

## **2.4 Остаточные напряжения. Часть 1**

Следствием изменений физико-механического состояния деталей, вызванных различными видами обработки, является возникновение остаточных напряжений, т.е. напряжений, которые существуют и уравниваются внутри твердого тела после устранения причин, вызвавших их появление.

## 2.4 Остаточные напряжения

**Остаточные напряжения** – напряжения, которые существуют и уравниваются внутри твердого тела после устранения причин, вызвавших их появление.

**Классификация** остаточных напряжений (акад. Давиденков Н.Н.)

- напряжения I рода (макронапряжения) охватывающие макрообъемы, соизмеримые с размерами детали;
- напряжения II рода (микронапряжения) распространяющиеся в микрообъемах (отдельных зернах, блоках и их группах);
- напряжения III рода действующие в субмикрообъемах, линейный размер которых соизмерим с межатомным расстоянием.

*Остаточные напряжения являются следствием технологического воздействия на деталь в виде следующих факторов:*

- силовое поле инструмента, создающее пластическую деформацию;
- изменение температуры при обработке (нагрев или охлаждение);
- структурные превращения, вызывающие объемные изменения в материале.

*Общим признаком данных воздействий является необратимое и неоднородное изменение размеров локальных участков детали, остающееся после их прекращения.*

Академик Николай Николаевич Давиденков предложил классифицировать остаточные напряжения на напряжения I рода (или макронапряжения), охватывающие макрообъемы, соизмеримые с размерами детали; напряжения II рода (или микронапряжения) распространяющиеся в отдельных зернах или их группах. Данные напряжения возникают при зарождении и движении линейных дефектов, таких, как дислокации, а также напряжения III рода, действующие в субмикрообъемах, линейный размер которых соизмерим с межатомным расстоянием. Эти напряжения в основном вызываются точечными дефектами – вакансиями, которые приводят к смещению атомов из узлов кристаллической решетки.

Основное влияние на эксплуатационные характеристики деталей оказывают остаточные напряжения I рода, и далее мы будем рассматривать именно эти напряжения.

Можно выделить три основных фактора, участвующих в формировании остаточных напряжений при обработке деталей – это силовое поле инструмента, создающее пластическую деформацию; изменение температуры при обработке; и структурные превращения, вызывающие объемные изменения в материале.

Общим признаком этих воздействий является необратимое и неоднородное изменение размеров локальных участков детали, остающееся после их прекращения.

Классическим трудом, содержащим описание механизмов возникновения остаточных напряжений, является монография профессора Исаака Ароновича Биргера, начальника отделения прочности Центрального института авиационного моторостроения, которая была издана в 1963 году.

## 2.4 Остаточные напряжения

### Теорема о разгрузке

(Г. Генки, 1924 г., А.А. Ильюшин, 1948 г.)

- Остаточные напряжения равны разности между истинными напряжениями в упругопластическом теле и теми напряжениями, которые создавались бы в нем при предположении об идеальной упругости материала.

*Из теоремы о разгрузке вытекает, что эпюра остаточных напряжений всегда является самоуравновешенной, т.е. равнодействующие силы и моменты равны нулю.*

*Если распределение напряжений в упругопластическом и в упругом теле одинаково, то остаточные напряжения после пластической деформации не возникают. В качестве примера можно привести растяжение стержня осевой силой.*

В основе аналитического определения остаточных напряжений после пластических деформаций лежит теорема о разгрузке, сформулированная в 1924 году немецким ученым Генрихом Генки и доказанная в 1948 году профессором Алексеем Антоновичем Ильюшиным. В соответствии с этой теоремой, остаточные макронапряжения равны разности между истинными напряжениями в упругопластическом теле и теми напряжениями, которые создавались бы в нём в предположении об идеальной упругости материала.

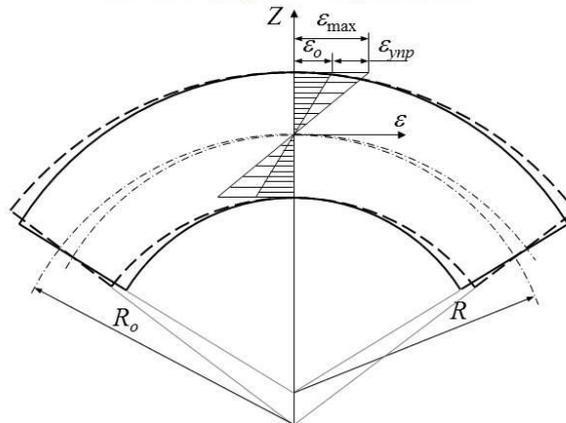
Из данной теоремы вытекает, что

- во-первых, эпюра остаточных напряжений всегда является самоуравновешенной, т.е. равнодействующие силы и моменты равны нулю
- и во-вторых, если распределение напряжений в упругопластическом и в упругом теле одинаково, то остаточные напряжения после пластической деформации не возникают. В качестве примера здесь можно привести растяжение стержня осевой силой.

