

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;

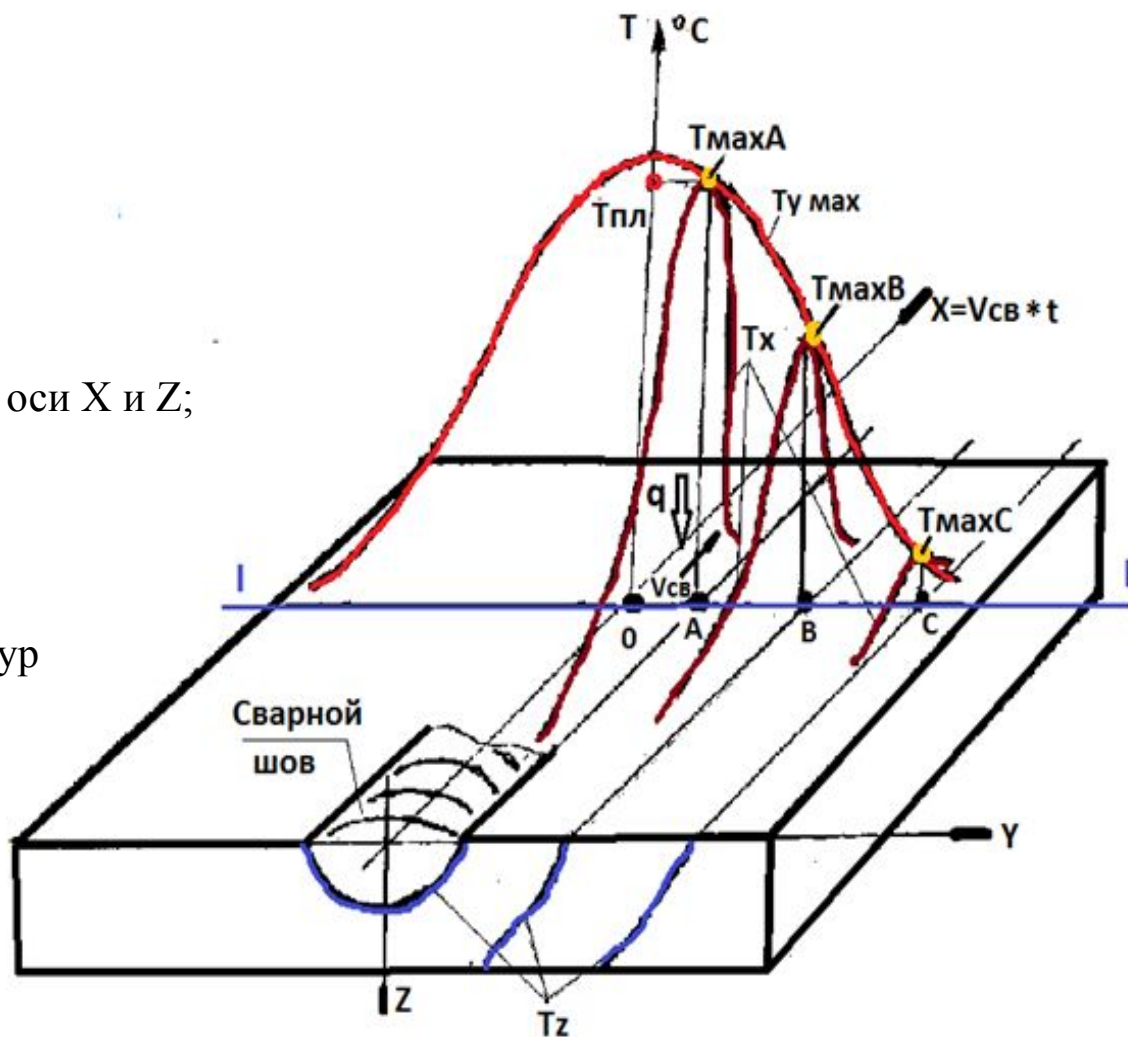
$T_{пл}$ – температура плавления металла;

