

# Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении

Проф., д.т.н. *Скотникова Маргарита Александровна*  
Skotnikova@mail.ru

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

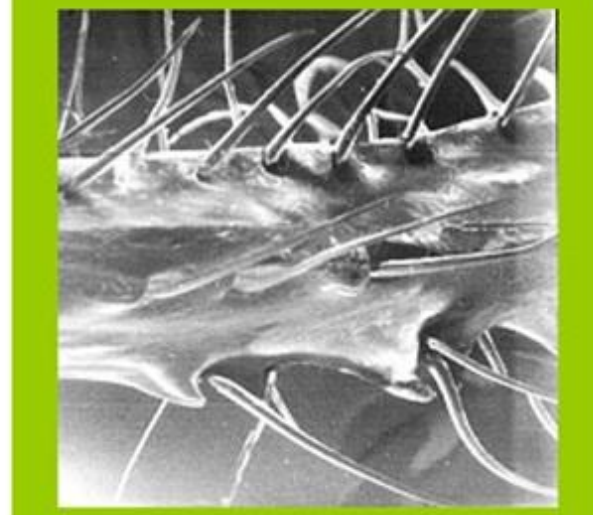
Кафедра "Машиноведение и  
основы конструирования"  
ИММиТ САБПУ



x 1



x 100



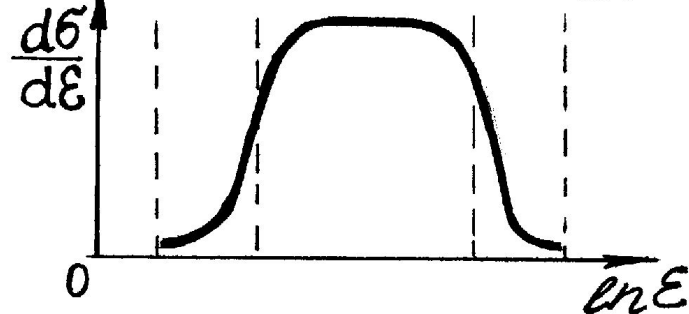
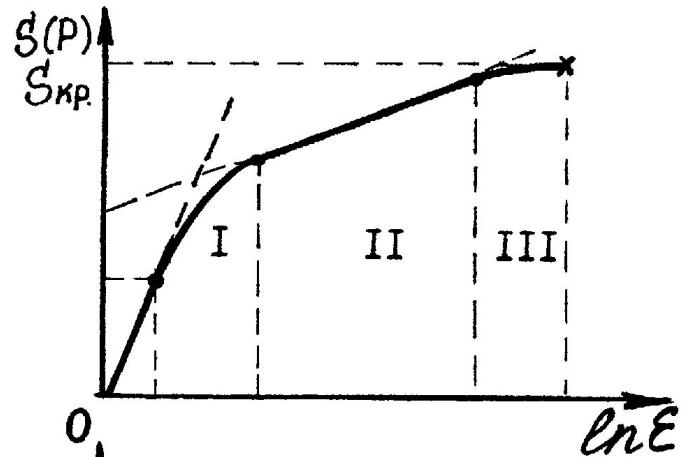
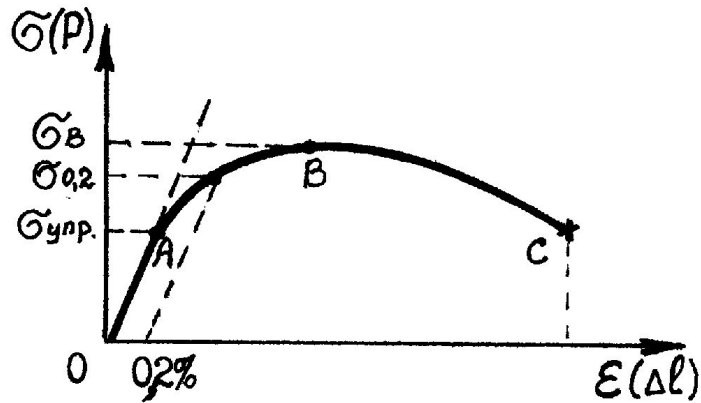
x 10000

## Тема 2. Формирование и контроль остаточных напряжений, возникающих под действием различных технологических операций. Факторы, приводящие к возникновению остаточных напряжений.

