

# Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении

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

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

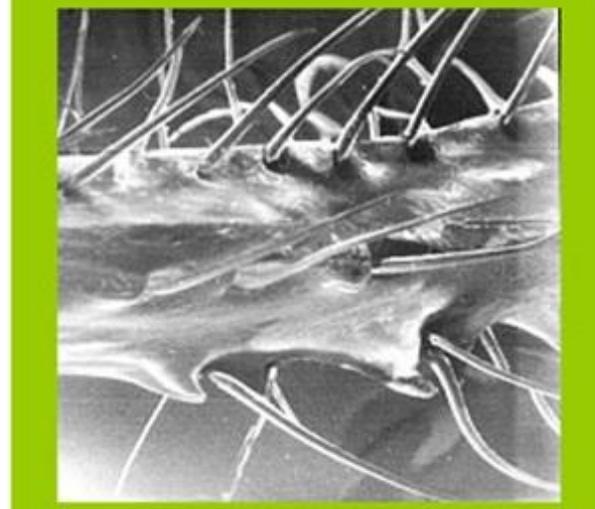
Кафедра "Машиноведение и  
основы конструирования"  
ИММиТ САБПУ



x 1



x 100



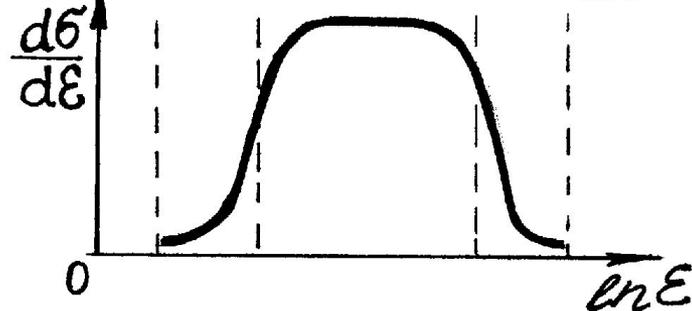
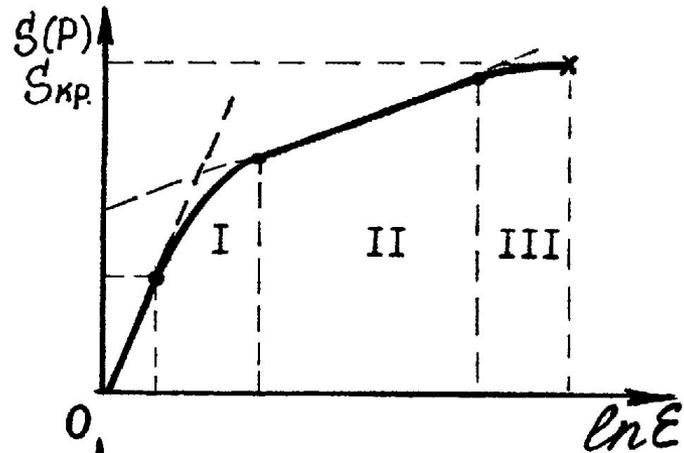
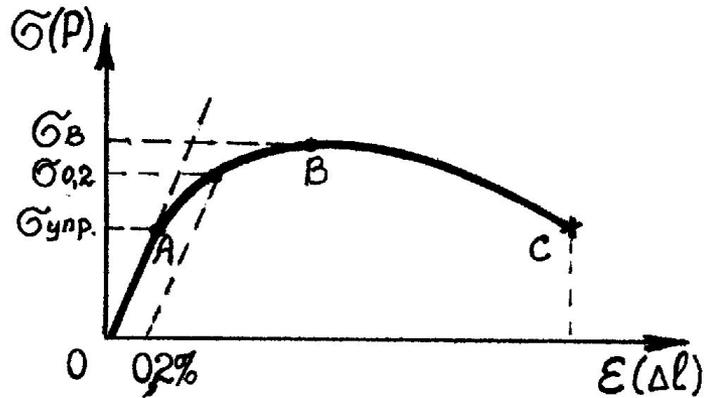
x 10000

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

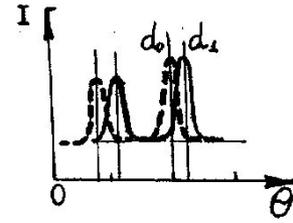
### Содержание:

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*

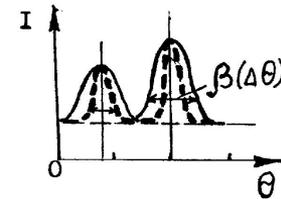
## 2.1. Исследование деформации. Классификация остаточных напряжений



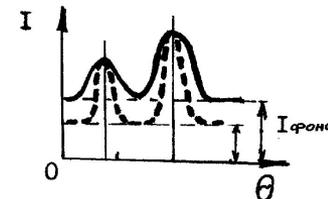
- Факторы, приводящие к возникновению остаточных напряжений:
- **А. Механический**
- **Б. Тепловой**
- **В. Структурно-фазовый**
- **С. Коррозионный**



- **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 (дальнедействующие).



