

## 2.5 Остаточные напряжения. Часть 2

Рассмотрим особенности напряженно-деформированного состояния в процессах **поверхностной обработки**

## 2.5 Остаточные напряжения

### Особенности остаточного напряженного состояния при поверхностной обработке

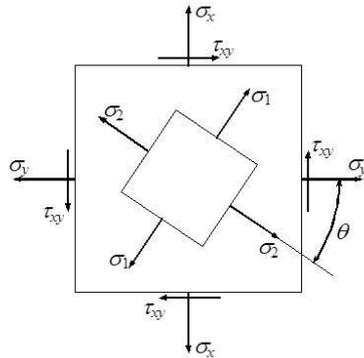
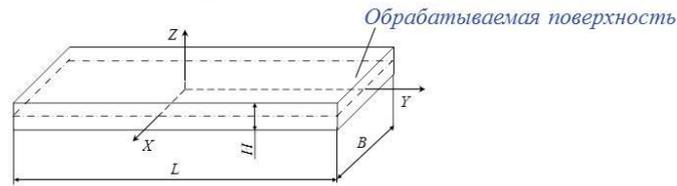


Схема плоского напряженного состояния

Формула для определения угла отклонения главных остаточных напряжений от оси Y заготовки

$$\operatorname{tg} 2\theta = 2\tau_{xy} / (\sigma_x - \sigma_y)$$

Здесь одновременно могут действовать все три фактора, приводящих к образованию остаточных напряжений: механический, температурный и структурно-фазовый. Технологии, которые относятся к поверхностной обработке, разделим на два основных вида: обработка поверхностным пластическим деформированием или ППД и резанием.

Основной гипотезой, при рассмотрении данных процессов, является допущение о **плоском напряженном состоянии**, согласно которому остаточные напряжения по нормали к поверхности (т.е. в направлении оси Z) равны нулю. В системе координат детали это состояние определяется двумя компонентами нормальных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , и касательной компонентой  $\tau_{xy}$ .

Как известно из курса сопротивления материалов, для сложного напряженного состояния можно найти систему координат, в которой действуют только нормальные напряжения, а касательные равны нулю. Координатные оси, а также максимальные и минимальные напряжения (соответственно  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ) в такой системе называются главными.

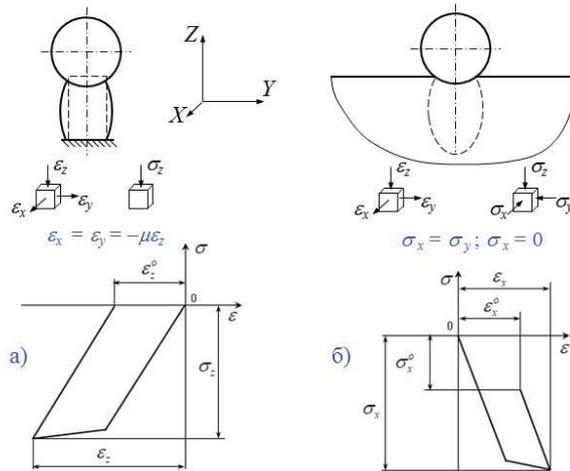
Ориентацию главных остаточных напряжений принято охарактеризовать углом  $\theta$  (тетта) между главным напряжением  $\sigma_2$  и осью Y системы координат детали. Этот угол определяется известной формулой.

Классическим примером обработки ППД является **дробеударная обработка**.

При внедрении дробинки в поверхность детали действующее напряженно-деформированное состояние является объемным, а деформационный процесс представляет собой осевое сжатие.

## 2.5 Остаточные напряжения

### Напряжено-деформированное состояние при внедрении шара



Зависимости между компонентами напряжений и деформаций при внедрении шара: а) в осевом направлении; б) в радиальном направлении

Рассмотрим данный процесс изолированно, уподобив дробинку шару, который внедряется в торцовую поверхность цилиндрического стержня.

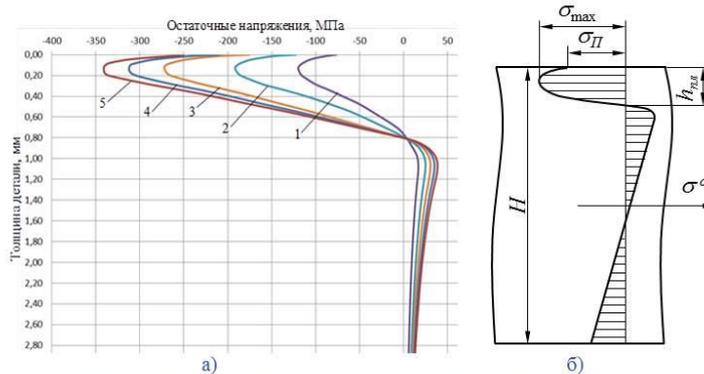
Деформированное состояние при сжатии стержня будет объемным, в связи с радиальной деформацией растяжения, которая одинакова в продольном и поперечном направлениях, а напряженное состояние будет линейным.

