

КУРС ЛЕКЦИЙ-ПРЕЗЕНТАЦИЙ  
по дисциплине  
**«Проектирование  
сварных конструкций»**

лекция №5

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ:

к.т.н., ст. преп. кафедры «ОиТСП»

БЕНДИК Татьяна Ивановна

# СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИИ

## **Тема 5. Деформации и перемещения в сварных конструкциях.**

- Причины образования сварочных деформаций и их классификация.
- Перемещения при сварке стыковых и угловых соединений.
- Перемещения в конструкциях балочного типа.
- Процесс образования деформаций изгиба и потеря устойчивости.
- Изменение размеров элементов конструкций с течением времени, при механической обработке и при эксплуатации.

Сварка вызывает изменение размеров и формы элементов сварных конструкций (их укорочение, изгиб, потерю устойчивости, закручивание).

Сварочные **ПЕРЕМЕЩЕНИЯ** - смещения одних точек детали по отношению к другим, которые приводят к изменению ее формы и размеров.

Сварочные **ДЕФОРМАЦИИ** – изменение размеров деталей при сварке. Деформации и перемещения в зоне сварных соединений зависят от количества теплоты, вводимого при сварке, распределения температур, свойств свариваемого металла.

**Можно выделить следующие виды деформаций металла:**

1. **Температурные деформации  $\epsilon_\alpha$** , вызванные изменением размера частиц тела при изменении температуры (деформации, возникающие в процессе структурных превращений, также относят к температурным).

Величина температурных деформаций зависит от коэффициента линейного расширения металла и изменения температуры.

$$\epsilon_\alpha = \alpha T,$$

2. **Наблюдаемые деформации  $\epsilon_n$**  характеризуют изменения размеров тела, которые можно зарегистрировать измерительными приборами. В теории упругости и пластичности их называют деформациями, не присваивая им никакого индекса

3. **Собственные (внутренние) деформации** состоят из упругих  $\epsilon_{упр}$  и пластических  $\epsilon_{пл}$

Указанные виды деформаций связаны между собой соотношением

$$\epsilon_n = \epsilon_{упр} + \epsilon_{пл} + \epsilon_\alpha;$$

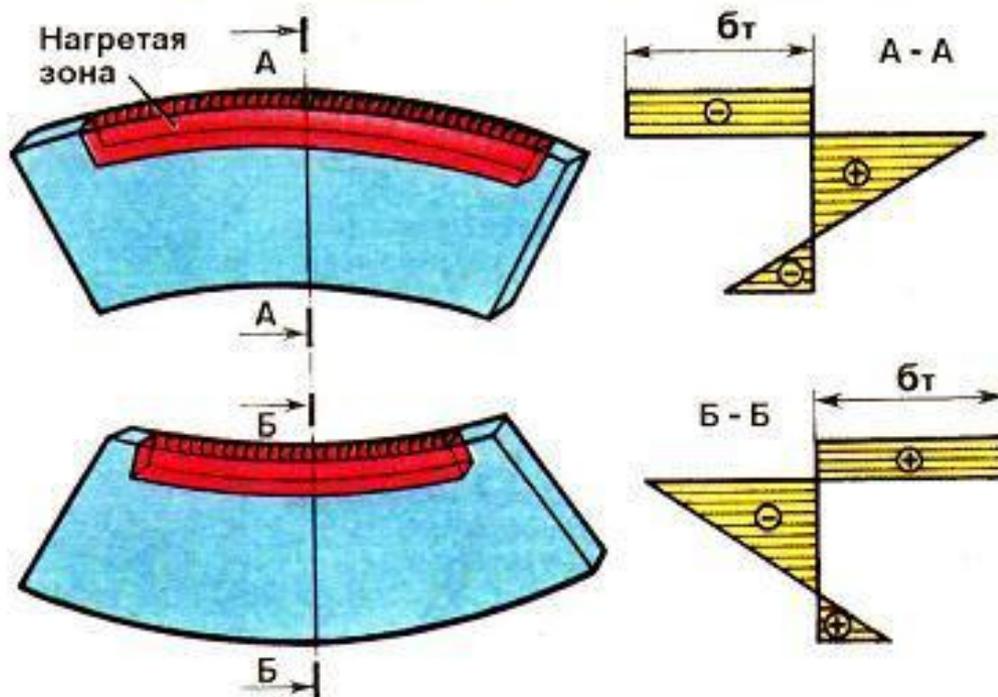
$$\gamma_n = \gamma_{упр} + \gamma_{пл}.$$

## ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИИ

- неравномерный нагрев металла
- литейная усадка расплавленного металла
- изменения в структуре металла

При наплавке валика на кромку полосы валик и нагретая часть полосы расширяются и растягивают холодную часть полосы, создавая в ней растяжение с изгибом. Сам же валик и нагретая часть полосы будут сжаты, поскольку их тепловому расширению препятствует холодная часть полосы. Полоса прогнется выпуклостью вверх. При остывании валик и нагретая часть полосы, претерпев пластические деформации, будут укорачиваться, но этому снова воспрепятствуют слои холодного металла. Валик и нагретая часть полосы будут стягивать верхние волокна, и полоса прогнется выпуклостью вниз.

## НЕРАВНОМЕРНЫЙ НАГРЕВ МЕТАЛЛА



$\text{бт}$  - напряжение текучести,  $\oplus$  - растяжение,  $\ominus$  - сжатие

Различают пять основных видов деформаций и перемещений в зоне сварных соединений.

1. Равномерные о толщине продольные остаточные пластические деформации  $\epsilon_{x \text{ пл.ост.}}$ , создающие так называемую усадочную силу  $P_{yc}$ . Чтобы установить зависимость между усадочной силой  $P_{yc}$  и  $\epsilon_{x \text{ пл.ост.}}$ , рассмотрим более подробно состояние сваренной пластины.

Если пластину с остаточными напряжениями шириной  $2B$  разрезать на продольные полоски для освобождения ее от остаточных напряжений  $\sigma_x$ , то концы полос расположатся так, как показано на рис. 1, а. 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  $\epsilon_{\text{пл.ост.}}$ .

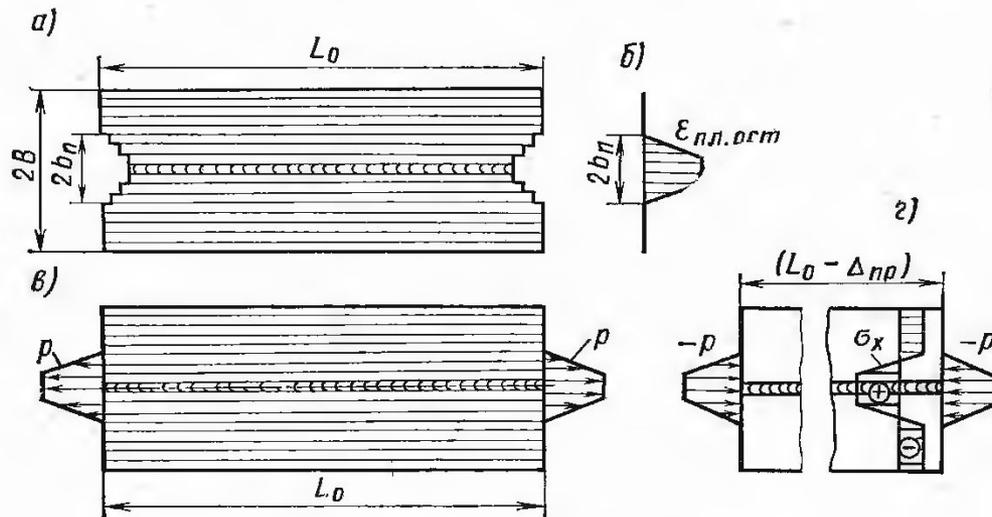
Для того, чтобы их вернуть на место («склеить» пластину обратно) к каждой полоске необходимо приложить фиктивную силу  $P_{yc}$  (усадочную силу).