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;

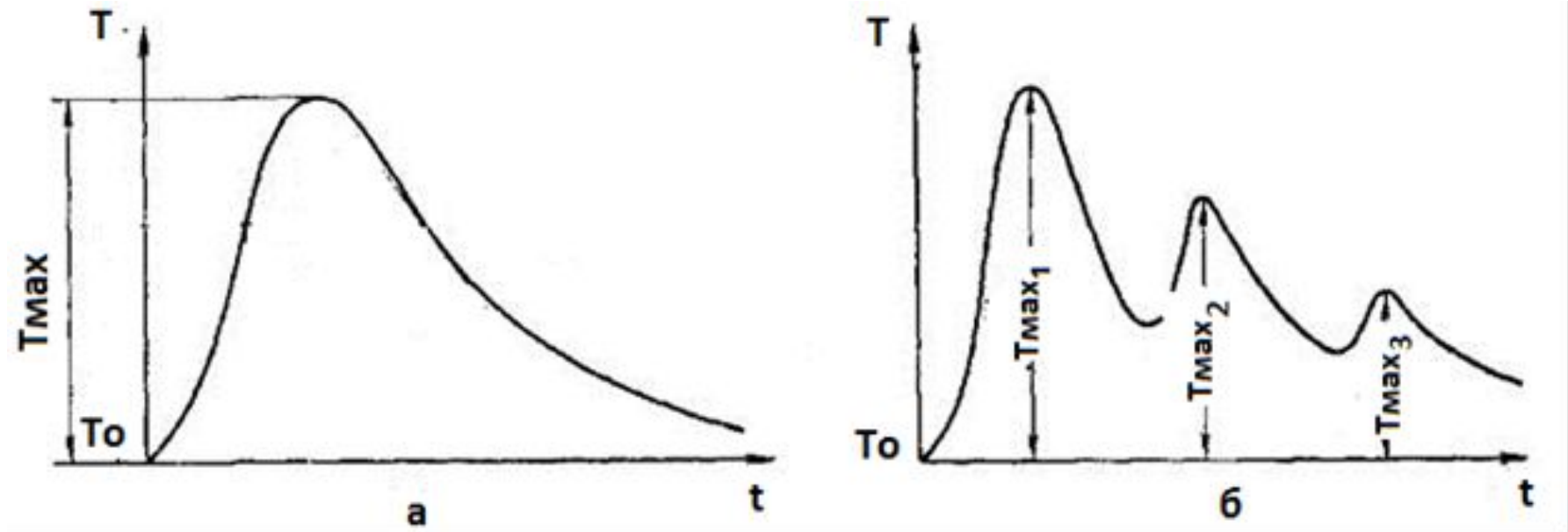


Температурное поле, создаваемое источником теплоты в металле сварного изделия

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;

