

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

В. А. Михеев, В. М. Зайцев

Анизотропные материалы

Электронное учебное пособие
по лекционному курсу

САМАРА
2010

Авторы: **Михеев Владимир Александрович,**
Зайцев Вадим Михайлович

Пособие предназначено для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по магистерской программе «Инновационные технологии получения и обработки материалов с заданными свойствами» по направлению 150400.68 «Металлургия».

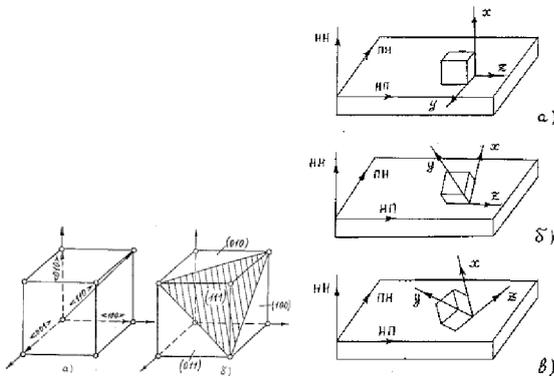
Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

Лекция 1

Методы описания текстуры

Обозначение направлений и плоскостей в кристалле

$[hkl]$ - направление, $\langle hkl \rangle$ - семейство направлений, (hkl) - плоскость, $\{hkl\}$ - семейство плоскостей.



Для описания аксиальной текстуры достаточно указать ее направление $\langle hkl \rangle$.

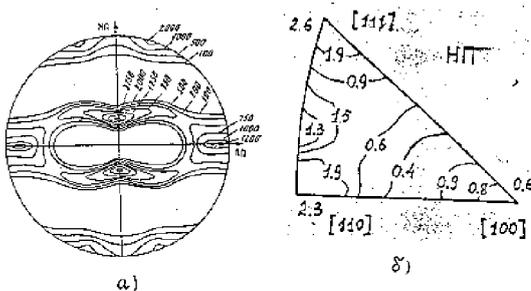
Аксиальная текстура – когда одно из направлений во всех кристаллитах совпадает с некоторым направлением в образце, которое называется осью аксиальной текстуры. Аксиальная текстура образуется, например, при волочении проволоки.

Текстура прокатки является наиболее общим видом кристаллической текстуры и обозначается след. обр.: $\{hkl\}\langle uvw \rangle$, где hkl – направление в кристалле совпадающее с направлением нормали, uvw - направление в кристалле совпадающее с направлением рокатки. На рис представлены следующие виды текстуры прокатки: а) - $(100)[001]$ - кубическая; б) - $(110)[001]$ - ребровая; в) - $(111)[112]$.

Качественное описание и анализ кристаллографической текстуры осуществляется, как правило, путем построения прямых и обратных полюсных фигур. (рис. 4).

Полюсные фигуры (ПФ) представляют собой графическое изображение статистической вероятности совпадения определенного кристаллографического направления в кристалле с различными направлениями в образце.

Обратные полюсные фигуры (ОПФ) представляют вероятность совпадения направления в образце с различными направлениями в кристалле.



Точки ПФ и ОПФ являются стереографической проекцией точек единичной сферы определяющий направления в кристалле. Так как материалы полученные прокаткой имеют ортотропную симметрию, ПФ для них будут иметь 2 оси

симметрии и их можно представлять четвертью ПФ. Для материалов с кубической решеткой из-за симметрии ОПФ можно представлять стереографическим треугольником.

При исследованиях упруго-пластических свойств с помощью текстуры обычно используются следующие текстурные параметры (их также называют ориентационными факторами текстуры):

$$\Delta_i = \langle \alpha_{i1}^2 \alpha_{i2}^2 + \alpha_{i2}^2 \alpha_{i3}^2 + \alpha_{i3}^2 \alpha_{i1}^2 \rangle = \left\langle \frac{h_i^2 k_i^2 + k_i^2 l_i^2 + l_i^2 h_i^2}{h_i^2 + k_i^2 + l_i^2} \right\rangle,$$

где угловые скобки $\langle \dots \rangle$ обозначают статистическое осреднение по всем кристаллитам, составляющим данный поликристалл; h_i, k_i, l_i - индексы Миллера, определяющие i -ое направление в кристалле относительно системы координат связанной с образцом; α_{ij} - направляющие косинусы i -го направления в кристалле.

Для многокомпонентной текстуры, например, для четырех-компонентной: $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 112 \rangle$, $\langle 100 \rangle$ ориентационные факторы могут быть определены с учетом весовых долей и ориентационных факторов идеальных кристаллографических ориентировок следующим образом:

$$\Delta = p_{\langle 111 \rangle} \Delta^{\langle 111 \rangle} + p_{\langle 110 \rangle} \Delta^{\langle 110 \rangle} + p_{\langle 112 \rangle} \Delta^{\langle 112 \rangle} + p_{\langle 100 \rangle} \Delta^{\langle 100 \rangle}.$$

В общем случае текстура прокатки поликристаллического материала характеризуется тремя ориентационными факторами Δ_i , определенными для главных направлений в образце: прокатки, поперечного и нормального.

Для количественное описание текстур используются вероятностные **функции распределения зерен по ориентациям (ФРО)**. В основе построения этих функций лежит аналитическое представление ориентаций кристаллографических осей кристаллитов по отношению к "лабораторным" осям текстурованного образца с помощью углов Эйлера (рисунок).