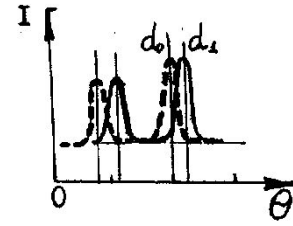
### Содержание:

1. Классификация остаточных напряжений.
2. Факторы, приводящие к возникновению остаточных напряжений. *Механический фактор*. Влияние механической обработки.
3. *Тепловой фактор*. Термические напряжения, возникающие в сечении заготовок в результате закалки не полиморфного материала.
  - Термические напряжения, возникающие в сечении заготовок в результате закалки полиморфного материала.
  - Термические напряжения, возникающие по сечению сварного соединения.
  - Термические напряжения в материалах с ГПУ-решёткой, возникающие в результате анизотропии теплового расширения.
4. *Структурно-фазовые превращения*
  - Фазовый наклеп. – Мартенситные превращения при закалке. – Мартенситные превращения при деформации. – Распад пересыщенных твердых растворов по механизму старения.
5. *Коррозионные напряжения*

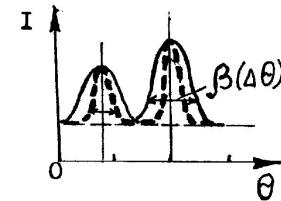
## 2.1. Исследование деформации. Классификация остаточных напряжений



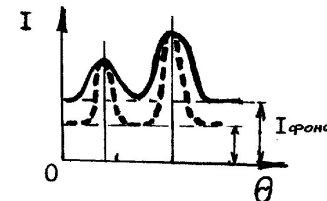
- Факторы, приводящие к возникновению остаточных напряжений:
- А. Механический
- Б. Тепловой
- В. Структурно-фазовый
- С. Коррозионный



- 1. **Макронапряжения** (напряжения I рода) - упругие напряжения уравнивающиеся в объеме всей детали.
- 2. **Микронапряжения** (напряжения II рода) - упругие напряжения, уравнивающиеся в пределах отдельных зерен или блоков (дальнодействующие).



- 3. **Статические искажения решетки** - упругие напряжения, уравнивающиеся в пределах небольших групп атомов.



# 2.1. Формирование и контроль остаточных напряжений

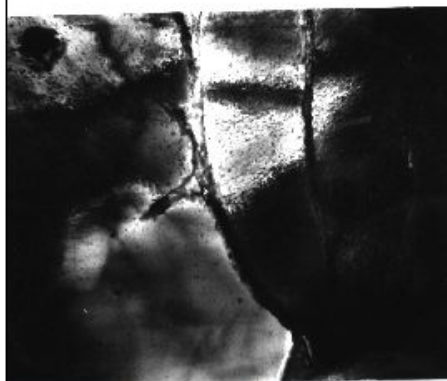
- Обобщенно можно сказать, что остаточные напряжения первого рода есть результат неравномерных пластических деформаций различных слоев детали. Пример – искривление детали в ту или иную сторону.
- Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на прочность и долговечность деталей машин и конструкций: остаточные сжимающие напряжения ( - ), возникающие в поверхностном слое, повышают циклическую прочность деталей, т.к. они разгружают поверхностный слой от напряжений, вызванных нагрузками и, наоборот, растягивающие остаточные напряжения (+) уменьшают прочность деталей вследствие повышения напряженности поверхностного слоя.
- В зависимости от характера и интенсивности физико- механических процессов, происходящих при обработке, остаточные напряжения могут иметь различный знак: + или -
  - + - **растяжение**;
  - - **сжатие**.
- Условие равновесия требует, чтобы в объеме детали сумма проекций всех сил была равна нулю. Поэтому в детали есть область со сжимающими и растягивающими остаточными напряжениями.
- В инженерной практике остаточные напряжения первого рода принято представлять в виде проекции на оси заданной системы координат. Например, для тела вращения используют понятия:
  - **осевых** , **окружных (тангенциальных)** и **радиальных остаточных напряжений**.

$$\sigma_x^0$$

$$\sigma_r^0$$

$$\sigma_y^0$$

# ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЛАКСАЦИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ



х 24000

№  
п/п

## ФАТОРЫ ПРИВОДЯЩИЕ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ

1.

