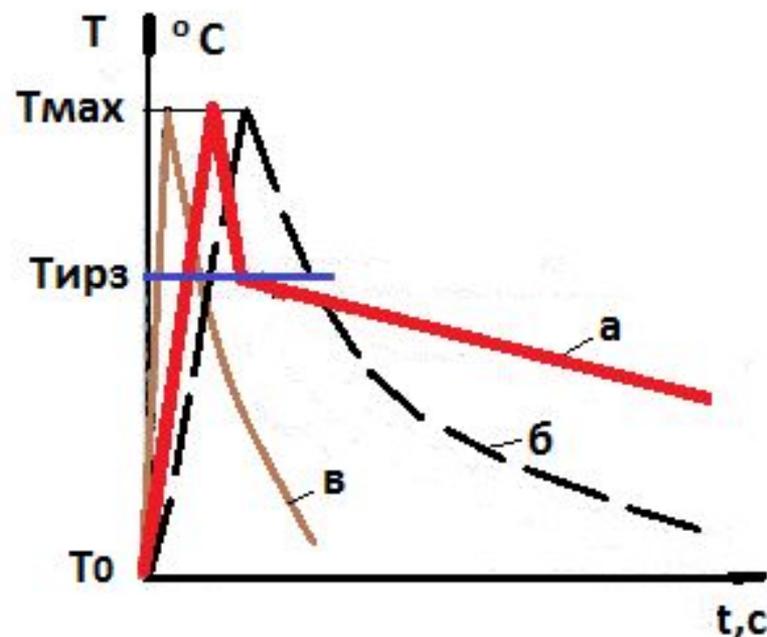
*в* – при электронно-лучевой и лазерной сварке

$T_{\max}$  – максимальная температура нагрева;

$T_{\text{ирз}}$  – температура интенсивного роста зерна.

Малое время пребывания выше  $T_{\text{ирз}}$  сдерживает рост зерна, а медленное охлаждение снижает вероятность образования закалочных структур, что улучшает качество ЗТВ.

Необходимо осуществлять подогрев заготовок.



# ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

при сварке возникают сварочные деформации и напряжения – причина образования трещин, изменения формы и размеров сварного изделия.

Любое силовое или температурное воздействие на тело сопровождается возникновением в нем напряжений и деформаций.

| <b>Напряжения</b>   | <b>Деформации</b>  |
|---|--|
| <b>Напряжение</b> - сила, отнесенная к единице площади сечения тела: $\sigma = P/F$ ,   | <b>Деформация</b> - изменение размеров или формы тела в результате приложения внешних сил или изменения температурных условий.     |
| <b>Внешние напряжения</b> – внеш. нагрузка  | <b>Внешние деформации</b> - внеш. нагрузка   |
| <b>Собственные (внутренние) напряжения</b> – изменение внутр. температурного сост.      | <b>Собственные (внутренние) деформации</b> - изменение внутр. температурного состояния   |
| Напряжения подразделяются на упругие и пластические.                                    | Деформации подразделяются на упругие и пластические.   |
| Если уровень напряжений меньше предела текучести металла, напряжения – <i>упругие</i> , | Деформация <i>упругая</i> , если она исчезает после удаления причин, вызвавших её (напряжения ниже предела текучести)              |
| если равен или превышает предел текучести металла - <i>пластическими</i> .              | Деформация называется <i>пластической</i> , если она не исчезает после удаления причин, вызвавших её (.....выше предела текучести) |

**Собственные напряжения и деформации**, возникающие в результате сварки, называются *сварочными напряжениями и деформациями*.

Основные причины возникновения собственных напряжений в сварных соединениях:

- 1 - неравномерное распределение температур в металле при сварке;
- 2 - литейная усадка сварного шва;
- 3 - фазовые превращения в нагретом металле при сварке.

