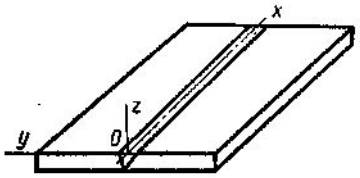
Лекция №6. Образование напряжений, деформаций и перемещений в сварных конструкциях

Сварочные напряжения и деформации

Расширение и сокращение металла от неравномерного нагрева или охлаждения, а также от структурных превращений образуют так называемые собственные или внутренние деформации и напряжения при сварке.

В отличие от напряжений и деформаций, создаваемых нагрузками, собственные напряжения и деформации существуют в теле при отсутствии каких-либо нагрузок.



При рассмотрении сварочных напряжений и деформаций используется система координат, показанная на рисунке. Ось x направлена вдоль шва, ось y – перпендикулярно шву в плоскости пластины, ось z – перпендикулярно шву в направлении толщины.

В соответствии с расположением осей, напряжения обозначают:

$\sigma_x,\ \sigma_y,\ \sigma_z,\ \sigma_{xy},\ \sigma_{xz},\ \sigma_{yz}$.

Деформации обозначают: $\varepsilon_x,\ \varepsilon_y,\ \varepsilon_z,\ \varepsilon_{xy},\ \varepsilon_{xz},\ \varepsilon_{yz}$.

Перемещения обозначают: u – по оси x; v – по оси y; w – по оси z.

Виды деформаций при сварке

Собственные напряжения появляются вследствие возникновения деформаций при сварке.

1. Температурные деформации ε_α – вызваны изменением размера частиц тела при изменении температуры. К температурным деформациям условно относят также деформации, возникающие в процессе структурных превращений:

$$\varepsilon_\alpha = \alpha T,$$

где α – средний коэффициент линейного расширения в интервале изменения температуры от 0 до T, включающий в себя и влияние структурных превращений, $°C^{-1}$;
T — изменение температуры в какой-либо точке тела, °C.
Сдвиговые температурные деформации γ_α в изотропных телах не возникают.

2. Наблюдаемые деформации $\varepsilon_н$ и $\gamma_н$ характеризуют изменения линейных и угловых 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 $\varepsilon_{упр}$, $\gamma_{упр}$ и пластических $\varepsilon_{пл}$, $\gamma_{пл}$ деформаций. Указанные виды деформаций связаны между собой:

$$\varepsilon_н = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_\alpha; \quad \gamma_н = \gamma_{упр} + \gamma_{пл}.$$

Если до процесса нагрева или охлаждения в точке тела возникли начальные пластические деформации $\varepsilon_{0пл}$ и $\gamma_{0пл}$, вызванные предшествующими деформациями:

$$\varepsilon_н = \varepsilon_{упр} + \Delta\varepsilon_{пл} + \varepsilon_\alpha + \varepsilon_{0пл}; \quad \gamma_н = \gamma_{упр} + \Delta\gamma_{пл} + \gamma_{0пл},$$

где $\Delta\varepsilon_{пл}$ и $\Delta\gamma_{пл}$ – приращения пластических деформаций на стадии рассматриваемого процесса.

Виды собственных напряжений при сварке

По причине их появления:

- от упругого или пластического механизма деформирования при сборке, монтаже и правке;
- от упругих и пластических деформаций из-за неравномерного нагрева деталей;
- от неравномерного изменения объема тела при фазовых превращениях.

По времени существования:

- временные, существующие в период выполнения технологической операции или протекания физического процесса;
- остаточные, устойчиво сохраняющиеся в течение длительного периода.

По направленности:

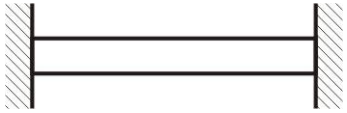
- одноосные (линейные);
- двухосные (плоскостные);
- трехосные (объемные).

В зависимости от объема, в пределах которого напряжения взаимно уравновешены:

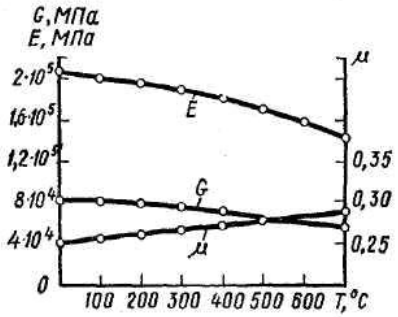
- напряжения первого рода (макрообъем – конструкция целиком);
- напряжения второго рода (зерно);
- напряжения третьего рода (кристаллическая решетка).