Положение подвижной системы координат $Ox_0^{\circ} y_0^{\circ} z_0^{\circ}$, связанной с зерном, относительно неподвижной системы координат $Ox_0 y_0 z_0$, связанной с образцом, полностью определяется тремя углами Эйлера $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$. Здесь поворот на угол φ_1 осуществляется вокруг оси z , на угол Φ - вокруг новой оси x_1 , и наконец, на угол φ_2 - вокруг нового положения оси z_1 .

Так как в каждом зерне текстурованного образца положение кристаллических осей является случайным, то и углы Эйлера будут являться случайными величинами. Следовательно, они могут быть охарактеризованы совместной плотностью вероятности $f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$. Углы φ_1 и φ_2 при этом могут изменяться в пределах от 0 до 2π , а угол Φ от 0 до π . В изотропном материале совместная плотность

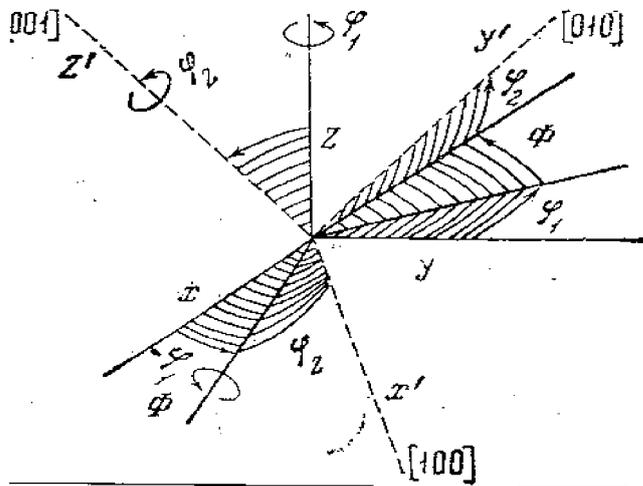
распределения углов Эйлера находится по формуле:

$$f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) = \frac{1}{8} \pi^2 \sin \Phi.$$

Возникновение текстуры приводит к увеличению или уменьшению плотности распределения углов Эйлера для некоторых ориентаций. Это изменение учитывается с помощью специальной функции $T(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$, которая называется текстурной и связана с совместной плотностью следующим соотношением:

$$f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) = \frac{1}{8} \pi^2 \sin \Phi T(\varphi_1, \Phi, \varphi_2).$$

Функция, $T(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$, которую так же часто называют функцией распределения зерен по ориентациям - ФРО, показывает во сколько раз изменяется совместная плотность распределения углов Эйлера текстурованного материала по сравнению с нетекстурованным.



Текстурные функции дают наиболее полную в качественном и количественном отношении информацию о распределении преимущественных кристаллографических направлений в образце. Однако, их построение связано с определенными трудностями. К тому же на упругие и пластические свойства влияют только три коэффициента ФРО.

Поэтому для количественного описания текстуры используют на ФРО а текстурные параметры. Например, следующие:

$$\Delta_i = \langle \alpha_{i1}^2 \alpha_{i2}^2 + \alpha_{i2}^2 \alpha_{i3}^2 + \alpha_{i3}^2 \alpha_{i1}^2 \rangle = \left\langle \frac{h_i^2 k_i^2 + k_i^2 l_i^2 + l_i^2 h_i^2}{h_i^2 + k_i^2 + l_i^2} \right\rangle,$$

где угловые скобки $\langle \dots \rangle$ обозначают статистическое осреднение по всем кристаллитам, составляющим данный поликристалл; h_i, k_i, l_i - индексы Миллера, определяющие i -ое направление в кристалле относительно системы координат связанной с образцом; α_{ij} - направляющие косинусы i -го направления в кристалле.

Для многокомпонентной текстуры, например, для четырехкомпонентной: $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 112 \rangle$, $\langle 100 \rangle$ ориентационные факторы могут быть определены с учетом весовых долей и ориентационных факторов идеальных кристаллографических ориентировок следующим образом:

$$\Delta = p_{\langle 111 \rangle} \Delta^{\langle 111 \rangle} + p_{\langle 110 \rangle} \Delta^{\langle 110 \rangle} + p_{\langle 112 \rangle} \Delta^{\langle 112 \rangle} + p_{\langle 100 \rangle} \Delta^{\langle 100 \rangle}.$$

В общем случае текстура прокатки поликристаллического материала характеризуется тремя ориентационными факторами Δ_i , определенными для главных направлений в образце: прокатки, поперечного и нормального.

В качестве специфической особенности указанных параметров, следует отметить тот факт, что они являются интегральными характеристиками. При этом нет однозначного соответствия между ними и определенным набором кристаллографических ориентировок.

Это обстоятельство делает рациональным использование параметров Δ_i в математических выкладках, но на практике, где конкретизация текстуры имеет очень важное значение, их применение крайне затруднительно. Этот недостаток может быть устранен разработкой методики представления параметров Δ_i в виде набора кристаллографических ориентировок с учетом их весовых долей. В силу указанных выше причин такое представление не будет однозначным. Но наличие вместо одного - нескольких вариантов удовлетворяющих поставленным условиям наборов текстурных компонент на практике является скорее достоинством, чем недостатком.

Для определения конкретного Δ_i достаточно иметь одну обратную полюсную фигуру (ОПФ), снятую в данном направлении. Так как в самом общем случае текстура прокатки определяется тремя параметрами Δ_i ($i = 1, 2, 3$) для главных осей анизотропии, то для их определения потребуется три ОПФ, снятые для направлений прокатки (НП), направления нормали (НН) и поперечного направлению нормали (ПН).