где  $S$  – толщина пластины.

$$P_{yc} = \int_{-b_{\text{п}}}^{+b_{\text{п}}} \epsilon_{\text{пл.ост.}} E s dy,$$

$P_{yc}$  создает сжимающие напряжения  $\sigma_{сж}$  и вызывает по длине продольное укорочение пластины  $\Delta_{пр}$ :

$$\sigma_{сж} = P_{yc} / (2Bs) \quad \Delta_{пр} = P_{yc} L_0 / (2BsE).$$



$P_{yc}$  часто определяют экспериментально. Для этого нужно измерить изменение длины пластины в результате сварки на какой-либо начальной базе  $L_0$ , а затем воспользоваться формулой для вычисления  $P_{yc}$ :

$$\Delta_{пр} = P_{yc} L_0 / (2BsE).$$

Рис. 8.1. Сварная пластина с остаточными пластическими деформациями  $\epsilon_{\text{пл.ост}}$

При сварке легированных сталей, испытывающих структурные превращения, в зоне пластических деформаций могут возникнуть и пластические деформации удлинения.

У отдельных сталей сила  $P_{yc}$  может оказаться растягивающей. В этом случае пластина после сварки удлиняется, а не укорачивается. Однако у подавляющего большинства металлов сила  $P_{yc}$  сжимающая.

Для разных сталей и сплавов получены эмпирические формулы для вычисления  $P_{yc}$  в зависимости от условий сварки.

**Для стыковых соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, а также тавровых соединений с односторонним швом**

$$P_{yc} = 1,7 \frac{q}{Vc} \quad \text{где } q \text{ — эффективная мощность, Дж/с; } v_c \text{ — скорость сварки, см/с;}$$

**Для тавровых соединений с двухсторонним швом**  $P_{yc} = 1,7 \frac{q}{Vc} \cdot 1,15$

2. Равномерные по толщине поперечные остаточные пластические деформации  $\epsilon_{y \text{ пл.ост.}}$ , создающие поперечную усадочную силу и вызывающие поперечное укорочение конструкции.

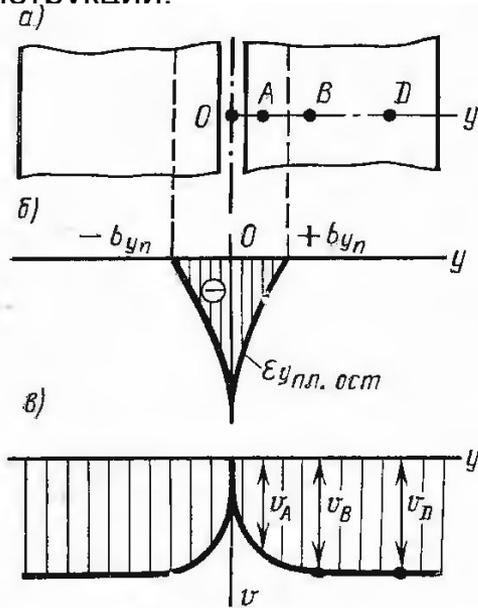


Рис. 8.4. Распределение  $\epsilon_{y \text{ пл.ост.}}$  и v в пластине

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

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

где A – эмпирический коэффициент, A = 1-1,2 при дуговой сварке с полным проплавлением;  
 $c\gamma$  – объемная теплоемкость металла;

Абсолютное значение  $\Delta_{\text{поп}}$  изменяется в широких пределах в зависимости от вводимой при сварке энергии. При дуговой однопроходной сварке стыкового соединения металлов толщиной до 3—5 мм  $\Delta_{\text{поп}}$  составляет обычно десятые доли миллиметра, до 5—20 мм  $\Delta_{\text{поп}} = 0,5 \div 1,5$  мм, при э.

3. **Неравномерные по толщине поперечные пластические деформации**, образующие угловое перемещение  $\beta$  в зоне сварного соединения. Неравномерные по толщине поперечные пластические деформации вызывают поворот одной части пластины относительно другой на угол  $\beta$ .