Образование сварочных напряжений и деформаций

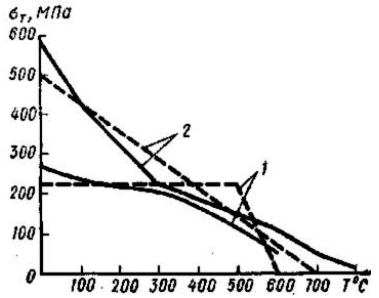
Модель стержня, жестко закрепленного по концам



При рассмотрении образования сварочных напряжений и деформаций будем учитывать изменение механических свойств металла при нагреве.

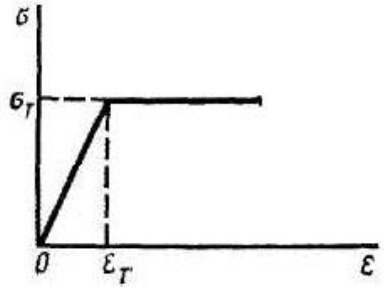


При увеличении температуры модуль Юнга уменьшается, значит величина напряжений при тех же упругих деформациях при нагреве уменьшается.



При нагреве предел текучести уменьшается, значит пластическое деформирование начинается при меньших напряжениях.

Материал является идеальным упругопластичным, это значит, что при возникновении пластических деформаций напряжения не увеличиваются.



Образование сварочных напряжений и деформаций

Напряжения сжатия будем откладывать вниз, а напряжения растяжения – вверх; полные деформации удлинения, равные сумме упругих и пластических, – вправо, а деформации укорочения – влево.

Деформации определяются как $\varepsilon_н = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_\alpha$; напряжения – $\sigma = E\varepsilon_{упр}$

.

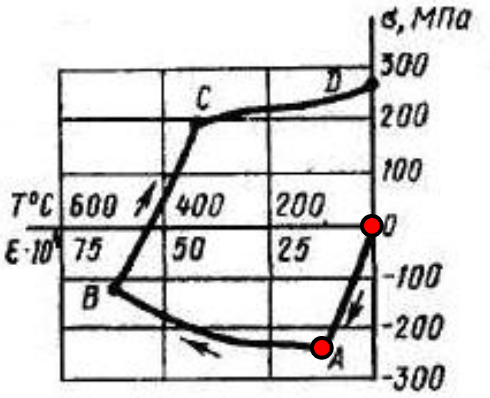
В закрепленном по концам стержне наблюдаемая деформация $\varepsilon_н$ равна нулю.

Поэтому из этой формулы для полной собственной деформации:

$$\varepsilon = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} = -\varepsilon_\alpha.$$

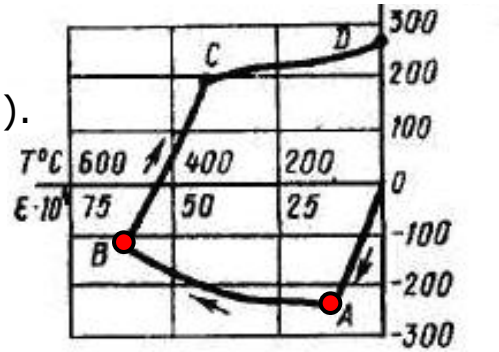
Так как при нагреве $\varepsilon_\alpha > 0$, $\varepsilon = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} < 0$. Поэтому кривая из точки 0 идет вниз (напряжения сжатия) и влево (деформация укорочения).

При увеличении напряжений до точки А пластические деформации не возникают. Участок 0А не является прямым, так как модуль упругости при нагреве изменяется нелинейно.



В точке А напряжения достигают предела текучести. При дальнейшем увеличении деформации напряжение не изменяется (так как материал идеально упругопластический).

Так как при повышении температуры предел текучести уменьшается, то при дальнейшем нагреве стержня на участке АВ напряжения уменьшаются.



В точке В нагрев стержня прекращается. В стержне имеются пластические деформации $\varepsilon_{плВ}$, равные

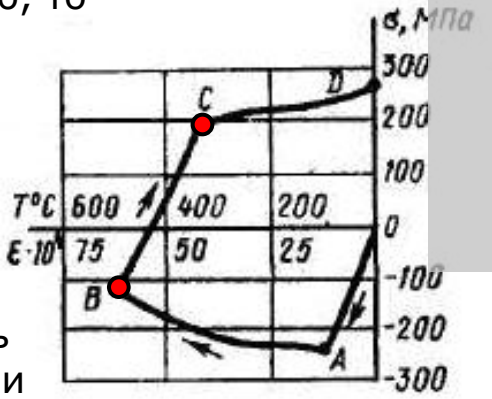
$$\varepsilon_{плВ} = -\varepsilon_{\alpha В} - \varepsilon_{упрВ},$$

где $\varepsilon_{упрВ} = -\sigma_{ТВ} / E_В$; $\sigma_{ТВ}$ и $E_В$ – предел текучести и модуль упругости металла при температуре, соответствующей точке В.