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



# 2.1. Формирование и контроль остаточных напряжений

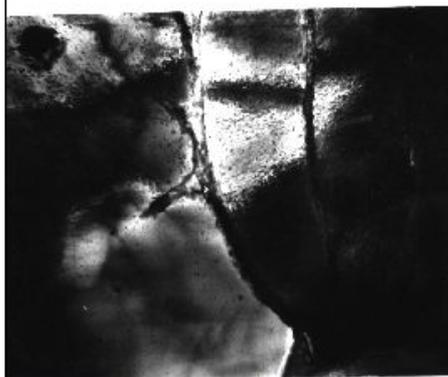
- Обобщенно можно сказать, что остаточные напряжения первого рода есть результат неравномерных пластических деформаций различных слоев детали. Пример – искривление детали в ту или иную сторону.
- Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на прочность и долговечность деталей машин и конструкций: 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**.

$$\sigma_x^0$$

$$\sigma_r^0$$

$$\sigma_\gamma^0$$

# 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

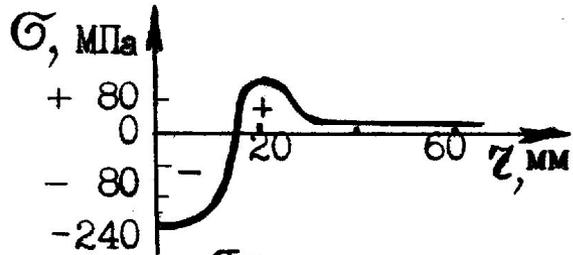
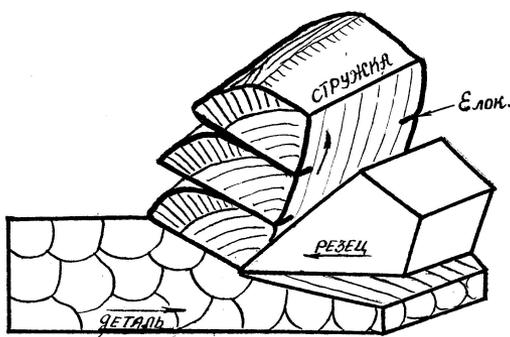
2. Степень наклепа