Механический (силовой)

2.

Термический (тепловой)

3.

Структурно-фазовый

4.

Коррозионный (электрохимический)

Контроль внутренних напряжений по экстинкционным контурам на электронно-микроскопических снимках



х 24000

№ п/п

## МЕХАНИЗМЫ РЕЛАКСАЦИИ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ

1. Структурная релаксация

2. Концентрационная релаксация

3. Зарождение микротрещин

№ п/п

## ФАКТОРЫ ВЛИЯЮЩИЕ НА РЕЛАКСАЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ

1. Энергия дефекта упаковки материала

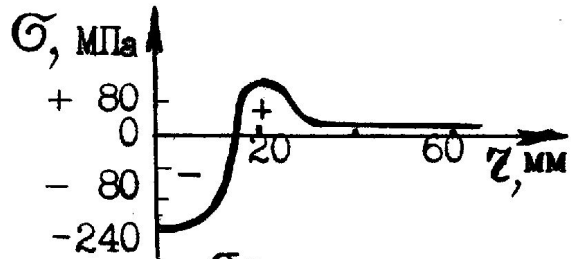
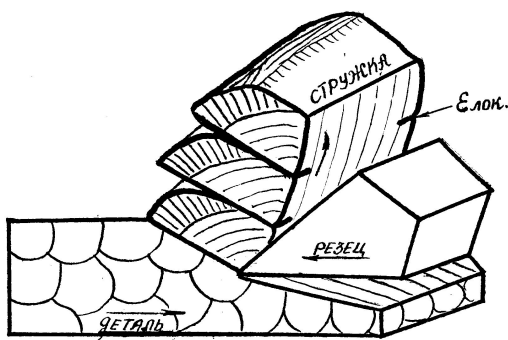
2. Степень наклепа