Так как, согласно формуле нам необходимо определить осреднённое значение Δ_i по имеющимся в материале ориентировкам, то стереографический треугольник, представляющий собой графическое изображение всевозможных направлений в кристалле, надо разбить на некоторое конечное число фракций кристаллографических ориентировок $\{hkl\}$, занимающих относительный объём A_{hkl} стереографического треугольника и удовлетворяющих условию нормировки:

$$\sum_{hkl} A_{hkl} = 1$$

Произведение A_{hkl} на значение полюсной плотности соответствующей ориентировки f_{hkl} является весовой долей ориентировки $\{hkl\}$. Следовательно, осредненный текстурный параметр можно определить следующим образом:

$$\Delta_i = \sum_{hkl} A_{hkl} f_{hkl} \Delta_{hkl}$$

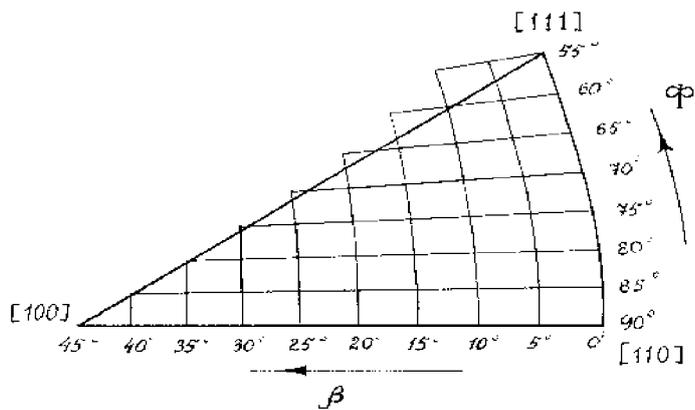
где Δ_{hkl} – ориентационный фактор ориентировки $\{hkl\}$ стереографического треугольника.

Чем больше число фракций кристаллографических ориентировок присутствует в разбиении стереографического треугольника, тем более точным является метод. Согласно разработке ВИНТИ, достаточно точным для практики можно считать разбиение по стандартной сетке с шагом 5° , которое даёт на стереографическом треугольнике 49 точек и их фракций (см. рисунок). Для всех точек разбиения, представляющих собой выходы полюсов некоторых идеальных ориентировок должны быть определены значения A_{hkl} и Δ_{hkl} , которые зависят только от способа разбиения стереографического треугольника и являются константами относительно последнего. Их значения для 49 точек представленного на рисунке разбиения приведены в таблице 1.

Теперь, чтобы рассчитать текстурные параметры по формуле (13) остается определить по обратным полюсным фигурам значения полюсной плотности для всех точек разбиения.

Определение полюсной плотности при экспериментальных исследованиях текстуры образцов в данной работе проводились с использованием дифрактометра ДРОН-2 с гониометрической приставкой ГП-4. Для этого исследуемый образец вырезали таким образом, чтобы анализируемая поверхность была перпендикулярна направлению, для которого определяется ОПФ. Размеры сторон поверхности, имеющей форму квадрата или прямоугольника, должны быть не менее 15 мм. При необходимости, например, в случае тонких полуфабрикатов, для обеспечения данного размера поверхности, составляются сборные образцы – пакеты из нарезанных и подогнанных между собой пластин. Наклепанный при механической обработке слой металла с поверхности образца удаляют посредством травления в соответствии с методической рекомендацией МР-16-36/СМИ-75.

Для построения образца с кубической симметрией решетки, согласно методике ВИНТИ необходимо снять полную рентгенограмму образца в монохроматическом Cu K_α -излучении для линий 100,110,111,311 с углом изменения от 0° до 45° при шаге 5° . При съемке образец приводится во вращение в своей плоскости. Скорость перемещения счетчик при съемке 0,5-10 град/мин. Для качественного разрешения дифракционных линий на рентгенограмме коллимационные щели и щель перед счетчиком должны быть в пределах 0,5-1,0 мм. Полученные по ходу съемки интенсивности дифракционных линий I_{hkl} заносились в соответствующие графы таблицы.



Угол съемки α , град	Интенсивности дифракционных линий			
	I_{100}	I_{110}	I_{111}	I_{311}
0	73348	13408	24210	10346
5	23110	7220	13545	6177
10	5562	3484	12157	3449

Таблица 1.

Значения коэффициентов A_{hkl} и Δ_{hkl} для стандартного разбиения стереографического треугольника

№	A_{hkl}	Δ_{hkl}	№	A_{hkl}	Δ_{hkl}
1	,008	,333	27	,029	,256
2	,0	,326	28	,029	,232
3	,0	,0	29	,029	,175
4	,015	,324	30	,029	,175
5	,025	,321	31	,029	,14
6	,09	,308	32	,029	,10
7	,0	,297	33	,01	,065
8	,015	,314	34	,015	,26
9	,029	,306	35	,029	,241
10	,029	,292	36	,029	,216
11	,02	,272	37	,029	,192
12	,004	,250	38	,029	,158
13	,015	,296	39	,029	,158
14	,029	,288	40	,029	,087
15	,029	,27	41	,029	,05
16	,029	,242	42	,029	,03
17	,025	,22	43	,015	,25
18	,01	,195	44	,008	,23
19	,015	,28	45	,015	,212
20	,029	,268	46	,015	,19
21	,029	,25	47	,015	,155
22	,029	,225	48	,015	,115
23	,029	,196	49	,015	,08
24	,008	,157	50	,015	,047
25	,01	,125	51	,015	,02
26	,015	,27	52	,04	,0

Далее, по программе расчета ОПФ, предлагаемой к методике, рассчитывались значения полюсной плотности для точек разбиения полюсной фигуры. После нанесения значений полюсной плотности на стереографический треугольник и проведения линий уровня для точек с одинаковыми значениями получали ОПФ, по которым из соотношения и данным таблицы 1 рассчитывались текстурные параметры $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$.