Отметим, что поперечная деформация в конечном итоге приводит к необратимому удлинению поверхностного слоя обработанной дробью детали. При внедрении шара в полупространство поперечная деформация протекает в стесненных условиях. Металл очага деформации вдавливаются в рядом лежащий металл, создавая напряжения сжатия. При этом в осевом направлении влияние окружающего металла незначительно, что позволяет практически полностью завершиться процессу разгрузки. Поэтому остаточные напряжения в осевом направлении пренебрежительно малы.

В радиальном же направлении разгрузка остается незавершенной в связи с влиянием соседнего упруго деформированного металла. Это приводит к появлению остаточных напряжений сжатия, совпадающих по знаку с напряжениями действовавшими при нагружении. Таким образом, при дробеударной обработке в поверхностном слое, с глубиной, равной глубине наклепа, которая в зависимости от диаметра и скорости дроби может достигать миллиметра и более, возникает плоское остаточное напряженное состояние. В случае внедрения дробинок по нормали к поверхности это состояние является осесимметричным, т.е. напряжения в продольном и поперечном направлениях равны между собой. При обработке под произвольным углом соотношение между компонентами напряжений несложно определить с использованием направляющих косинусов вектора скорости дроби.

## 2.5 Остаточные напряжения

### Остаточные напряжения после дробеударной обработки



- а) Распределения остаточных напряжений при обработке шариками  $D = 3,5$  мм,  $V = 17$  м/с мин<sup>-1</sup> полупространства с временем обработки: 1 – 4 с; 2 – 8 с; 3 – 12 с; 4 – 16 с; 5 – 20 с;
- б) Схема эпюры остаточных напряжений при дробеобработке пластины:  
 $H$  – толщина пластины;  $\sigma_{max}$  – остаточные напряжения подслоного максимума;  
 $\sigma_{II}$  – поверхностные остаточные напряжения;  $h_{кл}$  – глубина наклепа

Рассмотрим результаты конечноэлементного моделирования процесса обработки шариками полупространства из алюминиевого сплава. Данные распределения не являются уравновешенными в связи с невозможностью общей деформации полупространства. Уравновешивание эпюры происходит при обработке пластины конечной толщины. Суммарные остаточные напряжения определяются суперпозицией напряжений, возникающих при обработке дробью и при деформации пластины, вызванной удлинением её поверхностных слоев.

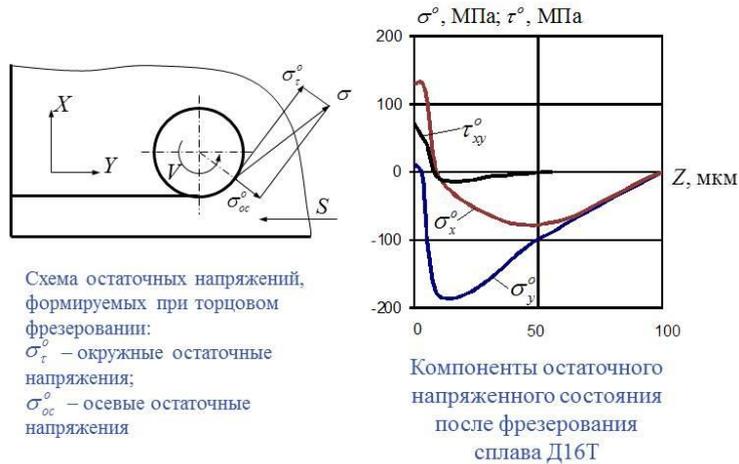
Характерной особенностью эпюры остаточных напряжений после дробеобработки является наличие подслоного максимума, т.е. снижения напряжений на обработанной поверхности. Это объясняется двумя причинами. Прежде всего, влиянием трения, а при больших контактных давлениях – схватывания обрабатываемого металла с поверхностью дробы. Это затрудняет пластическое деформирование поверхностного слоя. Вторая причина – местное повышение температуры при внедрении дробинки.

Так, при обработке сталей зафиксирована мгновенно действующая температура порядка  $650^{\circ}\text{C}$ , что значительно выше температуры рекристаллизации. Рекристаллизация как мы знаем, приводит к разупрочнению. Поскольку нагрев является кратковременным, вторая причина менее значительна.

Гораздо более сложное напряженное состояние поверхностного слоя возникает в результате **обработки резанием**.