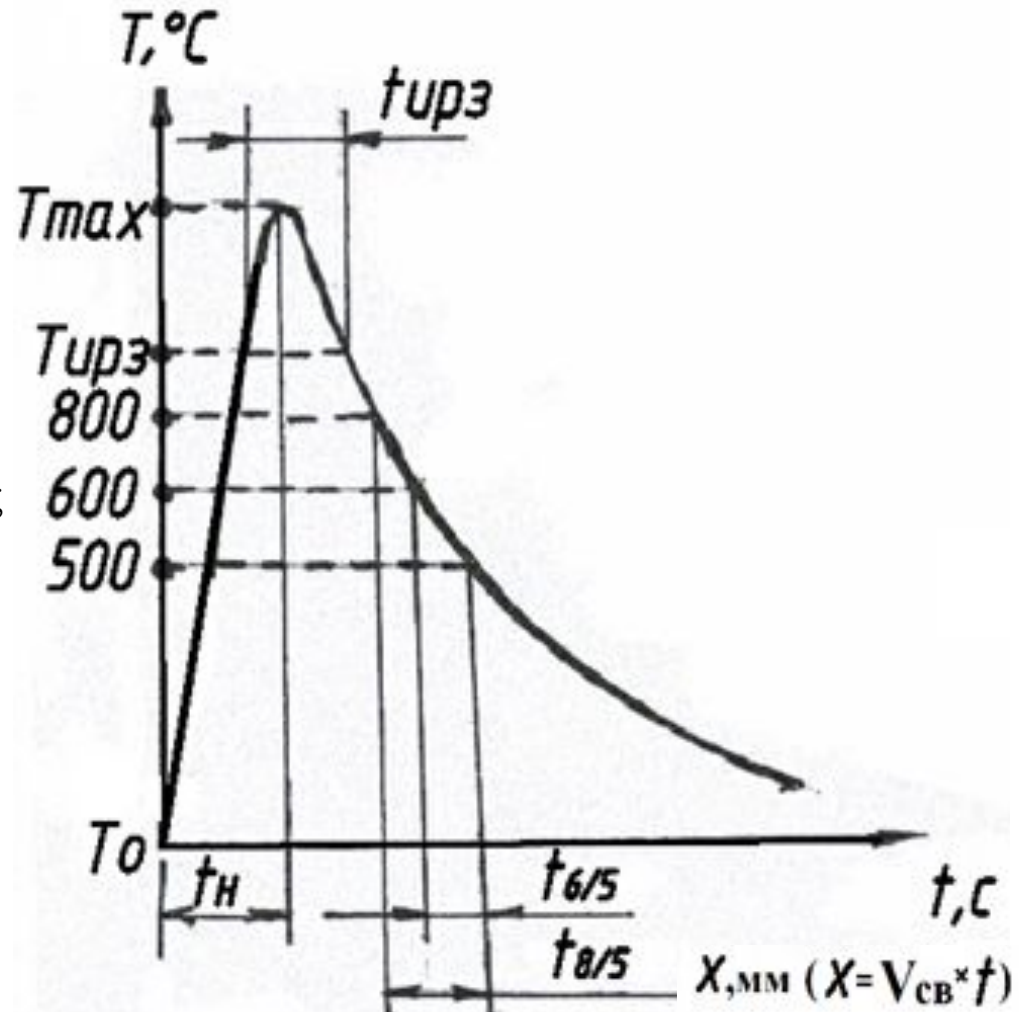
$t_{6/5}$ – время пребывания в интервале температур 600 – 500 °C, с;

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.

	Твердость НВ
Перлит	150-200
Сорбит	250-300
Троостит	300-400
Бейнит	400-550
Мартенсит	600-650

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.