Лекция 2

Взаимосвязь показателей пластической анизотропии с параметрами текстуры и константами монокристалла

Упругие свойства поликристаллического материала связаны с текстурой и упругими свойствами монокристалла следующим образом:

$$S_{11} = S'_{11} - S'\Delta_1;$$

$$S_{22} = S'_{11} - S'\Delta_2;$$

$$S_{33} = S'_{11} - S'\Delta_3;$$

$$S_{23} = S'_{12} + 2S'(\Delta_2 + \Delta_3 - \Delta_1);$$

$$S_{12} = S'_{12} + 2S'(\Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3);$$

$$S_{13} = S'_{12} + 2S'(\Delta_1 + \Delta_3 - \Delta_2);$$

$$S_{44} = S'_{44} + 4S'(\Delta_2 + \Delta_3 - \Delta_1);$$

$$S_{55} = S'_{44} + 4S'(\Delta_1 + \Delta_3 - \Delta_2);$$

$$S_{44} = S'_{44} + 4S'(\Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3);$$

где S_{ij} - компоненты тензора податливости поликристаллического материала; S'_{ij} - компоненты тензора податливости монокристалла; $S' = S'_{11} - S'_{12} - \frac{1}{2}S'_{44}$.

Существует взаимосвязь μ_{ij} с S_{ijkl}

$$\mu_{ij} = -\frac{S_{ijij} - \frac{1}{3}(S_{iiij} + S_{jjjj} + S_{jjkk})}{S_{jjjj} - \frac{1}{3}(S_{iiij} + S_{jjjj} + S_{jjkk})}$$

$$\mu_i = -\frac{S_{iii} + S_{jjj} + S_{ijj} - S_{iikk} - S_{jjkk} - 12S_{ijij}}{S_{iii} + S_{jjj} + S_{ijj} - S_{iikk} - S_{jjkk} + 12S_{ijij}}$$

Подставляя и преобразовывая получим:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{2} \frac{S'_{11} - S'_{12} + 3S'(\Delta_i + \Delta_j - \Delta_k)}{S'_{11} - S'_{12} + 3S'\Delta_j}$$

$$\mu_i = \frac{S'_{11} - S'_{12} + 3S'(\Delta_i + \Delta_j - \frac{1}{2}\Delta_k - \frac{1}{2})}{2(S'_{11} - S'_{12}) + 3S'(\Delta_i + \Delta_j - \frac{3}{2}\Delta_k - \frac{1}{2})}$$

Если в последних формулах сгруппировать константы монокристалла, то выражения примут более компактный вид:

$$\mu_{ij} = 0.5 + 0.5 \frac{\Delta_k - \Delta_i}{\frac{S'_{11} - S'_{12}}{3S'} - \Delta_j};$$

$$\mu_i = 0.5 + 0.5 \frac{\Delta_i + \Delta_j + \frac{1}{2} \Delta_k - \frac{1}{2}}{2 \frac{S'_{11} - S'_{12}}{3S'} + \Delta_i + \Delta_j - \frac{3}{2} \Delta_k - \frac{1}{2}}.$$

Данная форма записи имеет ряд преимуществ. Во-первых, в выражениях для μ_{ij} и μ_i выделено слагаемое 0.5 (это, как известно значение показателя анизотропии изотропного тела). Отклонения от этого значения в большую или меньшую сторону позволяют судить об относительном увеличении или уменьшении анизотропии по сравнению с изотропным состоянием материала. Во-вторых, все характеристические константы монокристалла сгруппированы в одном коэффициенте $\left[\frac{S'_{11} - S'_{12}}{3S'} \right]$, который при дальнейших исследованиях может рассматриваться как самостоятельный характеристический параметр монокристалла, что ведет к упрощению формы записи и универсализации зависимостей.

$$\mu_{ij} = 0.5 + 0.5 \frac{\Delta_k - \Delta_i}{Q - \Delta_j} \qquad \mu_i = 0.5 + 0.5 \frac{\Delta_i + \Delta_j + \frac{1}{2} \Delta_k - \frac{1}{2}}{2Q + \Delta_i + \Delta_j - \frac{3}{2} \Delta_k - \frac{1}{2}}$$

$$Q = \frac{S'_{11} - S'_{12}}{S'_{11} - S'_{12} - \frac{1}{2} S'_{44}}$$

Для довольно часто встречающегося на практике случая аксиальной текстуры, которая характеризуется наличием между текстурными параметрами соотношения:

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \frac{1}{8} \left[6\Delta_3 + 1 \right], \text{ выражения примут более простой вид:}$$

$$\mu_{ij}^{ax} = \mu_i^{ax} = \frac{S'_{11} - S'_{12} - \frac{3}{4} S' \left[-\Delta_k \right]}{2 \left[S'_{11} - S'_{12} \right] - \frac{3}{4} S' \left[+3\Delta_k \right]}$$

или в компактной форме:

$$\mu_{ij}^{ax} = 0.5 + 0.5 \frac{5\Delta_k - 1}{8 \frac{S'_{11} - S'_{12}}{3S'} - 1 - 3\Delta_k}.$$

Полученные

зависимости, связывая коэффициенты анизотропии, параметры текстуры и константы монокристалла, тем самым удовлетворяют поставленным требованиям к зависимостям математической модели.