3. Температура деформации или нагрева

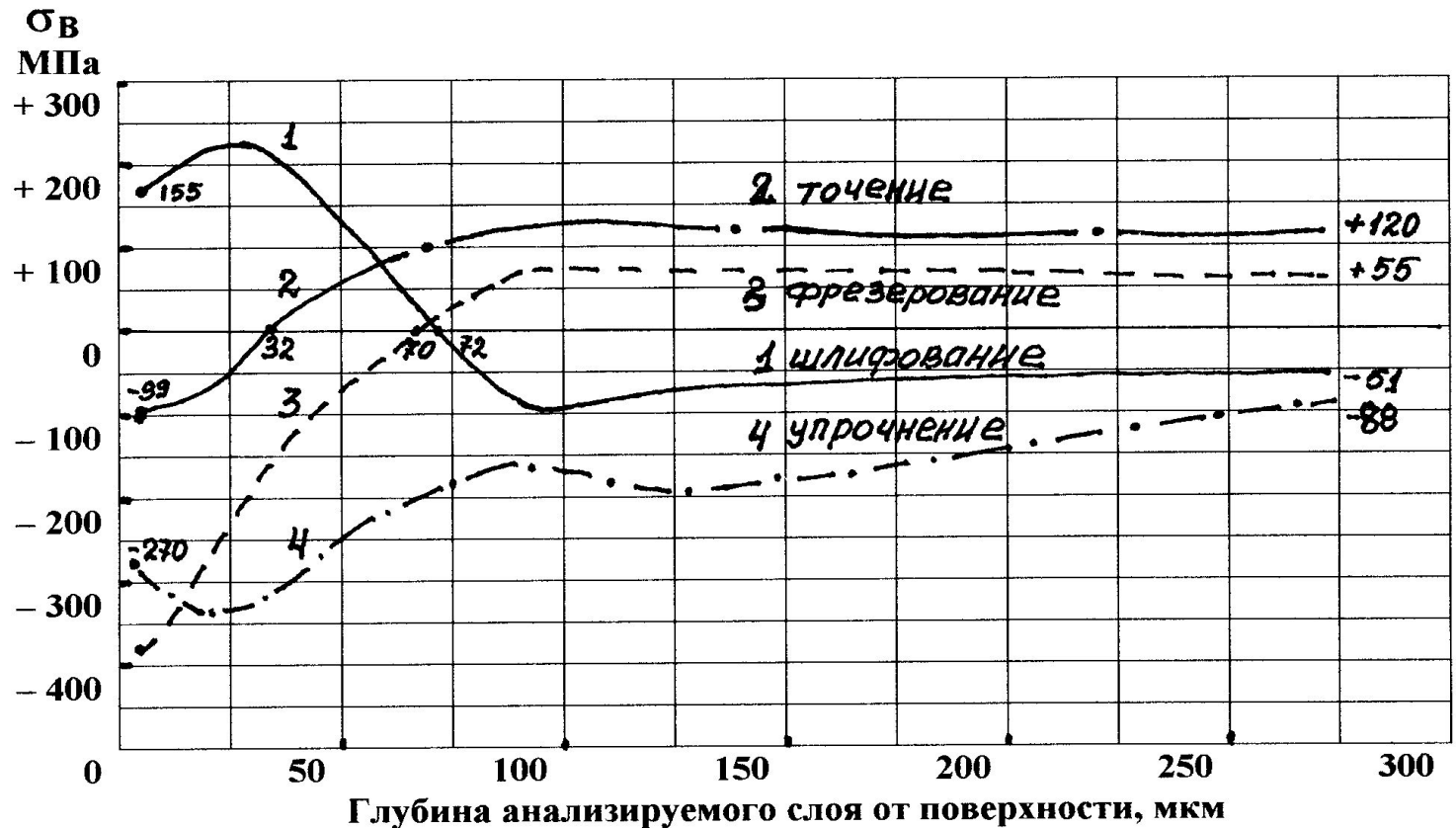
4. Скорость деформации

5. Вид упруго-напряженного состояния

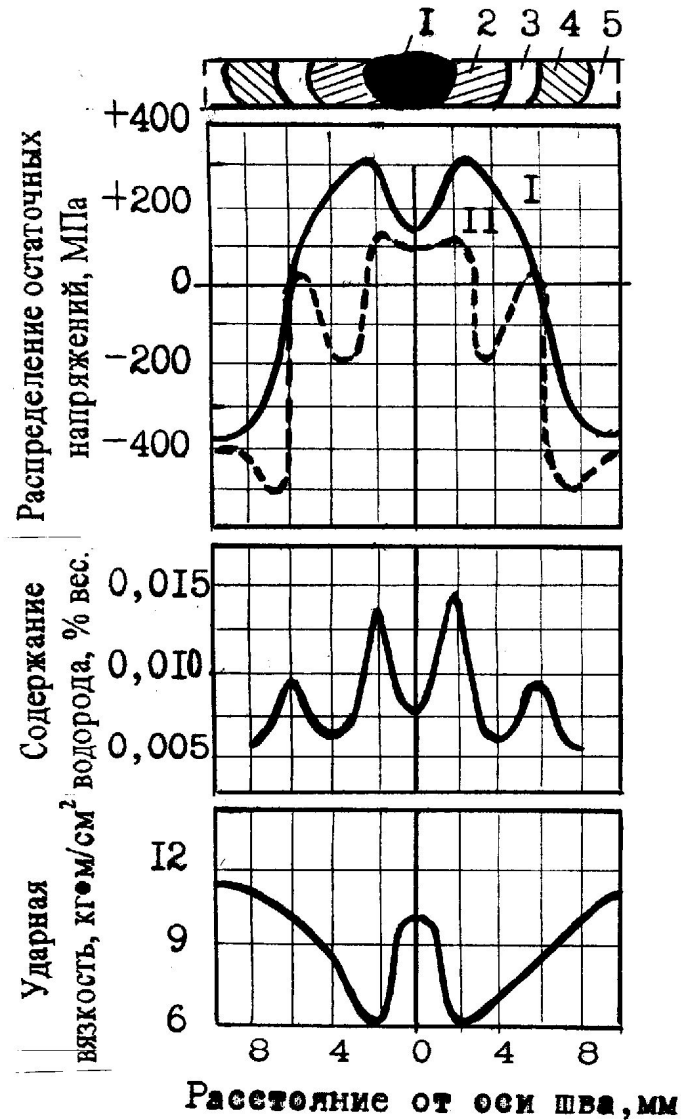