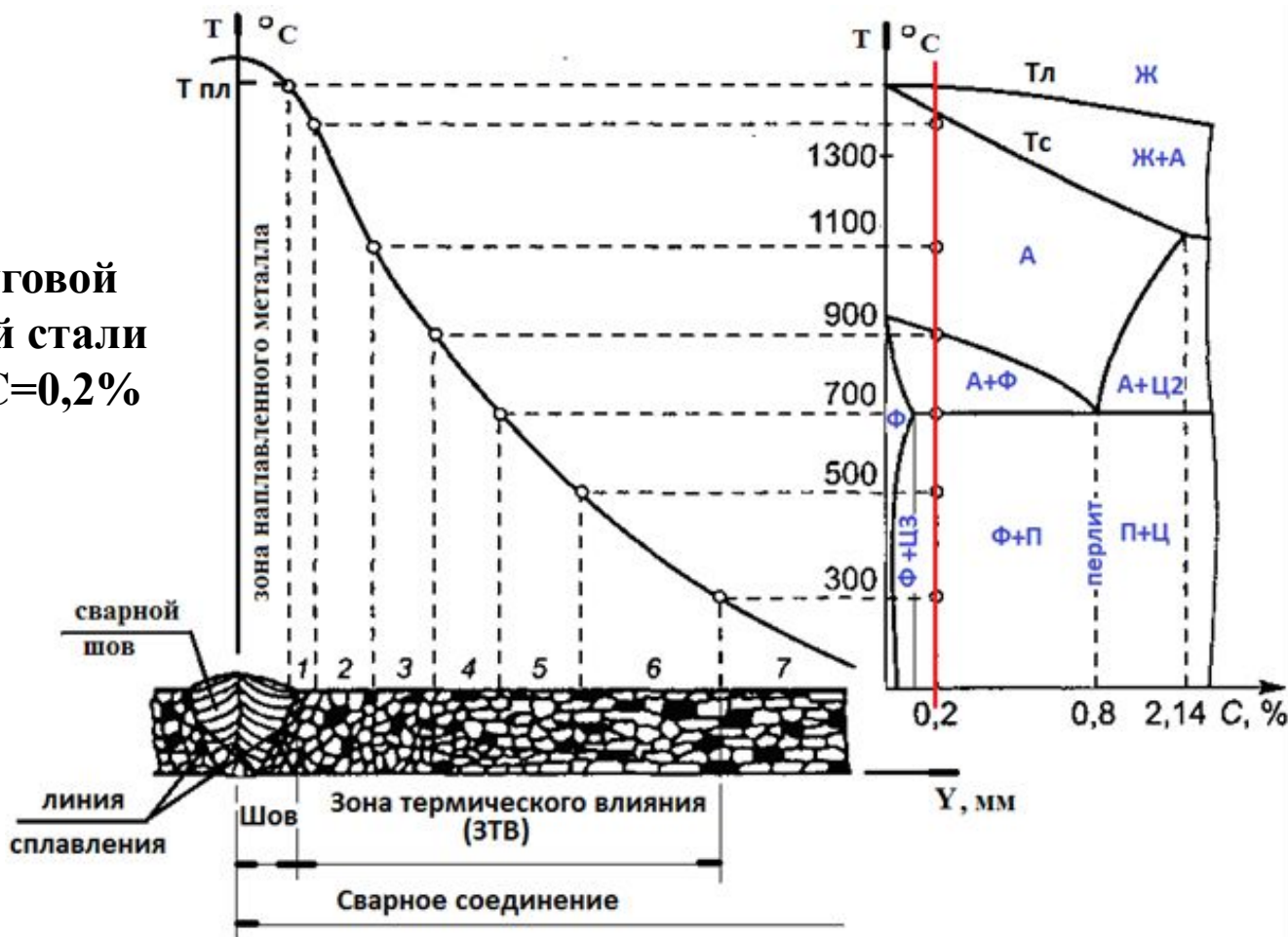
Крупнозернистая структура приводит к снижению пластичности металла и может стать причиной образования трещин в сварном шве и ЗТВ

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 $T = 700...900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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 $T = 500...700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рост зерна, огрубление структуры и разупрочнение.

6. Участок старения – (0,4...6 мм) с $T = 300 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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;