При охлаждении отсчет пластических деформаций на стадии остывания стержня следует начать заново. Пластические деформации $\varepsilon_{плВ}$ будут играть роль начальных деформаций $\varepsilon_{0пл}$. Так как наблюдаемая деформация равна нулю, то

$$\varepsilon_{упр} + \Delta\varepsilon_{пл} = -\varepsilon_{\alpha} - \varepsilon_{0пл} = \varepsilon.$$

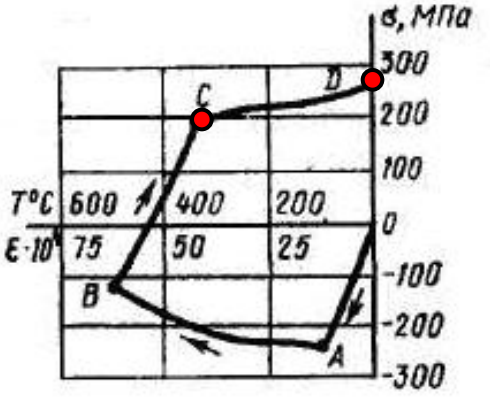
На участке ВС напряжения изменят знак и, пока полная деформация $\varepsilon < \sigma_T / E$, пластические деформации отсутствуют, то есть $\Delta\varepsilon_{пл} = 0$.



В точке С появляются пластические деформации и далее вплоть до полного охлаждения (точка D) напряжения остаются равными пределу текучести металла при соответствующей температуре (то есть увеличиваются при постепенном охлаждении).

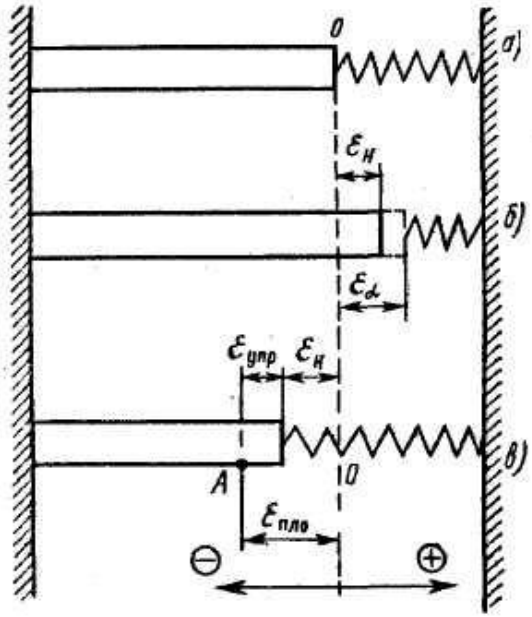
После полного остывания остаточная пластическая деформация равна алгебраической сумме пластической деформации, возникшей при нагреве, и приращения пластической деформации, возникшей при остывании.

$$\varepsilon_{0пл} + \Delta\varepsilon_{плD} = -\varepsilon_{упрD} = -\sigma_{TD} / E_D. \quad \text{(деформация укорочения)}$$



Модель стержня с упругим закреплением

В данном случае один конец стержня упруго соединен со стенкой. Эта модель лучше соответствует реальному поведению металла при сварке. Здесь наблюдаемая деформация не равна нулю.



На рис. а) пружина не напряжена.

Если стержень нагреть (рис. б), то он удлинится, но наблюдаемая деформация $\varepsilon_н$ окажется меньше температурной деформации, так как пружина оказывает сопротивление свободному расширению стержня.

Собственная деформация $\varepsilon_н - \varepsilon_\alpha$ будет отрицательной, что указывает на наличие в стержне сжимающих напряжений. Если эти сжимающие напряжения достигнут предела текучести, то в стержне будет протекать пластическая деформация осадки.

После полного остывания (рис. в) стержень окажется короче, чем он был вначале.

Однако пружина не даст стержню занять положение, обозначенное точкой А. По отношению к начальному положению в стержне будут: **пластическая деформация укорочения** $\varepsilon_{пл}$, возникшая при нагреве и имеющая отрицательный знак; **наблюдаемая отрицательная деформация** $\varepsilon_н$; **положительная** (по отношению к точке А) **упругая деформация** $\varepsilon_{упр}$, которая вызовет в стержне остаточные напряжения $\sigma = E\varepsilon_{упр}$ растяжения .