### **1. Образование собств. напряжений в результате неравномерного нагрева металла**

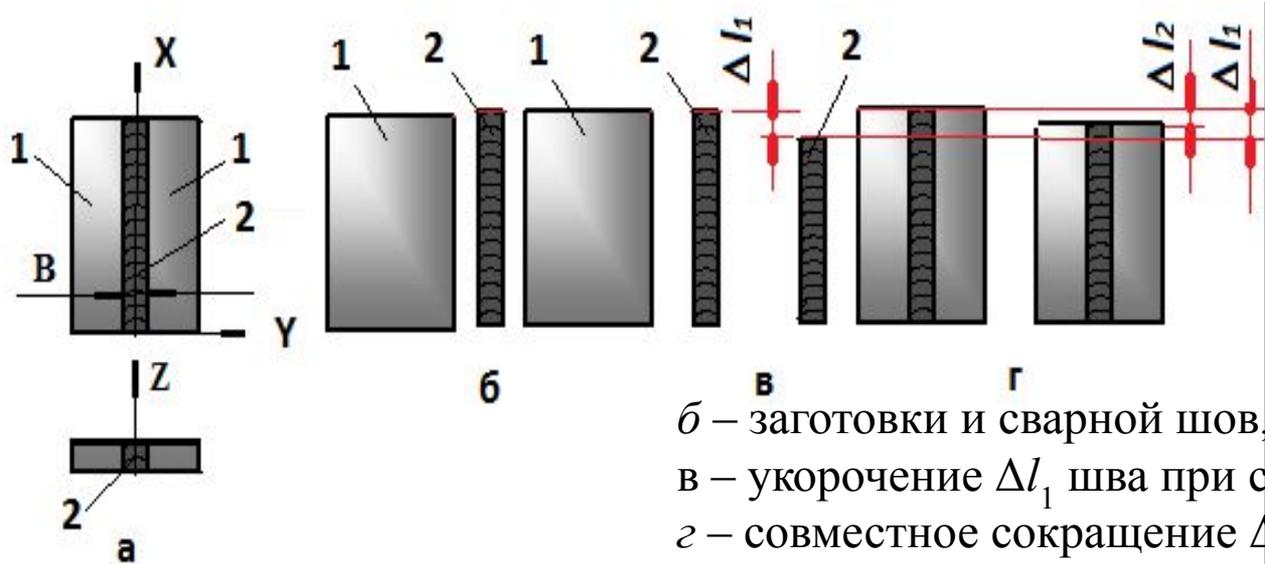
Жесткая связь между нагретыми и холодными участками металла приводит к тому, что расширяющиеся при нагреве и укорачивающиеся при охлаждении слои металла, нагретые до высоких температур, встречают препятствие со стороны холодных слоев. В Св-С возникают собственные напряжения, направленные на преодоление этого препятствия.

### **2. Образование собств. напряжений в результате литейной усадки сварного шва**

При затвердевании объем металла шва уменьшается. Ввиду того, что металл шва жестко связан с основным металлом, остающимся в неизменном объеме, в сварном шве возникают собственные напряжения.

Чем меньше количество расплавленного металла, тем меньше значения напряжений.

**Образование собств. напряжений в результате неравномерного нагрева и литейной усадки**



1 – свариваемые заготовки;  
 2 – сварной шов.  
 B – ширина шва.

*а* - сварное соединение;  
*б* – заготовки и сварной шов, представленные отдельно;  
*в* – укорочение  $\Delta l_1$  шва при свободном сокращении;  
*г* – совместное сокращение  $\Delta l_2$  Св-С.

**1. Укорочение (усадка) Св-С вдоль оси X**

Не нагретая заготовка будет препятствовать сокращению шва (г), после полного остывания он уменьшится не на величину свободного сокращения, а на меньшую величину .  
 В соединении возникнут собственные напряжения.  
 Чем жёстче заготовка, тем больше собственные сварочные напряжения.

**2, 3. Укорочение Св-С вдоль осей Y и Z происходит аналогично (X и Y).**

Распределение температур по оси Z более равномерно, собственные напряжения по толщине меньше, чем вдоль осей X и Y, ими можно пренебречь.

### **3. Образование собственных напряжений в результате фазовых превращений в металле при сварке**

Фазовые превращения при сварке вызывают растягивающие и сжим. собств. напряжения:

- при нагреве углеродистых сталей: феррит → аустенит – объем уменьшается;
- при резком охлаждении высокоуглеродистых сталей аустенит → мартенсит – объем увеличивается;
- при сварке низкоуглеродистой стали напряжения от фазовых превращений практически не изменяются;
- закаливающиеся стали значительно изменяются в объеме из-за фазовых превращений.

### **4.Образование остаточных напряжений при сварке**

Напряжения от неравномерного нагрева, литейной усадки сварного шва и от фазовых превращений суммируясь, образуют собственные сварочные напряжения, которые, как правило, превышают предел текучести металла.

После полного остывания шов окажется пластически растянутым силой, действующей на него со стороны заготовки, а заготовка будет упруго сжата силой со стороны шва.

# ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СВАРКЕ

При сварке происходят продольная (вдоль оси  $X$ ) и поперечная (вдоль оси  $Y$ ) усадки расплавленного металла сварного шва, результат – деформация сварных изделий. Если возникающие напряжения превышают предел текучести металла, в Св-С возникают остаточные деформации, сохраняющиеся после сварки.