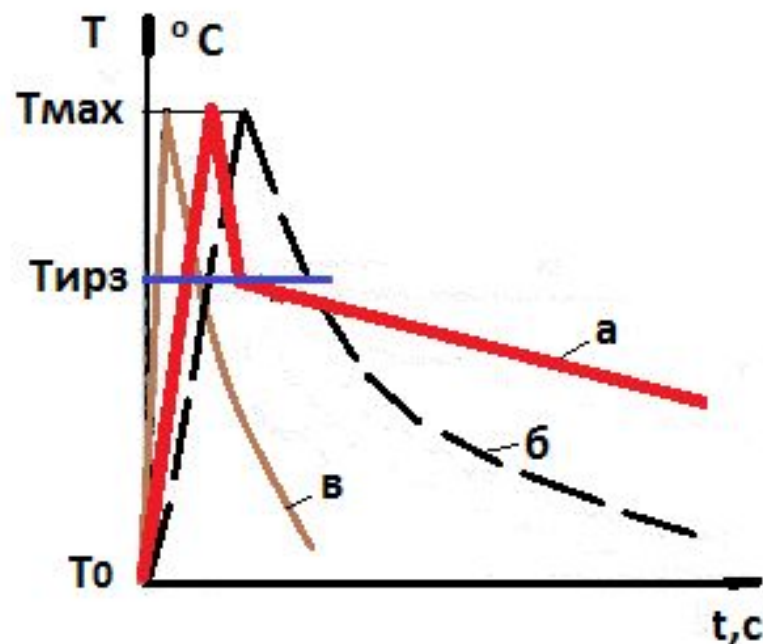
в – при электронно-лучевой и лазерной сварке

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.

Напряжения	Деформации
Напряжение - сила, отнесенная к единице площади сечения тела: $\sigma = P/F$,	Деформация - изменение размеров или формы тела в результате приложения внешних сил или изменения температурных условий.
Внешние напряжения – внеш. нагрузка	Внешние деформации - внеш. нагрузка
Собственные (внутренние) напряжения – изменение внутр. температурного сост.	Собственные (внутренние) деформации - 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

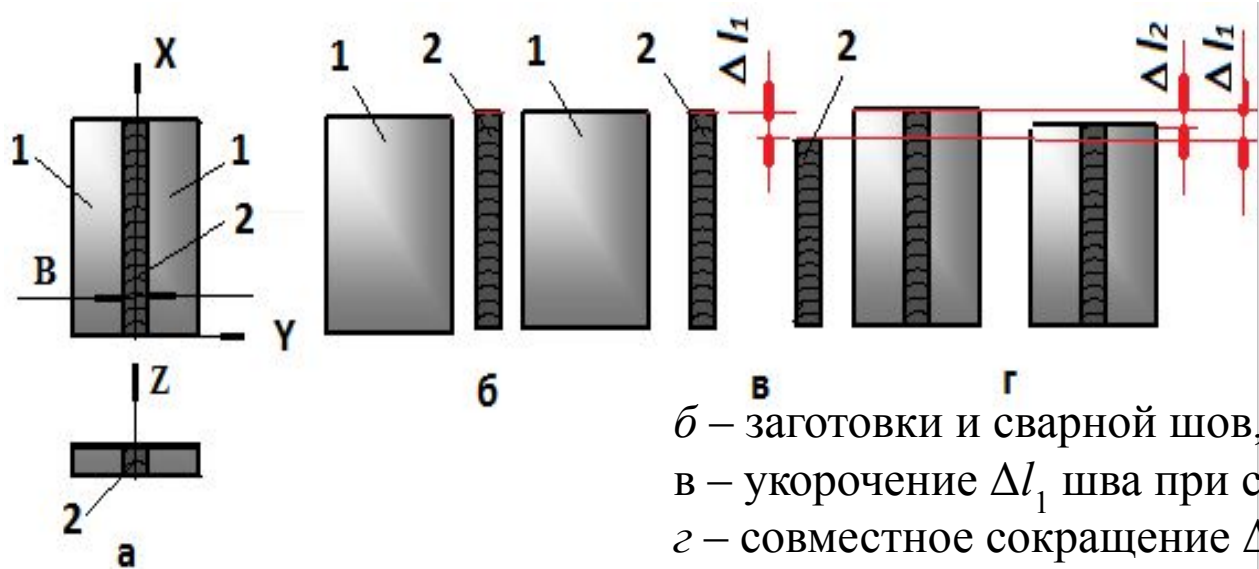
Жесткая связь между нагретыми и холодными участками металла приводит к тому, что расширяющиеся при нагреве и укорачивающиеся при охлаждении слои металла, нагретые до высоких температур, встречают препятствие со стороны холодных слоев. В Св-С возникают собственные напряжения, направленные на преодоление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

a - сварное соединение;
б – заготовки и сварной шов, представленные отдельно;
в – укорочение Δl_1 шва при свободном сокращении;
г – совместное сокращение Δl_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;