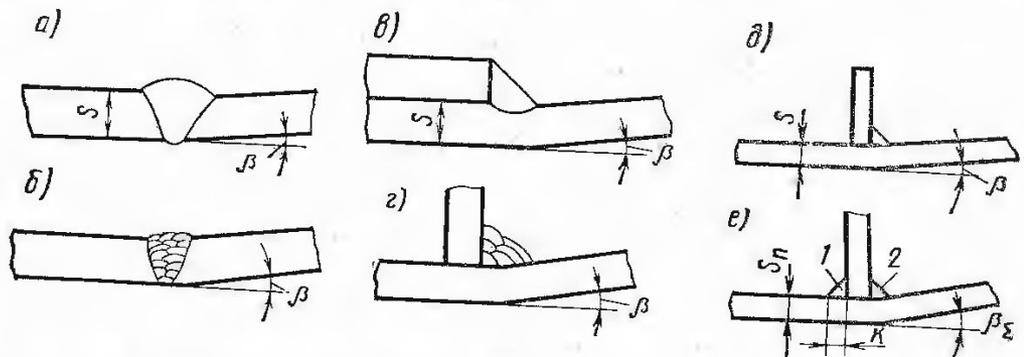
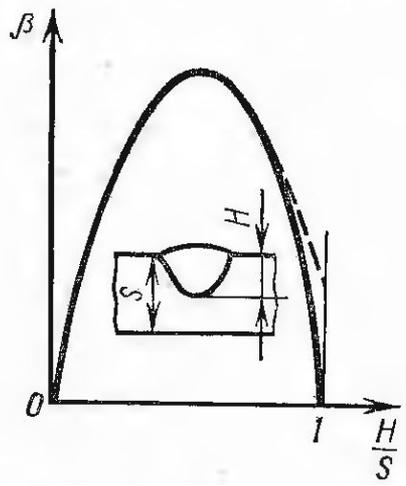


Рис. 8.6. Угловое перемещение при сварке стыковых (а, б), нахлесточных (в), тавровых (г — д) соединений



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

При малой глубине провара непроваренная часть сопротивляется усадке проваренной части. При большой глубине провара эпюра  $\beta$  достаточно равномерна по толщине

При  $K \leq 0,5s$ , угол  $\beta$  в радианах для сталей можно приближенно вычислить по формуле

$$\beta_{\Sigma}^{-1} = 0,1 (K/s_{\Pi} - 0,1).$$

#### 4. Перемещения в зоне шва в направлении перпендикуляра к поверхности свариваемых листов (потеря устойчивости)

Такие перемещения возникают чаще всего при сварке металла небольшой толщины. В тонком (до 1 мм) металле может возникнуть потеря устойчивости — одна кромка смещается относительно другой, и это положение фиксируется швом.

**5. 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 различны — наибольшие у кромок, они убывают с увеличением координаты  $y$ . Возникают сдвиговые упругие и пластические деформации.

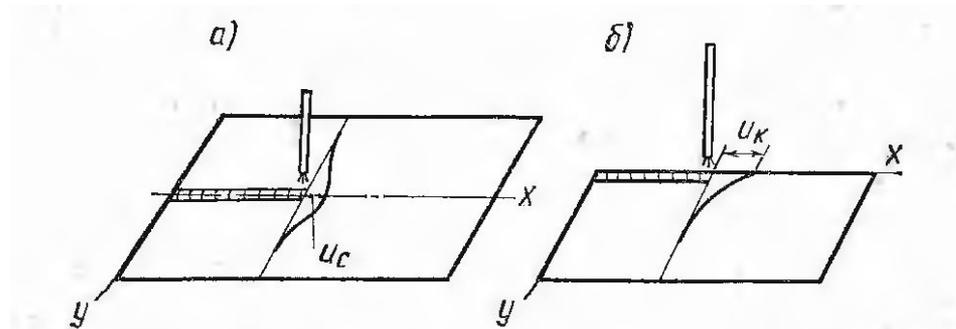


Рис. 8.11. Перемещения  $u$  впереди источника теплоты при его движении по середине пластины (а) или краю (б)



## Перемещения в конструкциях балочного типа

Характерными особенностями сварных конструкций балочного типа являются их относительно большая длина по сравнению с высотой и шириной, поясные швы вдоль всей длины, наличие поперечных швов, прикрепляющих ребра, диафрагмы и вспомогательные элементы. Если в балках имеются несимметрично расположенные продольные и поперечные швы, то из-за большой длины балок в них возникают значительные прогибы.