3. Температура деформации или нагрева

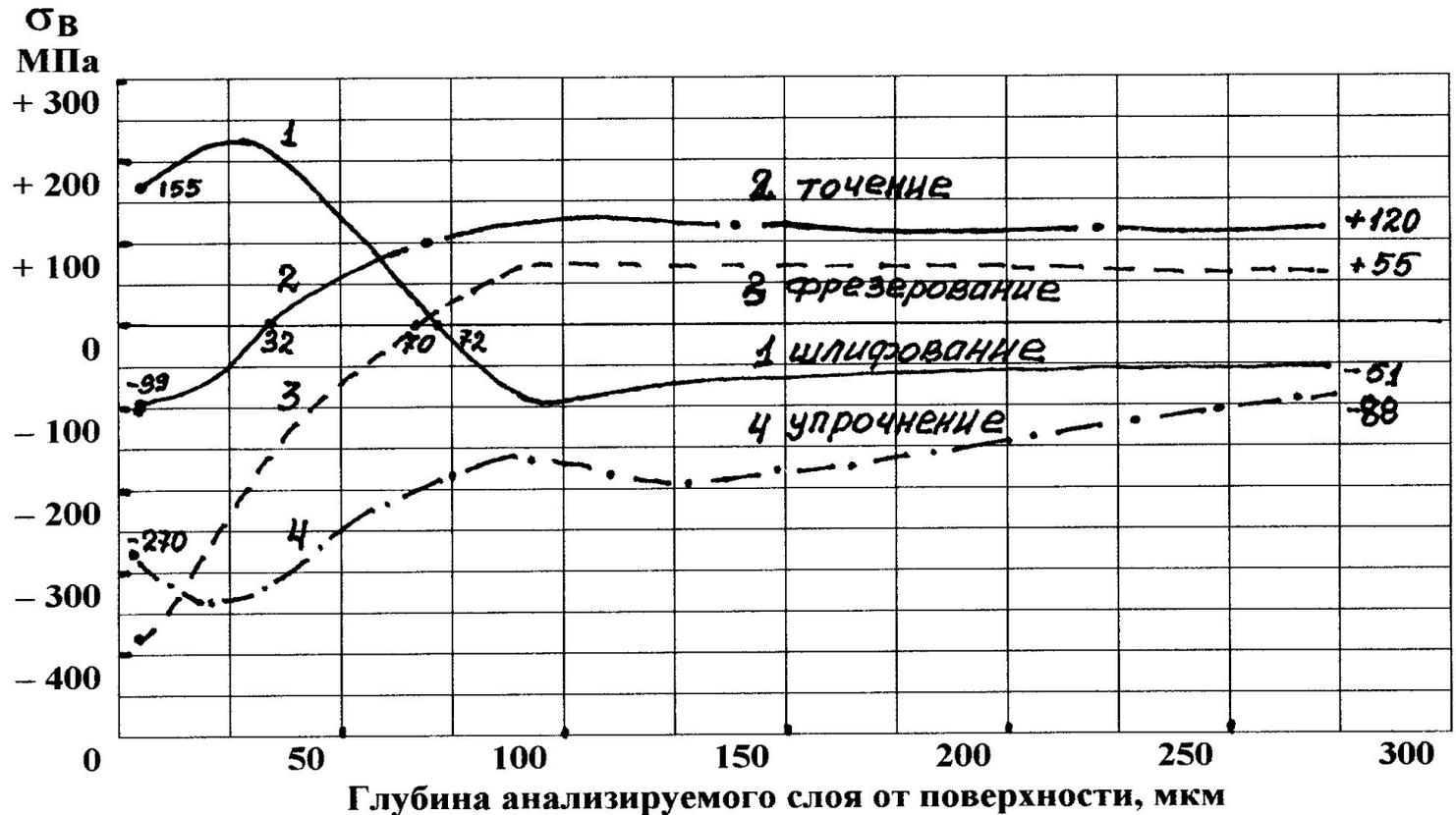
4. Скорость деформации

5. Вид упруго-напряженного состояния