Лекция 3

Влияние текстурных параметров и идеальных ориентировок на величину показателей анизотропии

Из структуры формул ясно, что при постоянных значениях констант монокристалла изменение значений коэффициентов анизотропии зависит от значений Δ_j , а точнее говоря, от соотношения их комплексов. Так, значения μ_{ij} зависят от комплексов $\Delta_k - \Delta_i$ и Δ_j , а значение μ_i - от $\Delta_i + \Delta_j + \frac{1}{2}\Delta_k - \frac{1}{2}$ и $\Delta_i + \Delta_j - \frac{3}{2}\Delta_k - \frac{1}{2}$.

Здесь следует отметить, что, согласно способу определения Δ_i ($i=1,2,3$), их значения всегда удовлетворяют неравенству:

$$0 < \Delta_i < \frac{1}{3}$$

Граничные значения комплексов легко видны из формул. Так, при $\Delta_k - \Delta_i = 0$, $\mu_{ij} = 0,5$, т.е. при любых значениях констант S_{ij} лист является изотропным. Если же $\Delta_k - \Delta_i \neq 0$, $\Delta_j \neq 0$ и значения комплекса $S_{ij} > \Delta_j$, то величина μ_{ij} будет возрастать при уменьшении Δ_i и увеличении Δ_j и Δ_k . При значениях комплекса S_{ij} , меньших Δ_j значения μ_{ij} будут увеличиваться при повышении Δ_i , Δ_j и уменьшении Δ_k .

Оценивать влияние текстуры на коэффициенты анизотропии указанными комплексами на всем множестве ориентировок $\{hkl\} \langle u,v,w \rangle$ довольно сложно, так как текстурные параметры интегрально описывают текстуру, а на практике приходится иметь дело с реальными кристаллографическими ориентировками. Поэтому в данном случае при исследовании влияния текстуры на анизотропию целесообразно перейти от рассмотрения текстурных параметров к конкретным ориентировкам.

Влияние отдельных кристаллографических ориентировок на показатели анизотропии можно определить, если подставить их текстурные параметры в зависимости (табл. 2) и вычислить коэффициенты μ_{ij} для идеальной текстуры, обусловленной данной ориентировкой.

Таблица 2.

Параметры текстуры и коэффициенты анизотропии для некоторых идеальных ориентировок

Идеальные ориентировки	параметры текстуры			показатели		
	Δ_1	Δ_2	Δ_3	μ_{21}	μ_1	μ_{12}
1	2	3	4	5	6	7
$\{100\} \langle 100 \rangle$	0,	0,	0,	0,500	0,059	0,500

$\{100\}\langle 110\rangle$	0,25	0,25	0,	0,059	0,500	0,059
$\{110\}\langle 100\rangle$	0,	0,25	0,25	0,5	0,358	0,941
$\{110\}\langle 110\rangle$	0,25	0,	0,25	0,941	0,358	0,5
$\{110\}\langle 111\rangle$	0,333	0,25	0,25	0,5	0,634	0,354
$\{110\}\langle 112\rangle$	0,25	0,333	0,25	0,254	0,634	0,5

При исследовании анизотропии свойств различных металлов и сплавов было замечено, что текстура не определяет однозначно величину показателей анизотропии. Например, у железа, алюминия, меди, серебра и других металлов, имеющих одинаковую ГЦК-решетку, показатели μ_{ij} резко различаются и при одинаковой текстуре. Этот факт констатировался без каких-либо теоретических обоснований.

Предлагаемая модель взаимосвязи μ_{ij} с Δ_i и S'_{ij} (8.1) наглядно показывает, что величина показателей анизотропии определяется не только степенью совершенства текстуры, но и упругими константами монокристаллов, составляющих текстурованный материал.

Чтобы оценить степень влияния на показатели анизотропии достаточно в формулах проанализировать изменение μ_{ij} в зависимости от значения комплекса констант:

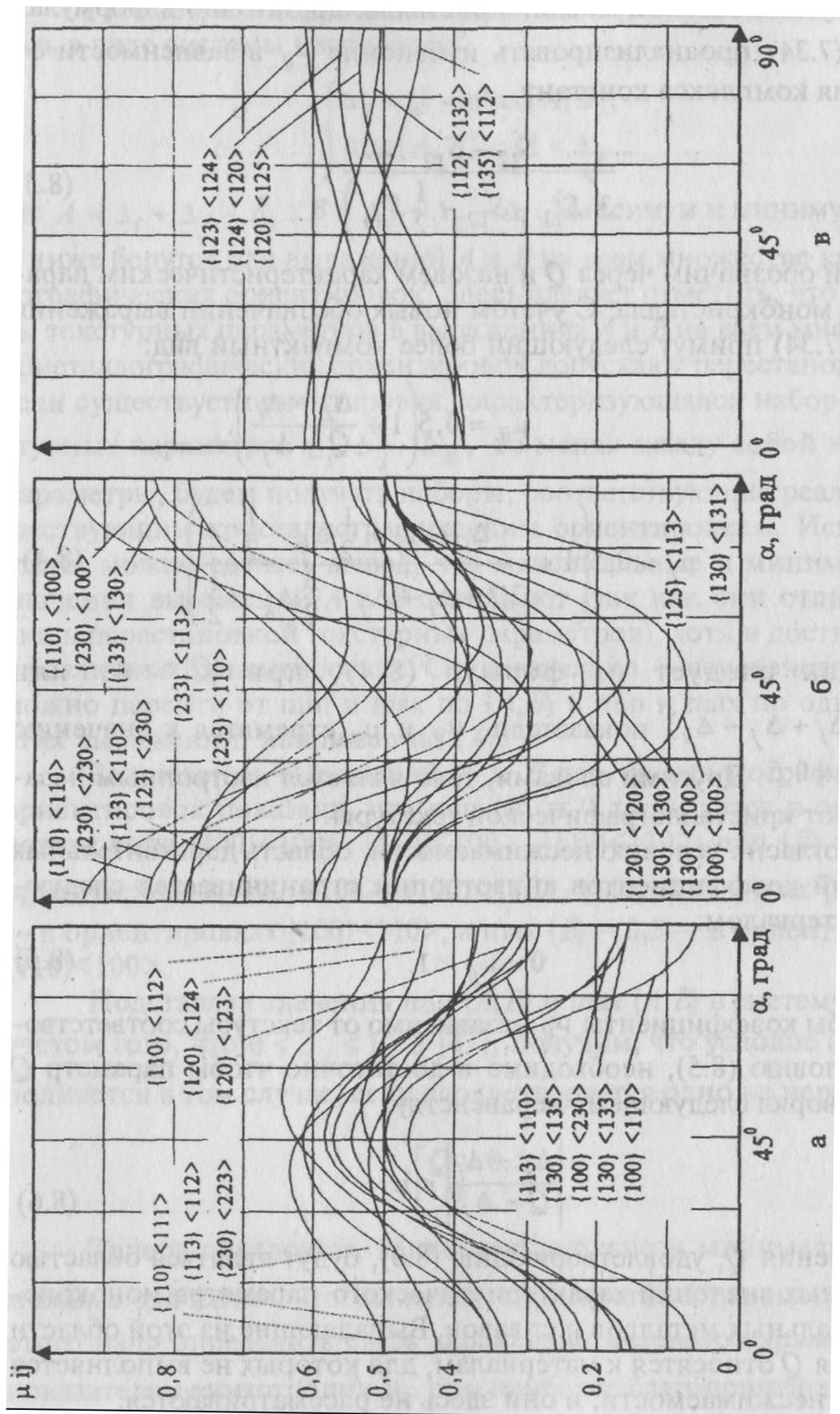


Рисунок.1 Характер изменения показателей анизотропии в зависимости от типа "созданной" идеальной ориентировки в плоскости листа при упругих постоянных монокристалла

$$\frac{S'_{11} - S'_{12}}{3 \left(S'_{11} - S'_{12} - \frac{1}{2} S'_{44} \right)}$$

Обозначим через Q , и назовем характеристическим параметром монокристалла. С учетом новых обозначений выражения примут следующий более компактный вид:

$$\mu_{ij} = 0,5 + 0,5 \frac{\Delta_k - \Delta_i}{Q - \Delta_j}$$

$$\mu_i = 0,5 + 0,5 \frac{\Delta_i + \Delta_j + \frac{1}{2} \Delta_k - \frac{1}{2}}{2Q + \Delta_i + \Delta_j - \frac{3}{2} \Delta_k - \frac{1}{2}}$$

Как следует из формул, при $|Q| \gg \Delta_j$ или $|Q| \gg \Delta_i + \Delta_j - \Delta_k$, показатели μ_{ij} , μ_i стремятся к значению $\mu_{ij} = \mu_i = 0,5$. Другими словами, тело является изотропным независимо от кристаллографической текстуры.

Согласно условию несжимаемости, область действительных значений коэффициентов анизотропии ограничивается следующим интервалом:

$$0 \leq \mu_{ij} \leq 1$$

Чтобы коэффициенты μ_{ij} независимо от текстуры соответствовали условию, необходимо и достаточно чтобы параметр Q удовлетворял следующему неравенству:

$$\left| \frac{\Delta_k - \Delta_i}{Q - \Delta_j} \right| \leq 1.$$

Значения Q , удовлетворяющие, будут являться областью возможных значений характеристического параметра монокристалла реальных металлов и сплавов. Выпадающие из этой области значения Q относятся к материалам, для которых не выполняется условие несжимаемости, и они здесь не рассматриваются.

Рассмотрим подробнее неравенство. Его можно записать в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} \frac{\Delta_k - \Delta_i}{Q - \Delta_j} \leq 1; \\ \frac{\Delta_k - \Delta_i}{Q - \Delta_j} \geq -1, \end{cases} \quad \text{что равносильно следующей системе}$$

$$\left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} Q \geq \Delta_j \\ Q \geq \Delta_k + \Delta_j - \Delta_i \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} Q \leq \Delta_j \\ Q \leq \Delta_k + \Delta_j - \Delta_i \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} Q \geq \Delta_j \\ Q \geq \Delta_i + \Delta_j - \Delta_k \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} Q \leq \Delta_j \\ Q \leq \Delta_i + \Delta_j - \Delta_k \end{array} \right. \end{array} \right. , \text{ или в таком виде } \left[\begin{array}{l} Q \geq \Delta_j \\ Q \geq \max\{A, B\} \\ Q \leq \Delta_j \\ Q \leq \min\{A, B\} \end{array} \right.$$

где $A = \Delta_i + \Delta_j - \Delta_k$; $B = \Delta_j + \Delta_k - \Delta_i$. Максимум и минимум здесь и ниже берутся для выражений А и В на всем множестве кристаллографических ориентировок.

Здесь следует отметить, что индексы текстурных параметров в выражениях А и В на всем множестве кристаллографических ориентировок допускают перестановку, то есть, если существует ориентировка характеризующаяся набором текстурных параметров $\Delta_i, \Delta_j, \Delta_k$, то, меняя между собой местами параметры, будем получать наборы соответствующие реально существующим кристаллографическим ориентировкам. Исходя из этого, можно сделать вывод, что максимальные и минимальные значения выражений А и В совпадают (так как они отличаются лишь перестановкой текстурных параметров), хотя и достигаются в различных ориентировках. Следовательно, в неравенствах можно перейти от *min* и *max* по $\{A, B\}$ к *min* и *max* по одному из этих выражений, например по $\{A\}$.