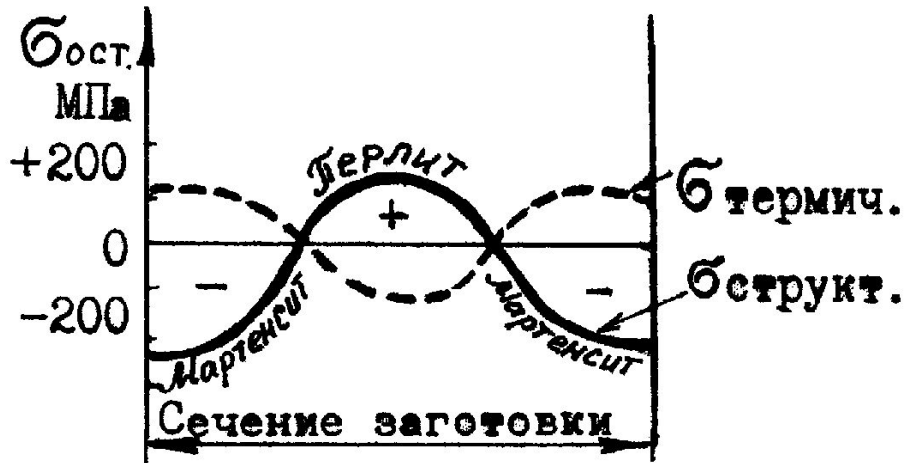
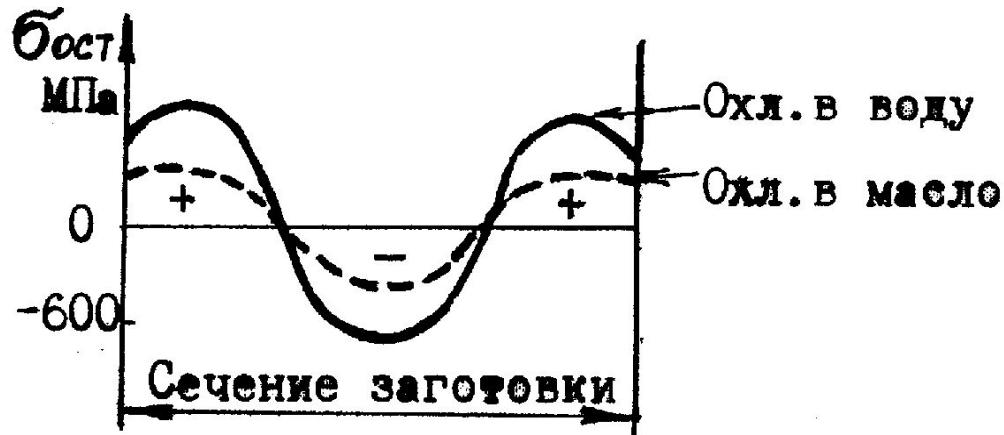
## 2.2. Механические напряжения



- Эпюры остаточных напряжений после
- шлифования (1), точения (2), фрезерования (3) стали 12Х13



