

**Лекция №7. Основные типы деформаций и перемещений  
в зоне сварных соединений**

## Сварочные напряжения и деформации

Сварка вызывает искажение размеров и формы элементов сварных конструкций, их укорочение, изгиб, потерю устойчивости, закручивание. Эти искажения выражаются в перемещениях, которые зависят от формы сварной конструкции, расположения швов в ней, толщины металла.

Многообразные виды перемещений сварных конструкций порождаются относительно небольшим числом видов деформаций и перемещений, возникающих в зоне сварных соединений.

Деформации и перемещения в зоне сварных соединений зависят от количества теплоты, вводимого при сварке, распределения температур, свойств свариваемого металла.

Определение перемещений сварных конструкций состоит из двух самостоятельных этапов расчета.

На первом находят деформации и перемещения в зоне сварных соединений (термомеханическая часть задачи).

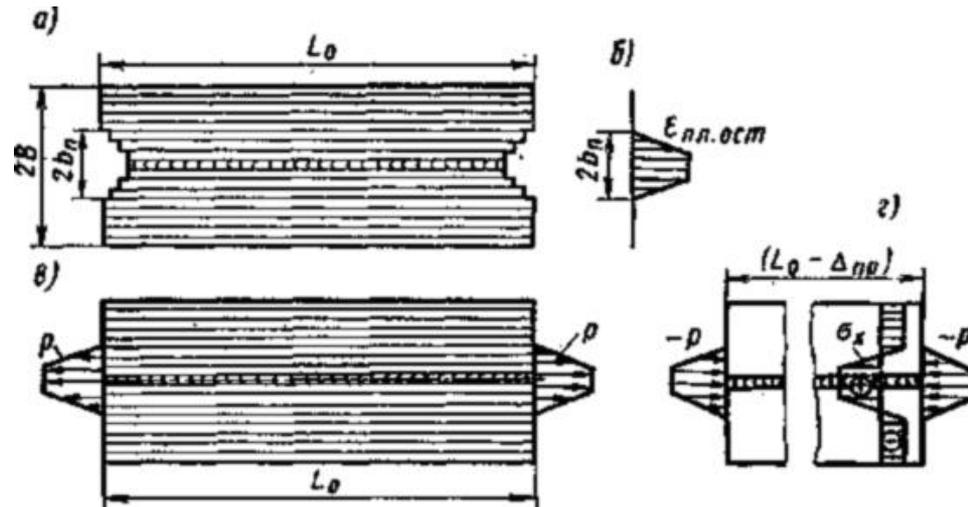
На втором методами сопротивления материалов или теории упругости определяют перемещения в конструкции, используя результаты, полученные на первом этапе (деформационная часть задачи).

Одни и те же результаты термомеханической части задачи, полученные один раз расчетным или экспериментальным путем, могут затем многократно использоваться при решении деформационных задач для самых разнообразных видов конструкций.

## Продольные остаточные пластические деформации

Такие деформации обозначаются  $\varepsilon_{\text{хпл.ост}}$ , так как действуют вдоль шва. За счет наличия этих деформаций в сваренной пластине возникает так называемая усадочная сила  $P_{\text{yc}}$ .

Разрежем пластину шириной  $2B$  на продольные полоски, чтобы освободить каждую из них от имеющихся напряжений. Концы полос расположатся так, как показано на рисунке.



Полоски, находящиеся за пределами зоны пластических деформаций, будут иметь начальную длину  $L_0$ . Полоски внутри этой зоны будут короче, потому что они имеют остаточную пластическую деформацию  $\varepsilon_{\text{хпл.ост}}$ .

## Продольные остаточные пластические деформации

Укорочение каждой полоски составит  $\Delta L = \varepsilon_{\text{пл.ост}} L_0$ .

Приложим к укороченным полосам растягивающие силы  $p$ , образующие в полосках напряжения  $a$ , чтобы длина всех полос стала одинаковой и равной  $L_0$  (рис. в):

$$p = -\varepsilon_{\text{пл.ост}} E.$$

«Склеим» между собой полоски. При этом они образуют целую пластину с напряжениями  $\sigma_x = p$  по концам в пределах зоны пластических деформаций. Остальная часть ширины будет свободна от напряжений.