Вычисление выражений А и В для кристаллографических ориентировок показали, что $\min\{A\} = 0$ достигается в ориентировках типа $\{100\}\langle 100 \rangle$, $\{110\}\langle 100 \rangle$, $\{110\}\langle 110 \rangle$; $\min\{B\} = 0$ - в ориентировках $\{100\}\langle 100 \rangle$, $\{100\}\langle 110 \rangle$, $\{110\}\langle 110 \rangle$; $\max\{A\} = 0,5$ - в ориентировках $\{100\}\langle 110 \rangle$; а $\max\{B\} = 0,5$ - в ориентировках $\{110\}\langle 100 \rangle$.

Подставляя значения $\min\{A, B\}$ и $\max\{A, B\}$ в систему, с учетом того что: $0 < \Delta_j < \frac{1}{3}$, получим, что условие выполняется в том случае, если удовлетворяется одно из неравенств:

$$\begin{cases} Q \geq 0,5 \\ Q \leq 0 \end{cases}$$

Теперь определим, какие максимально и минимально возможные значения μ_{ij} обеспечивает конкретный параметр Q. Для этого надо определить связь характеристического параметра Q с показателем анизотропии μ_{ij} при наиболее благоприятных ориентационных факторах Δ_j , за которыми стоит соответствующая текстура. Исследуем следующее уравнение:

$$\max_{\{hkl\} \langle uvw \rangle} \left\{ \frac{|\Delta_k - \Delta_l|}{Q - \Delta_j} \right\} = p, \text{ где } 0 < p < 1.$$

При этом максимальное и минимальное значения μ_{ij} выражаются через параметр p следующим образом:

$$\begin{aligned} \max \mu_{ij} &= \frac{1}{2} (0,5 + 0,5p) \\ \min \mu_{ij} &= \frac{1}{2} (0,5 - 0,5p) \end{aligned}$$

Преобразовывая уравнение (8.9) и раскрывая знак модуля, приведем его к виду:

$$Q = \max \left\{ \frac{\Delta_k}{p} + \Delta_j - \frac{\Delta_l}{p} \right\}.$$

Вычисление комплекса $\frac{\Delta_k}{p} + \Delta_j - \frac{\Delta_l}{p}$ на множестве реальных кристаллографических ориентировок показало, что он при фиксированном значении p принимает максимальное значение при ориентировке $\{110\} \langle 100 \rangle$, а минимальное — при $\{110\} \langle 110 \rangle$ и $\{100\} \langle 100 \rangle$.

Подставляя ориентационные факторы указанных ориентировок ($\Delta_1 = 0$, $\Delta_2 = 0,25$, $\Delta_3 = 0,25$), получим зависимости максимального и минимального значений μ_{ij} от параметров Q в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mu_{ij}^{\max} &= \frac{1}{2} + \frac{1}{8 \left(Q - \frac{1}{4} \right)}; \\ \mu_{ij}^{\min} &= \frac{1}{2} - \frac{1}{8 \left(Q - \frac{1}{4} \right)}. \end{aligned}$$

В таблице 3 приведены расчетные значения показателей μ_{ij} различных идеальных ориентировок в зависимости от величины параметра Q . Как видно из приведенных данных, кристаллографическая текстура определяет собой характер изменения анизотропии в плоскости листа, тогда как модуль показателей определяется значением характеристического параметра монокристалла.

Лекция 4

Физический смысл характеристического параметра монокристалла

Построенные по выражениям с учетом условия графики изменения максимальных и минимальных значений μ_{ij} в зависимости от Q показывают (рисунок), что анизотропия свойств

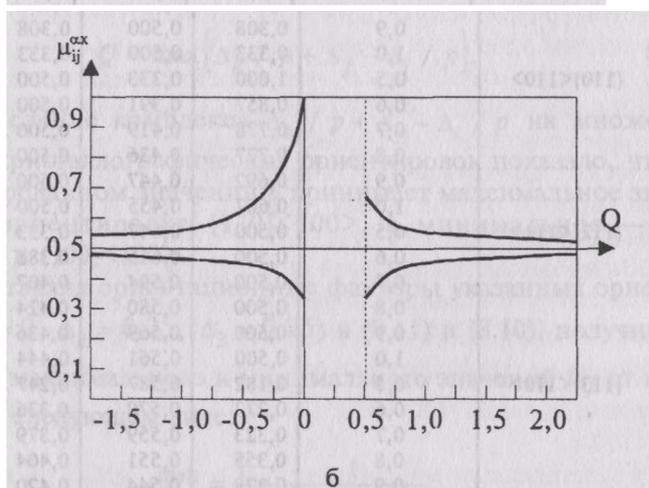
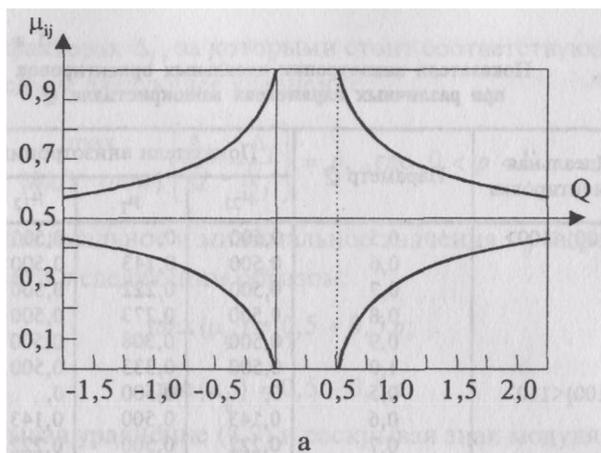


Рисунок. Изменение показателей анизотропии в зависимости от параметра Q для ортотропных (а) и трансверсально-изотропных (б) материалов.

