

**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).

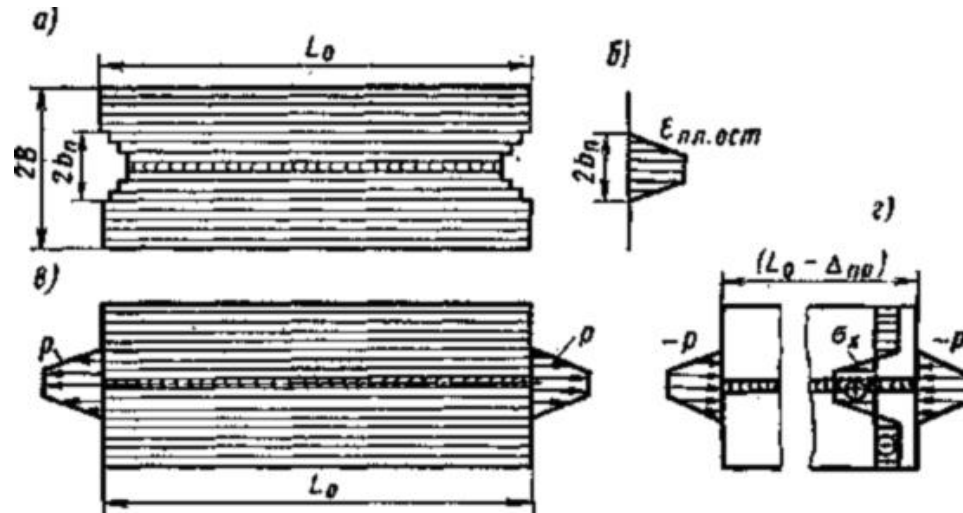
На втором методами сопротивления материалов или теории упругости определяют перемещения в конструкции, используя результаты, полученные на первом этапе (деформационная часть задачи).

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_{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

$$\Delta_{пр} = P_{yc}L_0 / (2BsE).$$

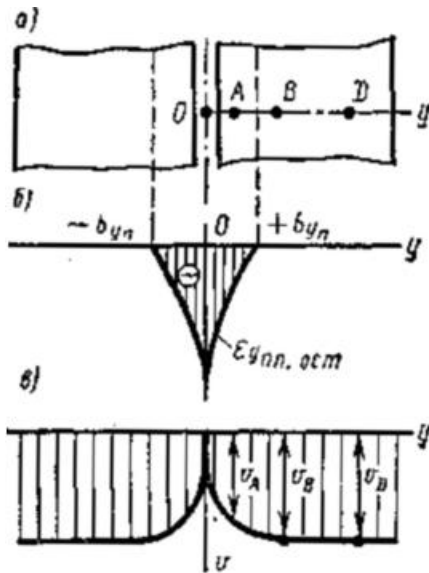
Собственные напряжения в разных точках по ширине могут быть определены по общему правилу вычисления напряжений в пластине, имеющей остаточные пластические деформации укорочения:

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

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 ε_y , которые обычно создают поперечные пластические деформации.



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

Если точку О по оси шва а принять как неподвижную, то можно определить перемещения v точек А, В, D в направлении к оси шва как интеграл

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

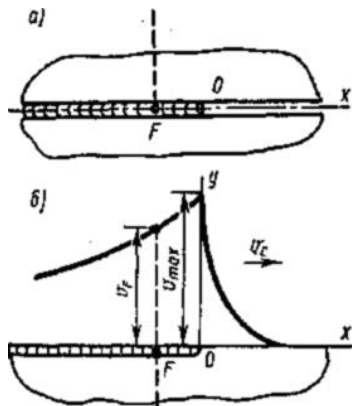
Точки В и D одинаково смещаются к оси шва, так как зона поперечных пластических деформаций ограничена размерами $-b_{уп}$ и $+b_{уп}$, а точки В и D находятся за ее пределами.

Ширина пластины сокращается на размер

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

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;
 α – 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 $\Delta_{\text{поп}} = 2v < 2v_{\max}$.