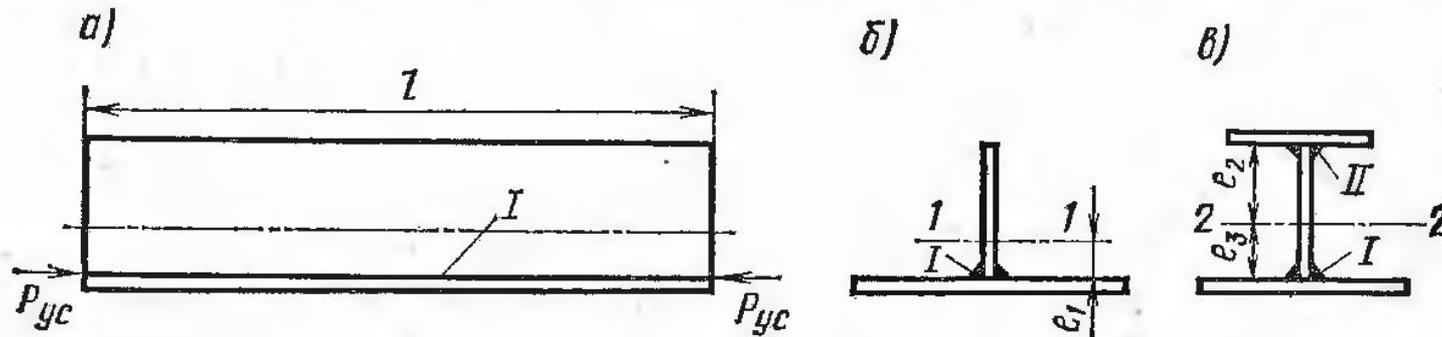


Рис. 8.16. Сварная балка с продольными швами

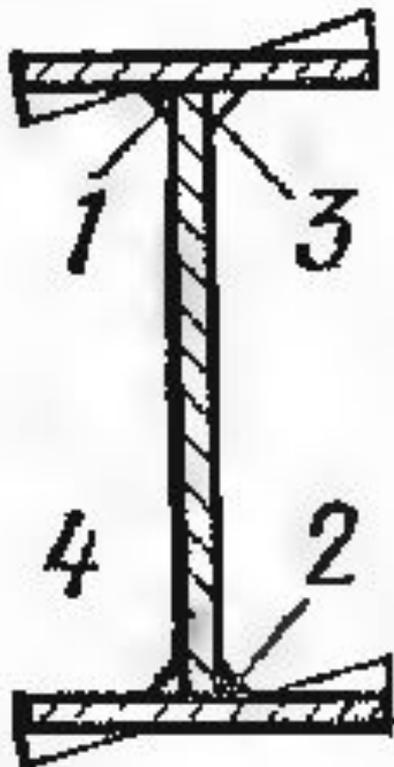
После сварки продольного шва / (рис) возникают усадочная сила  $P_{yc}$  которая создает укорочение балки и момент от силы  $P_{yc}$  на плече  $e_1$ , относительно центра тяжести сечения, который вызывает изгиб балки.