В действительности к торцам сваренной пластины никаких сил не приложено, поэтому уравновесим силы  $p$  равными им по значению и противоположными по направлению (рис. г). Интеграл от распределенной нагрузки  $p$ , взятый в пределах зоны пластических деформаций, даст некоторую силу, которая называется фиктивной усадочной силой  $P_{\text{ус}}$ .

$$P_{\text{ус}} = \int_{-b_{\text{п}}}^{b_{\text{п}}} \varepsilon_{\text{пл.ост}} E s dy, \quad s - \text{толщина пластины.}$$

## Продольные остаточные пластические деформации

Усадочная сила  $P_{yc}$  вызовет по всей ширине равномерное сжатие и сформирует совместно с напряжениями  $\sigma = p$ , которые образовались в пределах зоны  $2b_H$  при растяжении полосок, эпюру остаточных собственных напряжений, которые были в пластине до ее разрезки на полосы.

Укорочение пластины от усадочной силы выражается величиной

$$\Delta_{пр} = P_{yc}L_0 / (2BsE).$$

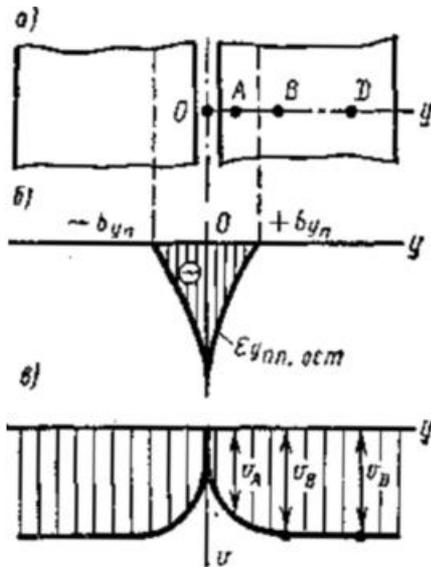
Собственные напряжения в разных точках по ширине могут быть определены по общему правилу вычисления напряжений в пластине, имеющей остаточные пластические деформации укорочения:

$$\sigma_x = -\varepsilon_{пл.ост}E + P_{yc} / (2Bs).$$

# Равномерные по толщине поперечные остаточные пластические деформации

Такие деформации обозначаются  $\varepsilon_{y_{пл.ост}}$ , так как перпендикулярно шву в плоскости пластины. За счет их возникновения происходит поперечная усадка  $\Delta_{поп}$ .

При нагреве или проплавлении целой пластины движущимся источником теплоты в ней помимо продольных собственных деформаций возникают и поперечные собственные деформации  $\varepsilon_y$ , которые обычно создают поперечные пластические деформации.



На рис. б показан примерный характер распределения  $\varepsilon_{y_{пл.ост}}$  по ширине пластины.

Если точку O по оси шва а принять как неподвижную, то можно определить перемещения  $v$  точек A, B, D в направлении к оси шва как интеграл

$$\int_0^y \varepsilon_{y_{пл.ост}} dy \quad (\text{рис. в.})$$

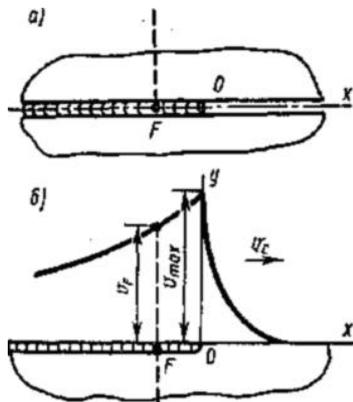
Точки B и D одинаково смещаются к оси шва, так как зона поперечных пластических деформаций ограничена размерами  $-b_{yп}$  и  $+b_{yп}$ , а точки B и D находятся за ее пределами.

Ширина пластины сокращается на размер

$$\Delta_{поп} = \int_{-b_{yп}}^{b_{yп}} \varepsilon_{y_{пл.ост}} dy.$$

## Равномерные по толщине поперечные остаточные пластические деформации

В стыковом соединении пластин с зазором (рис. а) расширение металла в поперечном направлении происходит намного свободнее, чем при сварке целой пластины.