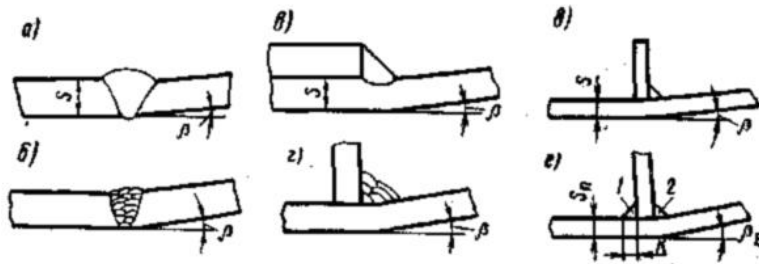
В зависимости от условий и способа сварки $\Delta_{\text{поп}}$ имеет разные значения:

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

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

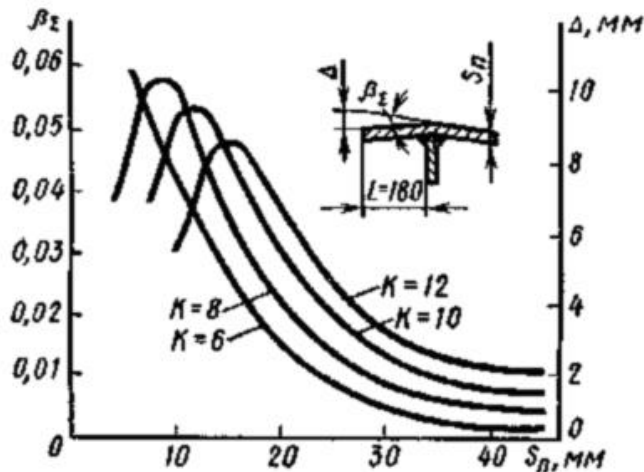
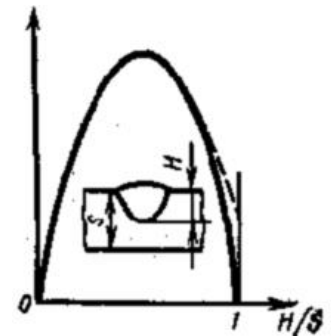
Неравномерные по толщине поперечные остаточные пластические деформации

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 β .



При проплавлении целой пластины или выполнении углового шва угол β 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 β мал.



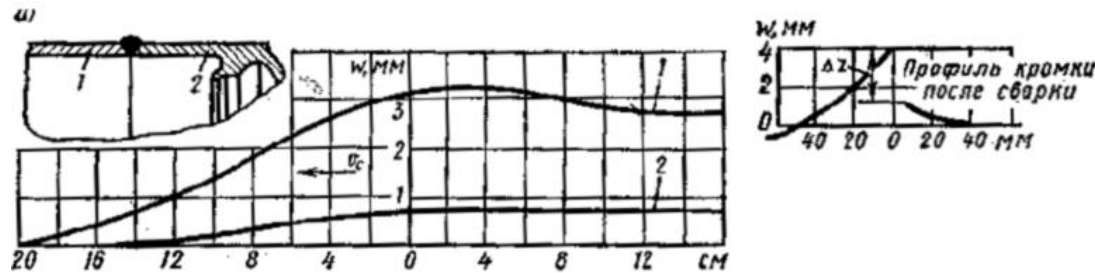
При увеличении катета угловых швов угол β увеличивается.

Перемещения в направлении перпендикуляра к поверхности свариваемых листов

В соответствии с принятой системой координат эти перемещения по оси z обозначаются w , и вызывают смещения Δ_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 Δ_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 Δ_z .

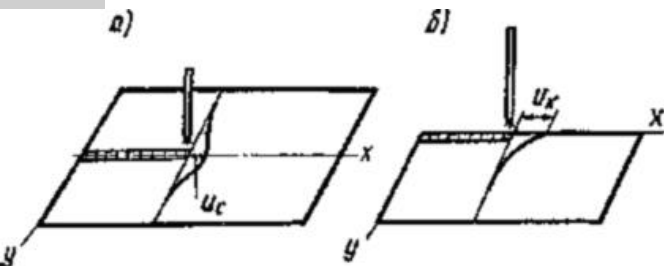


При сварке тонкостенных оболочек они нагреваются и расширяются, происходит перемещение кромок в радиальном направлении. Если жесткость оболочек различна, это радиальное перемещение w будет также различно. Это положение фиксируется швом, возникает смещение в направлении перпендикуляра к поверхности свариваемых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