Продольное укорочение

$$\Delta_{пр} = P_{yc}l/(EF).$$

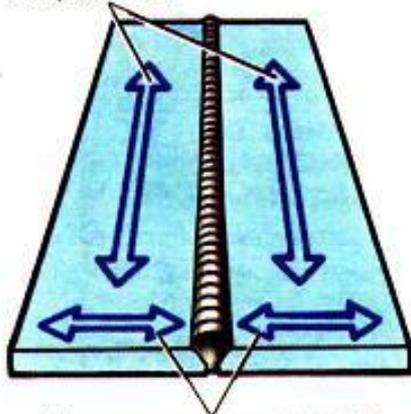
Стрела прогиба

$$f = P_{yc}e_1l^2/(8EI_1) = Ml^2/(8EI_1),$$



Если швы **1** и **4** и швы **2** и **3** сварены в разных направлениях, то угол закручивания будет в четыре раза больше, чем при сварке одного шва. Закручивание возникает вследствие неодновременной поперечной усадки углового шва по его длине. Например, шов **1** по мере его заварки закручивает верхний пояс, а шов **2**—нижний, так как швов **3** и **4** пока нет, а есть лишь прихватка. Швы **3** и **4** не могут вызвать такое же противоположное закручивание в противоположном направлении из-за жесткости швов **1** и **2**. Сварка в кондукторах или жесткие прихватки устраняют этот дефект. Значительное кручение может возникать у тонкостенных открытых профилей при укладке продольных швов, расположенных вне осей симметрии

Продольные  
напряжения



Поперечные напряжения

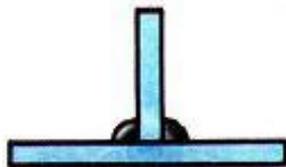
Усадка происходит при остывании металла. Металл становится более плотным, его объем уменьшается, и в сварном соединении возникают внутренние напряжения. Из-за продольных напряжений изделие коробится в продольном направлении, а поперечные приводят, как правило, к угловым деформациям-короблению в сторону большего объема расплавленного металла

### ДЕФОРМАЦИИ ОТ ПОПЕРЕЧНОЙ УСАДКИ

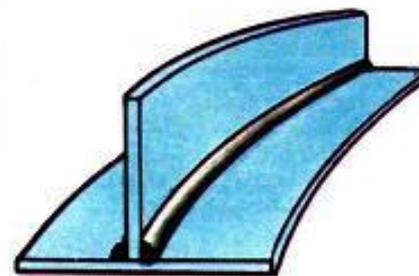
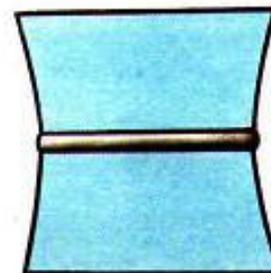
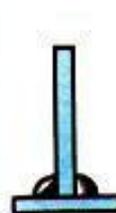
ДО СВАРКИ