Рассмотрим некоторые примеры возникновения остаточных напряжений. При этом будем использовать систему координат, принятую в процессах механической обработки и формообразования длинномерных деталей авиационных конструкций. Оси данной системы имеют следующее расположение:  $X$  и  $Y$  – в нейтральной плоскости заготовки, соответственно в поперечном и продольном направлениях;  $Z$  – по нормали к обрабатываемой поверхности.

## 2.4 Остаточные напряжения

Схема деформаций при изгибе



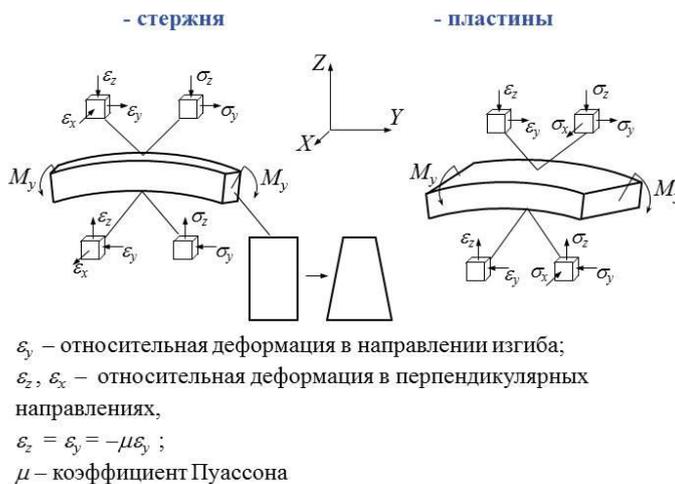
- $R$  – радиус кривизны при нагружении
- $\epsilon$  – относительная деформация при нагружении
- $\epsilon_{упр}$  – упругая составляющая относительной деформации
- $R_0$  – радиус остаточной кривизны
- $\epsilon_0$  – остаточная относительная деформация

Первый пример, описанный в монографии Биргера, это упругопластический изгиб стержня или пластины. Он иллюстрирует превалирующее действие деформационного фактора. В данном случае внешняя нагрузка вызывает в волокнах материала деформацию, распределенную по высоте сечения по линейному закону. В выпуклых слоях заготовки развивается деформация растяжения, а вогнутых – сжатия.

Очевидно, что пластическое течение начинается в поверхностных слоях, которые подвергаются наибольшей деформации. При этом середина остается в упругом состоянии и после снятия внешней нагрузки происходит частичный возврат заготовки к исходной форме с уменьшением деформации на величину упругой составляющей.

## 2.4 Остаточные напряжения

### Напряженно-деформированное состояние при изгибе



Как видно из схемы напряженно-деформированного состояния стержня, деформация, обусловленная внешним изгибающим моментом, развивается в продольном направлении.

В перпендикулярных же направлениях возникают соответствующие компоненты поперечной деформации, которые определяется известным выражением через коэффициент Пуассона.

В случае достаточно узкого стержня деформированию материала в поперечном направлении (т.е. по оси X) ничего не препятствует, и поперечное сечение заготовки приобретает форму трапеции. Напряжения в этом направлении отсутствуют.

В направлении оси Z напряжения обусловлены надавливанием волокон друг на друга. Ими при расчетах обычно пренебрегают и при анализе изгиба стержней учитывают только напряжения, действующие в продольном направлении.

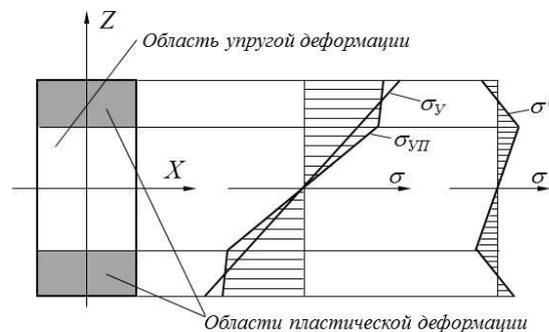
При изгибе широкой заготовки (пластины или листа) деформации в поперечном направлении стеснены, т.е. сечение заготовки не может изменить свою форму, вследствие этого в данном направлении возникают напряжения, знак которых противоположен направлению стесненной деформации.

При анализе изгиба пластин в качестве допущения также пренебрегают напряжениями в направлении оси Z и считают, что напряженное состояние является плоским, а деформированное – линейным.

Для остаточного напряженного состояния изогнутых деталей характерны те же закономерности, что и для действующего при нагружении.

## 2.4 Остаточные напряжения

Схема к определению остаточных напряжений после упругопластического изгиба



$\sigma_{уп}$  – напряжения в упругопластическом материале

$\sigma_y$  – напряжения в упругом материале

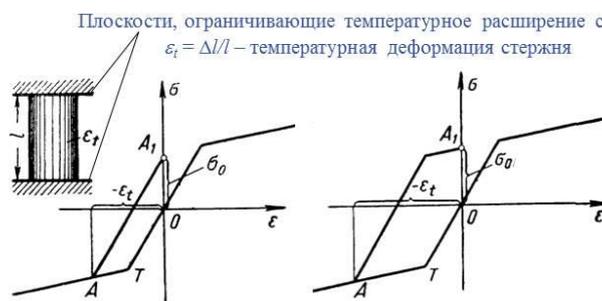
$\sigma^o$  – остаточные напряжения,  $\sigma^o = \sigma_{уп} - \sigma_y$

Распределение напряжений в конце нагружения изгибом, в результате которого возникла упруго-пластическая деформация, имеет следующий вид.