## 2.3. Термические напряжения



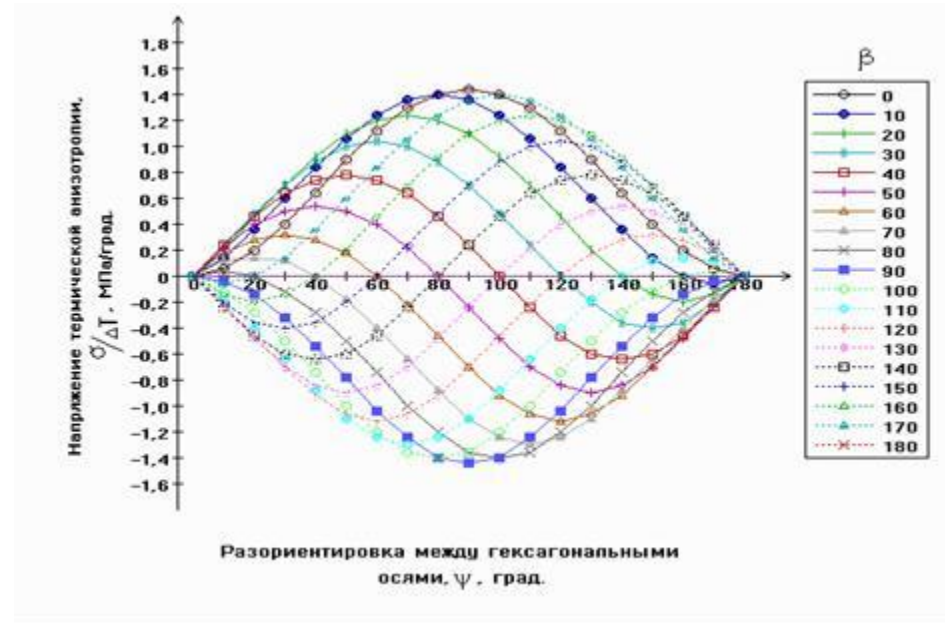
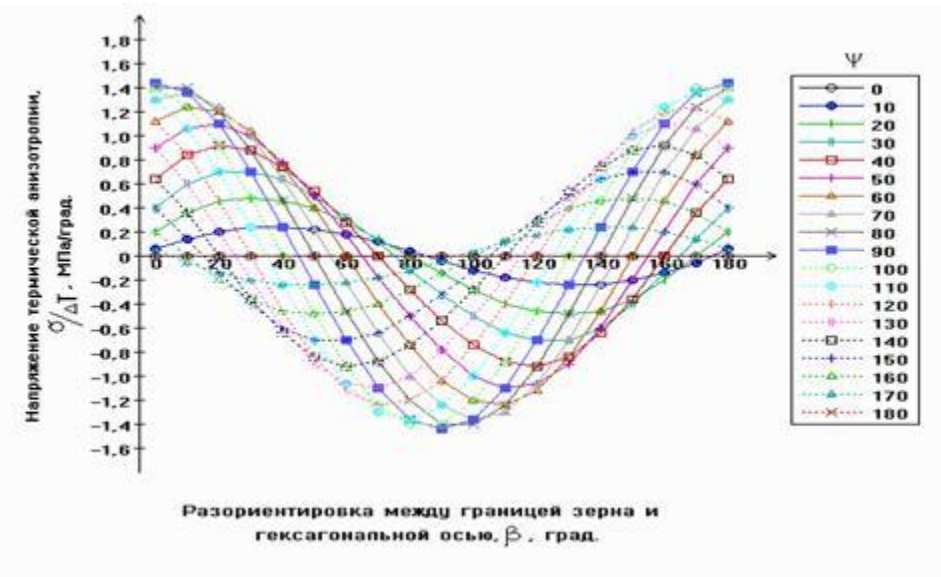
## 2.3. Тепловые напряжения термической анизотропии