ПОСЛЕ СВАРКИ



### ДЕФОРМАЦИИ ОТ ПРОДОЛЬНОЙ УСАДКИ



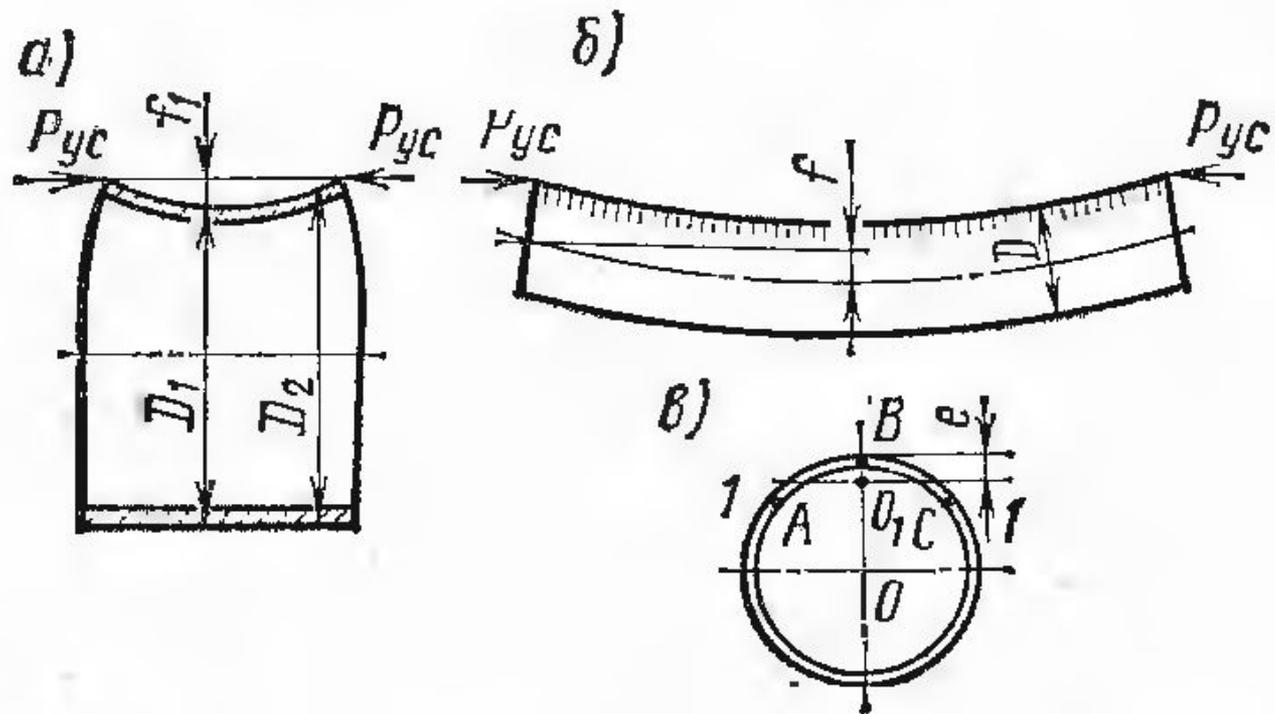


Рис. 8.20. Перемещения в цилиндрических оболочках от продольных швов

## Изменение размеров элементов конструкций с течением времени, при механической обработке и при эксплуатации.

Размеры сварных конструкций при эксплуатации не должны выходить за пределы установленных допусков. Потеря необходимой точности может возникнуть в процессе эксплуатации.

Размеры термически необработанных сварных конструкций могут самопроизвольно изменяться во времени при отсутствии каких-либо дополнительных силовых воздействий на них. Однако, эти изменения размеров имеют значения лишь для конструкций высокой точности.

Изменение размеров происходит по двум причинам:

- 1) вследствие пластических деформаций в металле из-за наличия в нем остаточных напряжений
- 2) вследствие изменения объема металла при медленном протекании структурных превращений в зонах со структурной нестабильностью, возникшей в процессе сварки.

Изменение остаточных напряжений во времени может усиливаться от естественного колебания температуры окружающей среды. При более высоких температурах процессы релаксации интенсифицируются. Возможно колебание уровня собственных напряжений из-за разных коэффициентов линейного расширения шва и основного металла в сварных соединениях, что также способствует усилению релаксации.

## Изменение размеров элементов конструкций с течением времени, при механической обработке и при эксплуатации.

**Структурная нестабильность** является одной из основных и в ряде случаев существенных причин изменения размеров во времени. Аустенитные стали в процессе сварки не испытывают структурных превращений; низкоуглеродистые стали Ст3, 20 и им подобные слабо реагируют на изменение скорости остывания и завершают структурные превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  при высоких температурах. В этих металлах структурная нестабильность не возникает.

Среднеуглеродистые и низколегированные стали 35, 4Х13, 25ХГС, 30ХГСА, 12Х5МА и другие могут иметь в зоне структурных превращений, нагреваемой при сварке выше температуры 800—850 °С, **остаточный аустенит, распад которого во времени увеличивает объем металла**. Если при сварке в результате очень быстрого переохлаждения аустенит практически полностью превращается в **мартенсит** (стали 35, 4Х13), то с течением времени идет процесс **отпуска мартенсита закалки и объем металла уменьшается**. Таким образом, при том или ином виде структурного превращения усадочная сила будет уменьшаться (при распаде остаточного аустенита) или увеличиваться (при отпуске мартенсита закалки).

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

**КАКИЕ БУДУТ ВОПРОСЫ?**