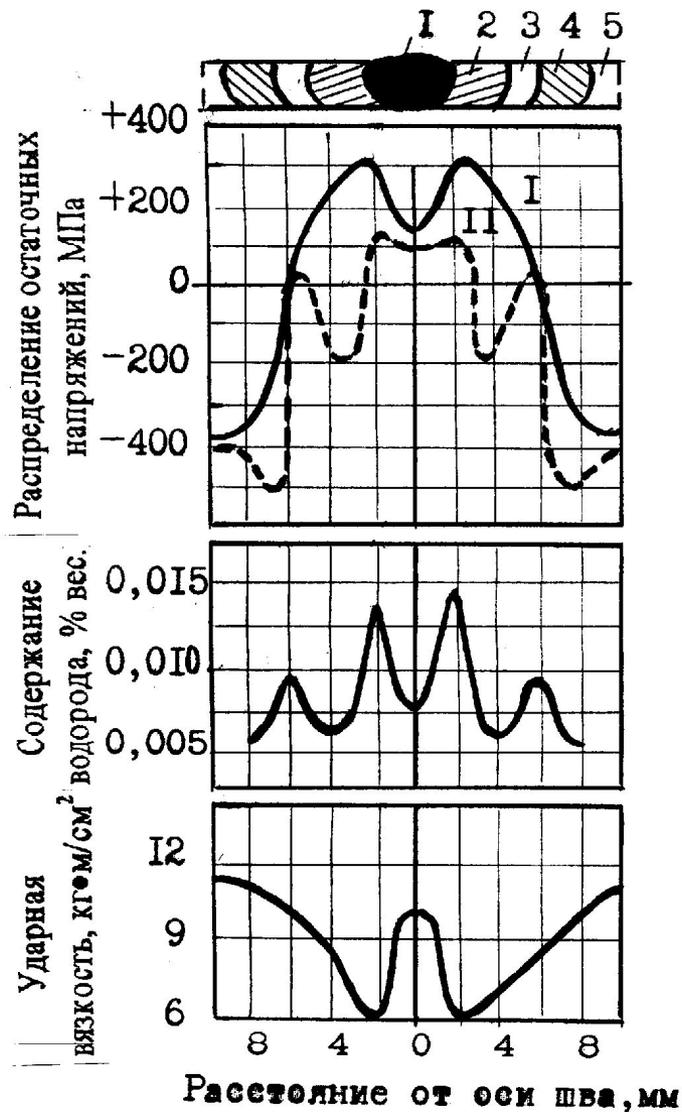
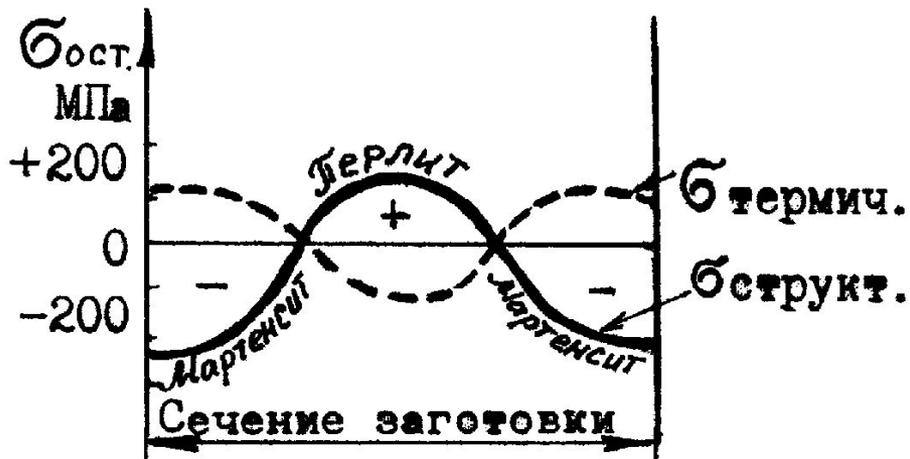
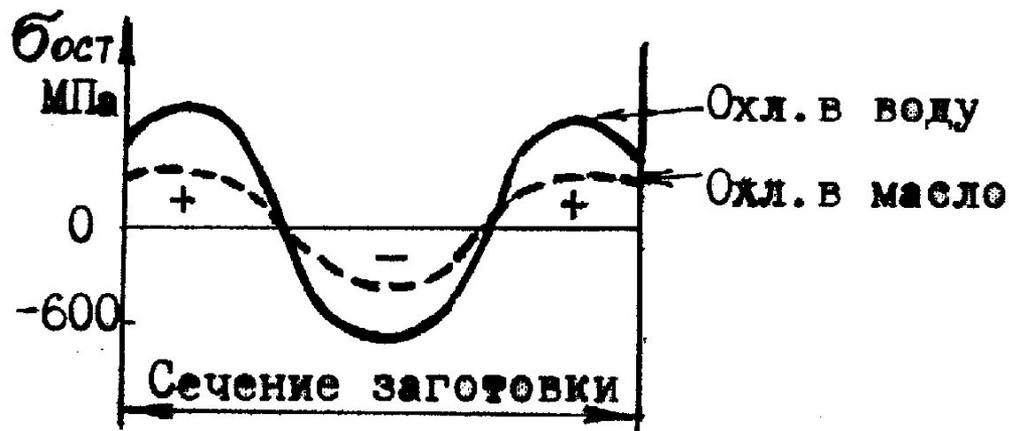
## 2.2. Механические напряжения