## 2.5 Остаточные напряжения

### Остаточные напряжения после фрезерования



Так, при фрезеровании направление главных осей поля остаточных напряжений не совпадают ни с направлением формообразующих движений, ни с осями системы координат заготовки.

В зоне резания происходят следующие взаимосвязанные физико-химические явления:

Во-первых, возникает пластическая деформация растяжения во внешних слоях вновь образуемой поверхности. Основной причиной здесь является трение при контакте с задней поверхностью инструмента или с наростом. При этом слой металла, лежащий ниже, растягивается упруго. После прохождения инструмента упруго растянутый металл стремится сжаться, но этому препятствует пластически деформированный слой. В результате во внешнем слое формируются остаточные напряжения сжатия, а во внутреннем – растяжения.

Во-вторых, происходят нагрев внешнего слоя, который стремится удлиниться, однако этому препятствует более холодный внутренний слой. Следовательно, внешний слой подвергается сжатию, а внутренний – растяжению. При интенсивном нагреве в поверхностном слое возникает пластическая деформация сжатия. При последующем охлаждении внешний слой стремится сжаться до размеров, меньших первоначальных на величину этой деформации. Однако внутренний упруго напряженный слой будет этому препятствовать. В результате во внешнем слое возникнут напряжения растяжения, а во внутренних – напряжения сжатия.

Процесс резания может сопровождаться фазовыми превращениями, являющимися иногда более сильным источником образования макронапряжений, чем механический и тепловой факторы.

Таким образом, остаточное напряженное состояние поверхностного слоя после обработки резанием зависит от свойств обрабатываемого материала,

режима резания, геометрии инструмента, величины его износа и других условий. При фрезеровании это состояние принято характеризовать двумя компонентами напряжений – тангенциальной и осевой.

Известно, что для всех материалов, за исключением титановых сплавов, характерны растягивающие остаточные напряжения в тангенциальном направлении и сжимающие – в осевом. Титановым сплавам присущи обе отрицательные компоненты.

При переходе к системе координат заготовки получаем плоское остаточное напряженное состояние общего вида с двумя нормальными компонентами и одной касательной.

## 2.5 Остаточные напряжения

### Методы определения остаточных напряжений

#### ■ Неразрушающие (физические) методы

*Базируются на наличии зависимостей между остаточными напряжениями и параметрами материала (магнитная проницаемость, искажение кристаллической решетки, изменение скорости распространения упругой волны и т.п.) которые также зависят от структурного состояния материала.*

*Преимущества: высокая производительность, возможность использования в автоматизированных технологических процессах.*

*Недостатки: низкая точность, возможность измерения только поверхностных напряжений.*

#### ■ Разрушающие (механические)

*Базируются на неизменности модуля упругости материала, и не зависят от его структурного состояния. Основаны на измерении деформации образцов после удаления с них слоев металла, разрезки на полоски, создания канавок, отверстий и т.д.*

*Преимущества: точность и надежность; возможность получения распределений остаточных напряжений по глубине.*

*Недостатки: разрушающий характер, снижение точности измерений из-за влияния остаточных напряжений, создаваемых в ходе обработки образцов.*

Существуют две основные группы методов определения остаточных напряжений – неразрушающие, или физические и разрушающие, или механические.

Неразрушающие методы являются достаточно производительными, их можно использовать в автоматизированных технологических процессах. Они базируются на наличии зависимостей между величиной остаточных напряжений и параметрами материала, такими, как магнитная проницаемость, искажение кристаллической решетки, изменение скорости распространения упругой волны и т.п. Однако, на эти параметры влияют не только поля напряжений, но и ряд других факторов, связанных со структурными изменениями материала.

Для учета этих факторов обычно проводят предварительные тестовые испытания на образцах-эталонах, изготовленных из того же материала, но свободных от остаточных напряжений.

Результаты измерений деталей сравниваются с эталонными. Для вычисления остаточных напряжений используются калибровочные зависимости, получаемые с использованием разрушающих методов. В большинстве случаев результаты таких измерений носят качественный характер.

Физические методы применяются для контроля изделий, где выход из требуемого диапазона напряжений является причиной отбраковки конкретного изделия из партии.

Механические методы определения остаточных напряжений в отличие от физических не зависят от структурного состояния материала и базируются на неизменности его модуля упругости. К ним относятся методы, основанные на измерении деформации образцов после удаления слоев металла, разрезки на полоски, создания канавок и т.д.

К преимуществам механических методов относятся их точность и надежность, а также возможность получения распределений напряжений по глубине.

Очевидным недостатком является их разрушающий характер. Кроме того, в ходе обработки образцов могут создаваться добавочные остаточные напряжения, что снижает точность измерений.

Основные методы, применяемые для измерения остаточных напряжений первого рода, будут изучены в ходе проведения лабораторных занятий.