## 1. Образование деформаций в плоскости Св-С

### 1.1. Продольная и поперечная деформации Св-С

1 и 3 свариваемые элементы; 2 – сварной шов;

ЦТ – совпадающие центры тяжести сварного шва и Св-С;

$\Delta_{пр}$  – продольная деформация;

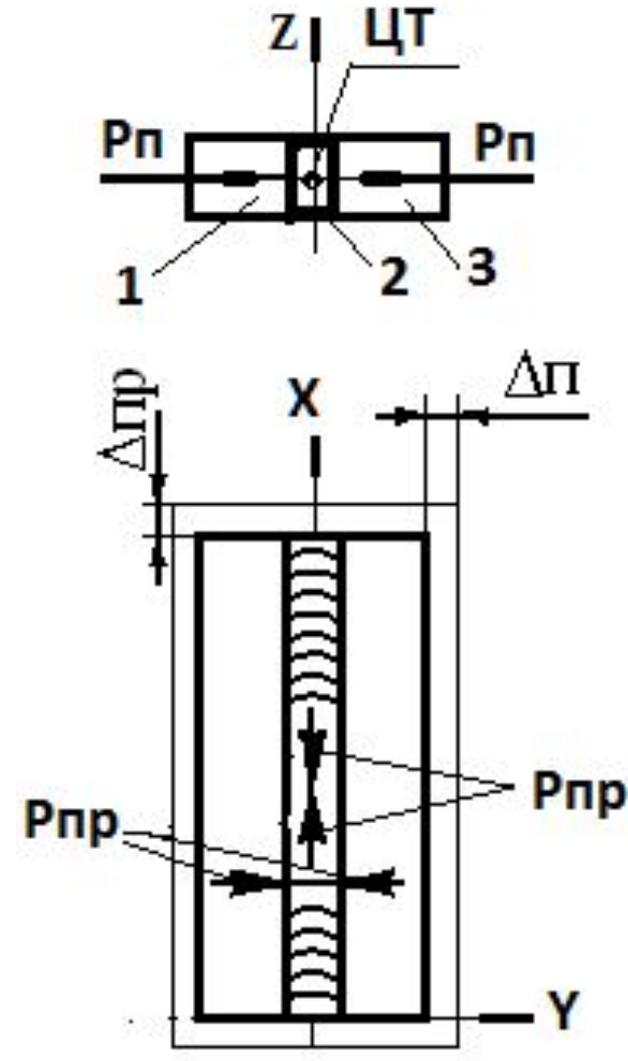
$\Delta_{п}$  – поперечная деформация;

$R_{п}$  – поперечная усадка сварного шва;

$R_{пр}$  – продольная усадка сварного шва.

Продольные и поперечные деформации происходят при симметричной укладке сварных швов (когда центр тяжести (ЦТ) сварного шва и Св-С совпадают).

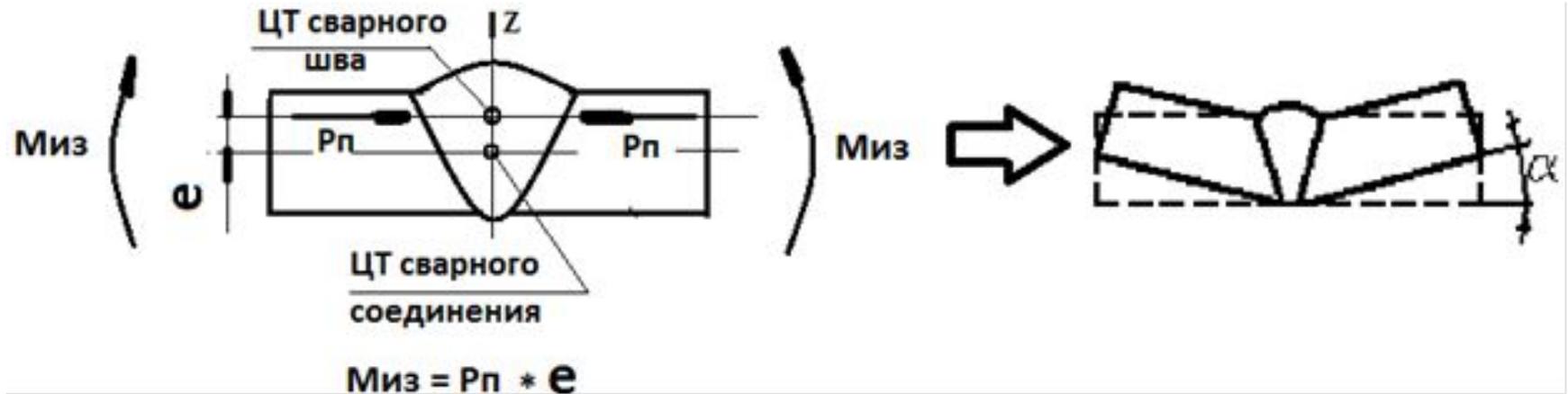
В результате продольных и поперечных деформаций происходит сокращение сварного изделия по длине и ширине.