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



## 2.3. Термические напряжения

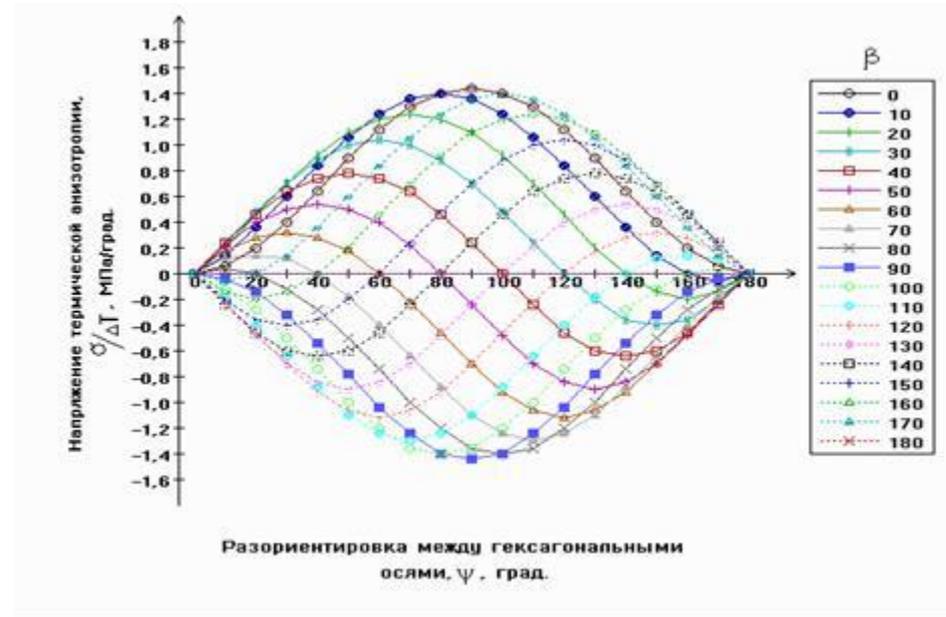
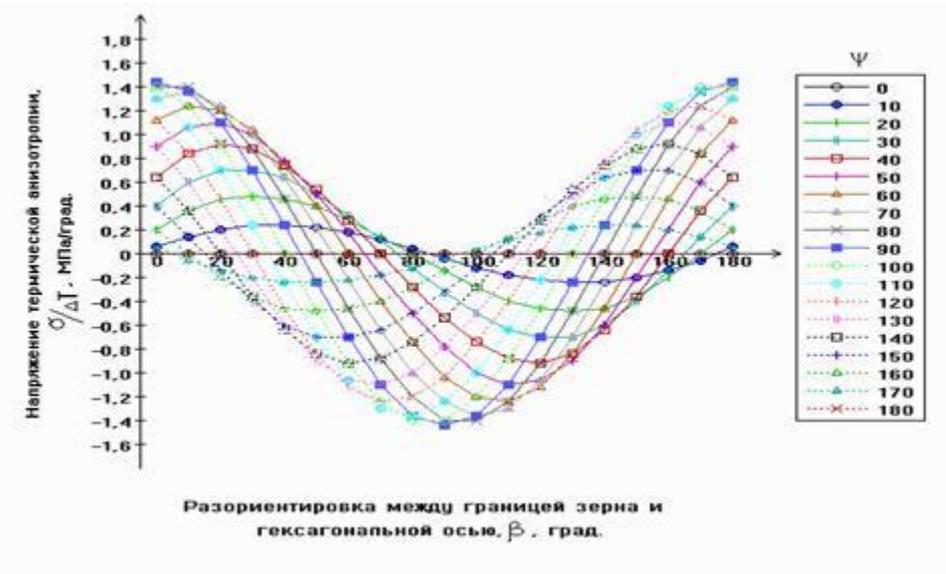


## 2.3. Тепловые напряжения термической анизотропии

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

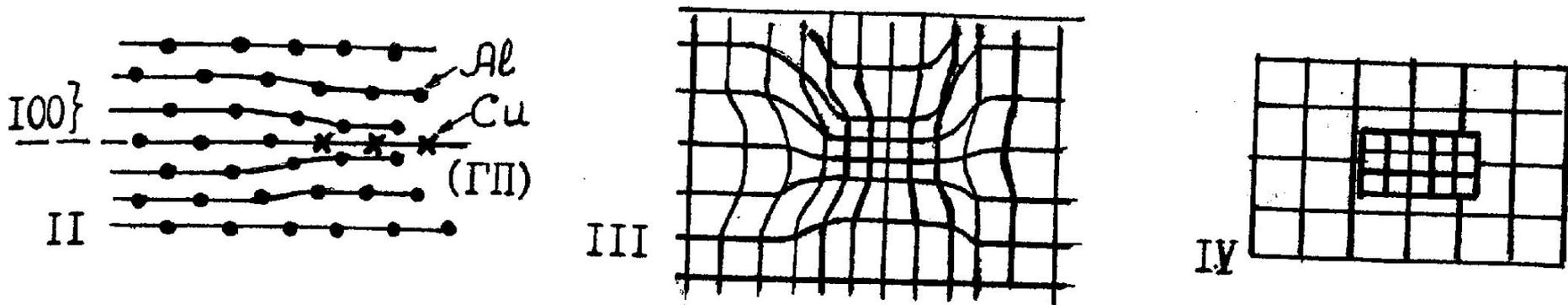
## 2.3. Тепловые напряжения термической анизотропии



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

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> O <sub>3</sub>	Cu	Ag	Pt	Au
- 2,96	- 2,92	- 2,71	- 2,37	- 1,75	- 1,66	- 1,18	- 0,76	- 0,74	- 0,44	- 0,23	- 0,14	0	+ 0,1	+ 0,34	+ 0,8	+ 1,19	+ 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**