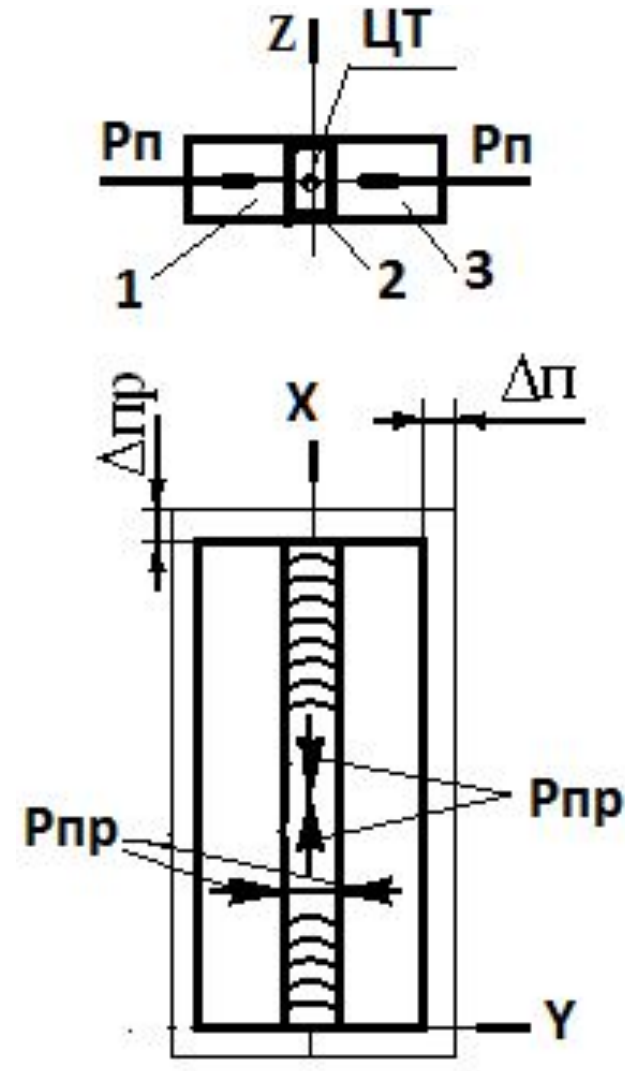
$\Delta_{п}$ – поперечная деформация;