Физико-механические свойства исследуемых материалов

|  | Fe     | Zr     | Mg    | Co     | Ti     | Re     | Cd     | Zn     |
|--|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Параметры кристаллической решетки, А   |        |        |       |        |        |        |        |        |
| a, А   | 2,87   | 3,230  | 3,209 | 2,507  | 2,950  | 2,761  | 2,296  | 2,665  |
| b, А   | 2,87   | 5,133  | 5,210 | 4,069  | 4,683  | 4,458  | 5,630  | 4,947  |
| b/a  | 1      | 1,589  | 1,624 | 1,626  | 1,587  | 1,614  | 1,886  | 1,856  |
| Расстояния между кристаллографическими плоскостями типа {011}, А                 |        |        |       |        |        |        |        |        |
| $d_{\text{кк}}, \text{А}$  | 2,01   | 2,44   | 2,45  | 1,92   | 2,24   | 2,10   | 2,34   | 2,08   |
| $d_{\text{деф}}, \text{А}$   | 1,96   | 2,39   | 2,40  | 1,87   | 2,19   | 2,05   | 2,29   | 2,03   |
| Коэффициент теплового расширения ( $\times 10^{-6}$ , 1/град.)                   |        |        |       |        |        |        |        |        |
| $\alpha_{\parallel}$   | -      | 6,5    | 27,0  | 16,1   | 9,5    | 12,45  | 52,6   | 52,9   |
| $\alpha_{\perp}$   | -      | 5,6    | 25,4  | 12,8   | 5,6    | 4,67   | 21,4   | 15,1   |
| Модуль ( $\times 1$ , МПа) и коэффициенты упругости ( $\times 10^{-5}$ , 1/ МПа) |        |        |       |        |        |        |        |        |
| E,   | 211400 | 97000  | 44830 | 204000 | 110000 | 458100 | 51000  | 100000 |
| $S_{11}$   | -      | 1,013  | 2,20  | 0,472  | 0,958  | 0,212  | 1,240  | 0,838  |
| $S_{33}$   | -      | 0,799  | 1,97  | 0,319  | 0,698  | 0,170  | 3,520  | 2,838  |
| $S_{13}$   | -      | -0,241 | -0,50 | -0,069 | -0,189 | -0,040 | -0,920 | -0,731 |
| $S_{44}$   | -      | 3,130  | 6,10  | 1,324  | 2,140  | 0,616  | 4,980  | 2,610  |
| $S_{12}$   | -      | -0,404 | -0,79 | -0,231 | -0,462 | -0,080 | -0,076 | -0,058 |



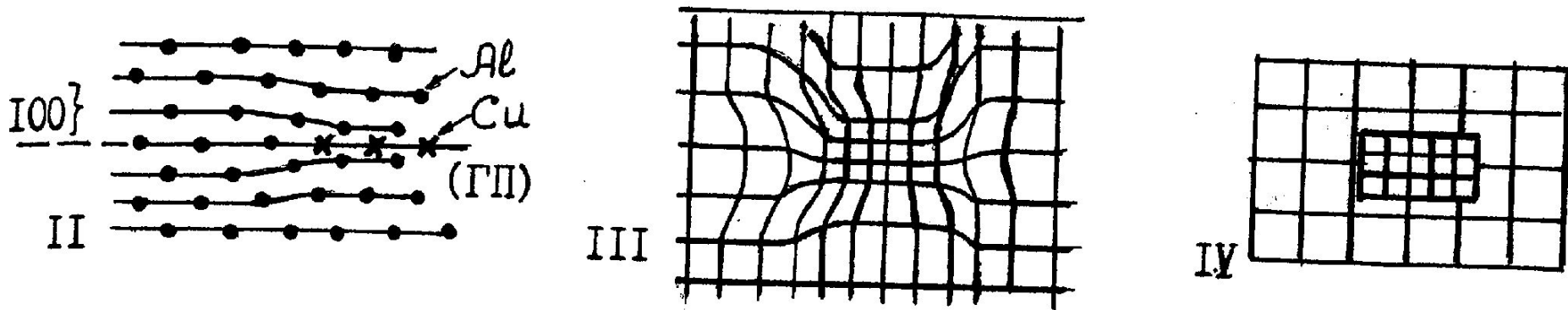
## 2.3. Тепловые напряжения термической анизотропии



$$\sigma = \frac{(\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}) [\cos^2\beta - \cos^2(\beta+\psi)]}{\Delta T S_{11} [\sin^4\beta + \sin^4(\beta+\psi)] + S_{33} [\cos^4\beta + \cos^4(\beta+\psi)] + (2S_{13} + S_{44}) [\cos^2\beta \cdot \sin^2\beta + \cos^2(\beta+\psi) \cdot \sin^2(\beta+\psi)]}$$

где  $\alpha_{\parallel}$  – коэффициент линейного расширения вдоль оси “с”;  
 $\alpha_{\perp}$  – коэффициент линейного расширения вдоль оси “а”;  
 $S_{ik}$  – коэффициенты упругости.