Согласно теореме Генки-Ильюшина процесс разгрузки можно представить как нагружение такой детали внутренними усилиями, рассчитанными в предположении об идеальной упругости материала. При этом действует та же нагрузка, в данном случае – изгибающий момент, но в противоположном направлении. Разгрузка приводит к созданию остаточных напряжений. В наружных, т.е. необратимо деформированных слоях, их знак противоположен знаку напряжений, действовавших при нагружении.

## 2.4 Остаточные напряжения

### Образование остаточных напряжений при нагреве и последующем охлаждении



*Если в процессе нагрева создаются температурные напряжения сжатия, превосходящие предел текучести, в материале образуется остаточная пластическая деформация сжатия. После снятия нагрева размеры детали возвращаются к прежним, но наличие остаточной деформации сжатия вызывает появление остаточных напряжений растяжения.*

Действие температурного фактора также описано в монографии Биргера на примере нагрева стержня, заделанного своими концами в абсолютно жесткие плоскости, расстояние между которыми неизменно. Эти плоскости имитируют части конструкции, не подвергающиеся температурному воздействию. При нагревании стержень испытывает температурное расширение, увеличивающее его размеры. В результате возникает температурная деформация и соответствующие напряжения.

В связи с тем, что из-за наложенных ограничений стержень не имеет возможности увеличить свою длину, эти напряжения и деформация будут сжимающими. При соответствующей температуре они могут превысить предел текучести.

На данной диаграмме нагружения точка А характеризует напряжение стержня в конце нагрева. При остывании происходит разгрузка, деформации и напряжения изменяются по прямой АА<sub>1</sub>. Отрезок ОА<sub>1</sub> выражает остаточные напряжения.

При больших значениях первоначальной деформации в процессе разгрузки может возникнуть пластическое течение.

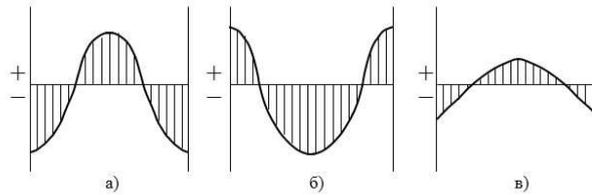
Таким образом, если в процессе нагрева образуется остаточная пластическая деформация сжатия, то после снятия нагрева, когда размеры детали возвращаются к прежним, наличие этой деформации вызывает появление остаточных напряжений растяжения.

В большинстве реальных технологических процессов имеет место трехмерное НДС и частичные ограничения, стесняющие температурную деформацию поверхностного слоя, например, со стороны нижележащих слоев. К тому же, высокие температуры вызывают изменение механических свойств материала. В связи с этим процесс образования остаточных

напряжений при нагреве и охлаждении будет иметь более сложный характер, но общие закономерности сохранятся.

## 2.4 Остаточные напряжения

### Образование остаточных напряжений при закалке стержня



Распределение остаточных напряжений, образующихся при закалке стержня:  
а – тепловых; б – структурных; в – суммарных

*В поверхностных слоях, стремящихся к сжатию в связи с уменьшением температуры, нагретая сердцевина будет играть роль заделки. В результате в них возникнет пластическая деформация растяжения, и после выравнивания температурного поля, появятся остаточные напряжения сжатия, а в сердцевине – остаточные напряжения растяжения.*

*При закалке стали происходит превращение аустенита в мартенсит, сопровождающееся увеличением объема. В случае с закалкой стержня, это даст обратный эффект по сравнению с температурной деформацией. Таким образом, в результате мартенситного превращения на поверхности образуются остаточные напряжения растяжения, а в сердцевине – напряжения сжатия*

Несколько иная картина наблюдается при охлаждении равномерно прогретой детали, например, цилиндрического стержня при закалке.

В данном случае для поверхностных слоев стержня, стремящихся к сжатию в связи с уменьшением температуры, нагретая сердцевина будет играть роль заделки, в результате в этих слоях возникнет пластическая деформация растяжения, и после выравнивания температурного поля появятся остаточные напряжения сжатия.

В рассмотренных примерах учитывалась только температурная деформация. Однако во многих случаях остаточные напряжения возникают в результате объемных изменений в материале, связанных с фазовыми и структурными превращениями. Так, при закалке стали происходит превращение аустенита в мартенсит с увеличением объема металла. В случае со стержнем, это даст обратный эффект по сравнению с температурной деформацией. В результате мартенситного превращения на поверхности образуются остаточные напряжения растяжения, а в сердцевине – сжатия.

В данной схеме тепловые напряжения превышают структурные, поэтому на поверхности образуются суммарные остаточные напряжения сжатия. Однако в зависимости от соотношения между тепловыми и структурными превращениями могут получиться различные эпюры суммарных напряжений, а в поверхностных слоях остаточные напряжения могут иметь разные величину и знак.