$R_{п}$ – 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

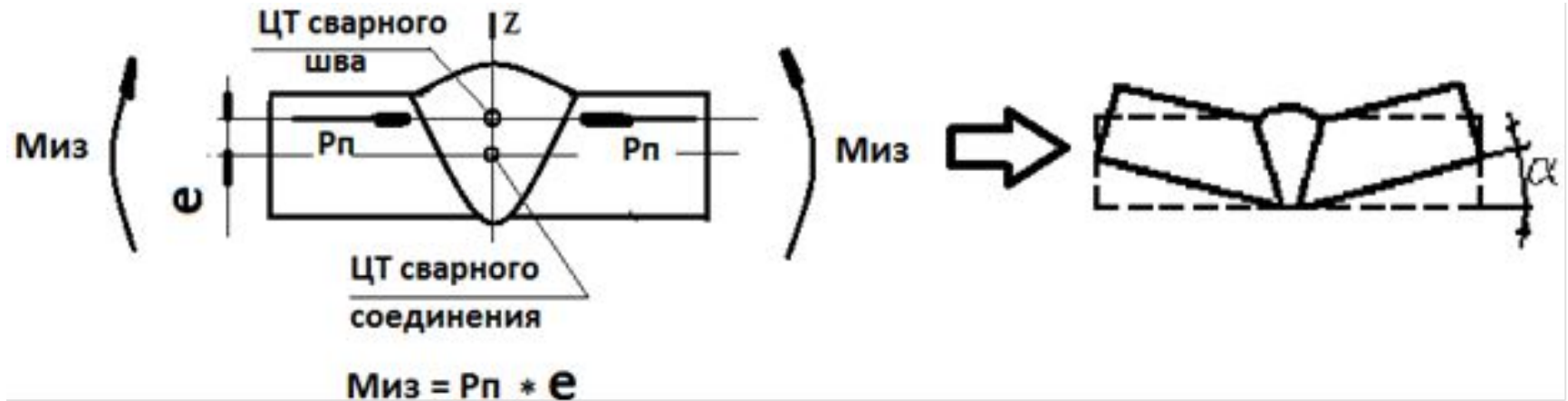


Схема образования угловой деформации стыкового Св-С

α – 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 α ($3 - 7^\circ$ от толщины металла).

2.2. Деформации изгиба

- происходят под действием продольной усадки сварного шва

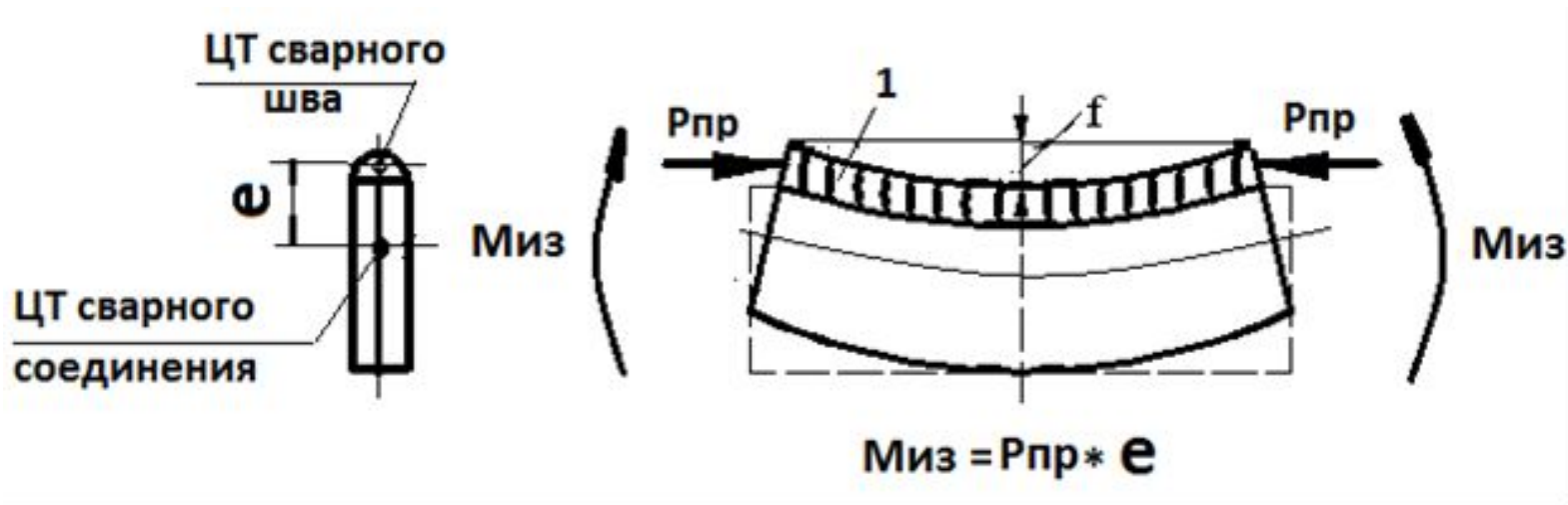


Схема образования деформации изгиба при сварке торцевого соединения

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.