## 2.4. Структурно-фазовые напряжения



- I. Дораспадный период.
- II. Подготовительный (инкубационный) период распада. Образование зон Гинье-Престона (Г.П.).
- III. Самопроизвольный распад. Формирование на базе зон Г.П. предвыделений - новых фаз с когерентной с матрицей решеткой.
- IV. Обособление продуктов распада, снятие когерентности с границ фаз.

## 2.5. Коррозионные напряжения

Электродные потенциалы, E, В , 20°С.

|           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |   |                                   |           |          |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|-----------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Zi        | K         | Na        | Mg        | Ti        | Al        | Mn        | Zn        | Cr        | Fe        | Ni        | Sn        | H | Cr <sub>2</sub><br>O <sub>3</sub> | Cu        | Ag       | Pt        | Au        |
| -<br>2,96 | -<br>2,92 | -<br>2,71 | -<br>2,37 | -<br>1,75 | -<br>1,66 | -<br>1,18 | -<br>0,76 | -<br>0,74 | -<br>0,44 | -<br>0,23 | -<br>0,14 | 0 | +<br>0,1                          | +<br>0,34 | +<br>0,8 | +<br>1,19 | +<br>1,42 |

низкая коррозионная стойкость

высокая коррозионная стойкость

- **Анодные процессы** - заключаются в том, что металлы с более отрицательным потенциалом в результате взаимодействия с токопроводящей средой (электролитом), содержащей атомы кислорода, водорода, хлора и др., будут окисляться (растворяться), переходя в раствор в виде ионов при соответствующих таблице разностях потенциалов по реакциям:
  - $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$                        $Cr \rightarrow Cr^{3+} + 3e^-$
  - $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$                        $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$
- **Катодные процессы** - заключаются в том, что ионы металлов с более положительным потенциалом в результате взаимодействия с электролитом будут восстанавливаться (электролитически осаждаться) с участием электронов по реакции:
  - $Me^{2+} + 2e^- \rightarrow 2 Me$     например:  $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$

# Оценка внутренних напряжений

| Вид внутренних напряжений            | Максимальная амплитуда, МПа | Размер действия, мкм |
|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| <i>Механические напряжения</i>       | 1000... 1300                | 50... 200            |
| <i>Термические напряжения</i>        |                             |                      |
| закалочные                           | 600                         | 20000                |
| сварочные                            | 100... 500                  | 10000                |
| термической анизотропии              | 700... 1000                 | 3... 10              |
| <i>Структурно-фазовые напряжения</i> |                             |                      |
| фазовый наклеп                       | 10... 400                   | $10^{-4}$ ... 1      |
| мартенситные                         | 1000... 1500                | $10^{-4}$ ... 1      |
| распад пересыщенных растворов        | 100... 1000                 | $10^{-4}$ ... 1      |
| <i>Коррозионные напряжения</i>       | 300                         | 1... 10              |

# Контрольные вопросы по Теме 2

1. На поверхности детали машины после точения, фрезерования, шлифования, поверхностной пластической обработки и др. какие возникают остаточные напряжения ?.
2. Напряжения термической анизотропии возникают в металлах с кристаллической решеткой какого типа ?.
3. Мартенситное превращение сопровождается увеличением элементарной кристаллической решетки металла и приводит к возникновению каких остаточных напряжений ?.
4. Назовите фактор, не приводящий к возникновению остаточных (внутренних) напряжений ?.
5. Стадия распада неравновесных твердых растворов, на которой возникают значительные внутренние напряжения ?
6. Остаточные макронапряжения I, II, III рода оцениваются с помощью метода рентгеноструктурного анализа по ряду изменений на дифрактограммах.
7. На поверхности деталей из не полиморфного материала после высокого нагрева и резкого охлаждения какие возникают остаточные напряжения ?.
8. Какие остаточные напряжения в металле оказываются полезными ?
9. На поверхности деталей машины после поверхностного пластического деформирования (наклепа дислокациями) возникают остаточные напряжения ?.
10. Чтобы снять остаточные напряжения в металлической заготовке, какие действия необходимо произвести?

**Спасибо  
за внимание**