## 2. Образование деформаций вне плоскости Св-С

### 2.1. Угловые деформации

-происходят под действием поперечной усадки сварного шва



### Схема образования угловой деформации стыкового Св-С

$\alpha$  – угловая деформация Св-С;

$e$  – эксцентриситет;

$R_{п}$  – поперечная усадка сварного шва;

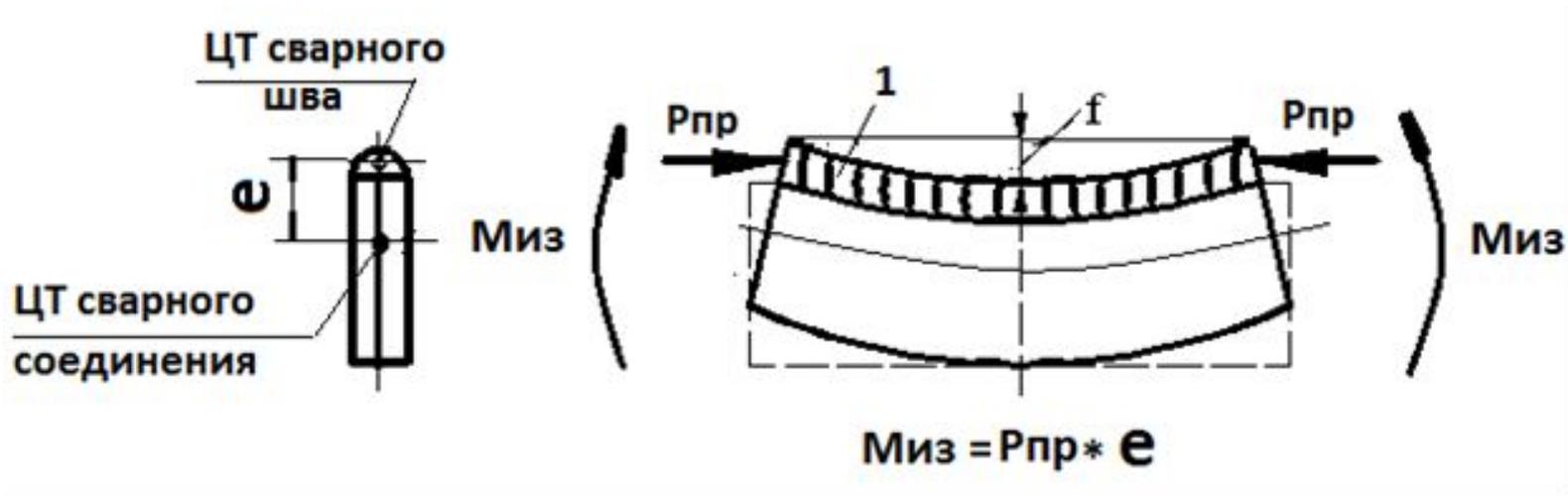
$M_{из}$  – изгибающий момент.

Угловые деформации происходят в тех случаях, когда центр тяжести (ЦТ) сварного шва и Св-С не совпадают. В результате образуется эксцентриситет  $e$ .

Поперечная усадка  $R_{п}$ , действуя на плече  $e$  создает изгибающий момент  $M_{из}$  и возникает угловая деформация  $\alpha$  ( $3 - 7^\circ$  от толщины металла).

## 2.2. Деформации изгиба

- происходят под действием продольной усадки сварного шва



### Схема образования деформации изгиба при сварке торцевого соединения

1 – торцевой шов;  $f$  – стрела прогиба;  $e$  – эксцентриситет (расстояние между центрами тяжести сварного шва и Св-С);  $R_{пр}$  – продольная усадка сварного шва;  $M_{из}$  – изгибающий момент.

Деформации изгиба происходят в тех случаях, когда центр тяжести сварного шва и Св-С не совпадают.

Продольная усадка  $R_{пр}$  торцевого шва 1, действуя на плече  $e$ , создает изгибающий момент  $M_{из}$ .

Под действием  $M_{из}$  происходит изгиб Св-С, характеризуемый стрелой прогиба  $f$ . Величина прогиба балки может достигать 5 мм и более.