Нагреваемые кромки достаточно свободно перемещаются в зазор, в результате чего возникают перемещения  $v$ , показанные на рис. б. Максимально возможное перемещение каждой кромки при отсутствии теплоотдачи в воздух

$$v_{\max} = \frac{\alpha}{c\gamma} \frac{q}{v_c s},$$

где  $q$  – мощность, вводимая в обе кромки (в каждую кромку вводится  $q/2$ );  $v_c$  – скорость сварки;  $s$  – толщина листа;  
 $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $c\gamma$  – объемная теплоемкость.

После максимального сближения в точке  $O$  кромки на стадии охлаждения отходят в обратном направлении, пока металл находится в жидком состоянии или имеет низкий предел текучести. В некоторой точке  $F$  металл приобретает достаточную прочность и величина  $2v_F$  предстает как поперечная усадка  $\Delta_{\text{поп}} = 2v < 2v_{\max}$ .

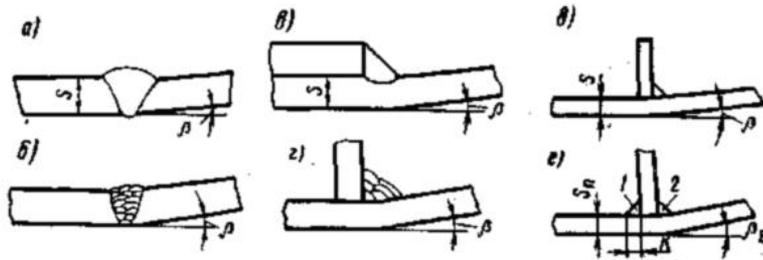
В зависимости от условий и способа сварки  $\Delta_{\text{поп}}$  имеет разные значения:

$$\Delta_{\text{поп}} = A \frac{\alpha}{c\gamma} \frac{q}{v_c s}$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент. При электрошлаковой сварке  $A=1,6$ ; при электродуговой сварке с полным проплавлением  $A=1,0 \dots 1,2$ .

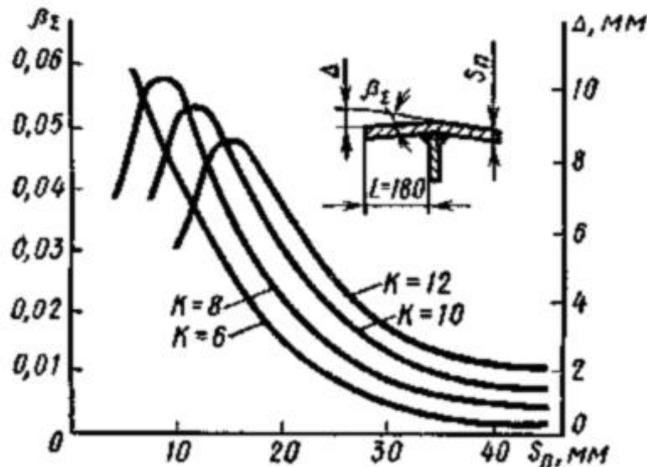
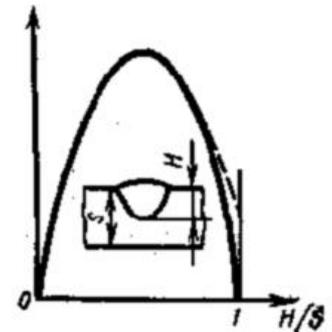
# Неравномерные по толщине поперечные остаточные пластические деформации

Неравномерные по толщине или неравномерные по сечению многослойного шва поперечные пластические деформации  $\varepsilon_{\text{упл.ост}}$  вызывают поворот одной части пластины относительно другой на угол  $\beta$ .



При проплавлении целой пластины или выполнении углового шва угол  $\beta$  зависит от отношения глубины провара к толщине пластины  $H/s$ , формы провара и его ширины.

При малой глубине провара непроверенная часть сопротивляется усадке проваренной части. При большой глубине провара эпюра  $\varepsilon_{\text{упл.ост}}$  достаточно равномерна по толщине. В обоих случаях угол  $\beta$  мал.



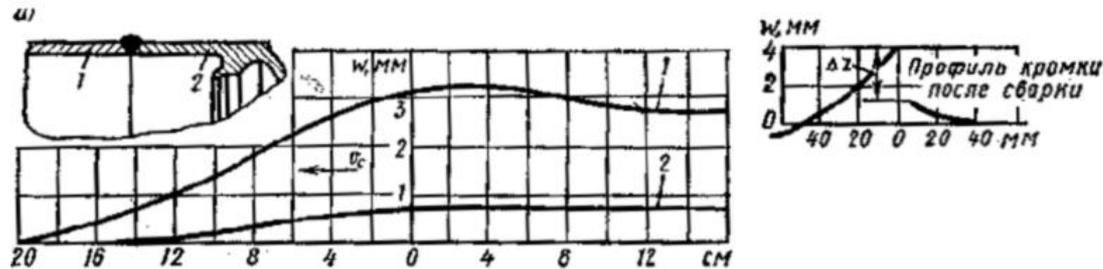
При увеличении катета угловых швов угол  $\beta$  увеличивается.

## Перемещения в направлении перпендикуляра к поверхности свариваемых листов

В соответствии с принятой системой координат эти перемещения по оси  $z$  обозначаются  $w$ , и вызывают смещения  $\Delta_z$ .

Перемещения  $w$  возникают чаще всего при сварке металла небольшой толщины. Нагрев металла, сопровождающий сварку, вызывает его расширение и образование временных напряжений сжатия. В тонком (до 1 мм) металле может возникнуть потеря устойчивости – одна кромка смещается относительно другой, и это положение фиксируется швом. Возникает смещение  $\Delta_z$ .

Неравномерный нагрев по толщине вызывает изгиб листа в процессе сварки. Если один лист по этой причине перемещается, а другой – нет, то также возникает смещение  $\Delta_z$ .

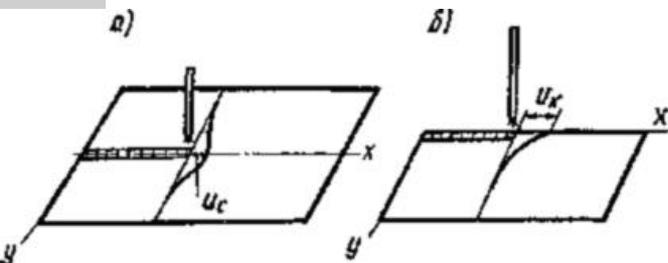


При сварке тонкостенных оболочек они нагреваются и расширяются, происходит перемещение кромок в радиальном направлении. Если жесткость оболочек различна, это радиальное перемещение  $w$  будет также различно. Это положение фиксируется швом, возникает смещение в направлении перпендикуляра к поверхности свариваемых листов.

## Сдвиговые деформации

При сварке в зоне нагрева точки свариваемых пластин перемещаются в направлении оси  $x$ . Впереди источника нагрева они движутся в одном направлении с ним, а позади него – в противоположном.

Максимальные перемещения  $u$  различны – наибольшие у кромок, с увеличением координаты  $y$  убывают. Возникают сдвиговые упругие и пластические деформации.



В практическом отношении интерес представляет то обстоятельство, что при одинаковых температурных полях максимальное перемещение края пластины  $u_k$ , наблюдаемое примерно в точке положения источника, в 1,5 раза больше, чем максимальное перемещение  $u_c$  в середине пластины.

Такое явление обычно наблюдается при сварке нахлесточных или тавровых соединений.

Разница в перемещениях  $\Delta x = (u_k - u_c)$  зафиксирована швом и сохранится как остаточная. Привариваемое ребро или нахлестка переместятся после полного остывания в направлении сварки.

Значение  $\Delta x$  при нормальном ведении сварки металла толщиной 5...10 мм составляет несколько десятых долей миллиметра, но может быть и более миллиметра при сильном разогреве привариваемого элемента.