Усиливается (показатели анизотропии резко возрастают или убывают по отношению к значению 0,5) в тех материалах, для которых Q близко к нулю слева или к 0,5 справа. В интервале $0 < Q < 0,5$ выражения теряют смысл, так как не выполняется условие. Из графиков также видно, что материалы, имеющие высокие по абсолютной величине значения характеристического параметра монокристалла - $|Q - 1 / 4| > 4,75$, практически будут изотропными ($\mu_{ij} = 0,5$) независимо от степени совершенства текстуры. Для большинства промышленных металлов и сплавов, как показывают расчеты, приведенные в табл. 8.3, значения Q находятся в интервале $0,25 < |Q - 0,25| < 4,75$.

Это делает возможным целенаправленное формирование заданных значений показателей анизотропии за счет подбора исходного материала.

На практике часто представляет особый интерес случай трансверсальной изотропии в плоскости полуфабриката. Проводя аналогичный анализ формул для аксиальных текстур, можно определить интервал изменения показателей

анизотропии трансверсально-изотропных материалов в зависимости от параметра Q по следующим соотношениям:

$$\mu_{ax}^{\max} = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{4Q-1};$$

$$\mu_{ax}^{\min} = \frac{1}{2} - \frac{1}{6} \cdot \frac{1}{4Q-1}.$$

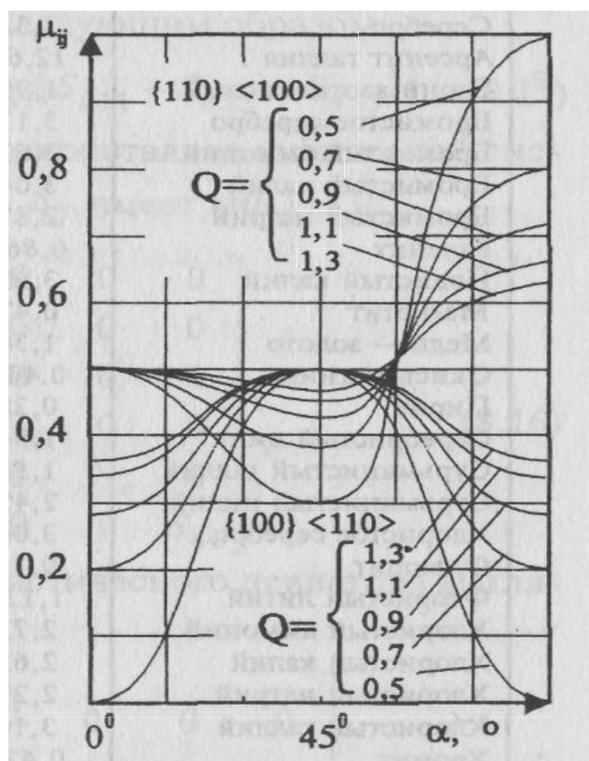


Рисунок 2 Изменение значений μ_{ij} ориентировок $\{110\} \langle 100 \rangle$ и $\{100\} \langle 110 \rangle$ в зависимости от величины характеристического параметра Q

Характер изменения величины коэффициентов μ_{ij} в зависимости от параметра Q представлен на рисунке, из которого видно, что в случае наложения условия трансверсальности пределы изменения показателей анизотропии заметно сужаются, а следовательно, уменьшается возможность формирования их величины. Особенно это касается материалов, у которых $Q > 0,5$.

Полученные зависимости позволяют для конкретных типов текстур, например $\{110\} \langle 100 \rangle$ и $\{100\} \langle 110 \rangle$ (рисунок), прогнозировать предельные значения показателей анизотропии материалов по характеристикам их монокристаллов или, другими словами, определять степень анизотропности листа.

В целом, используя значения таблиц и графические зависимости (рисунки), можно достаточно точно классифицировать металлы и сплавы по степени анизотропии их свойств.

Как следует из условия, существуют две области определения характеристического параметра монокристалла - положительная и отрицательная.

Физический смысл отрицательных и положительных значений параметра Q можно интерпретировать, если в определяющем Q выражении перейти от упругих компонент тензора податливости монокристалла S'_{ij} к пластическим компонентам материального девиатора K'_{ij} используя принцип пропорциональности девиаторов.

Согласно этому принципу, компоненты материального пластического девиатора могут быть представлены с точностью до постоянного множителя через компоненты тензора податливости следующим образом:

$$k_{ijkl} = h d_{ijkl} = h \left[S_{ijkl} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \delta_{kl} (S_{ii11} + S_{ii22} + S_{ii33}) \right].$$

Теперь, учитывая, что для монокристаллов кубической системы матрица тензора податливости S'_{ij} имеет вид [123]:

$$S'_{ij} = \begin{bmatrix} S'_{11} & S'_{12} & S'_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S'_{12} & S'_{11} & S'_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S'_{12} & S'_{12} & S'_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S'_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S'_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S'_{44} \end{bmatrix},$$

а матрица тензора материального пластического девиатора выглядит следующим образом:

$$K'_{ij} = \begin{bmatrix} K'_{11} & -K'_{11}/2 & -K'_{11}/2 & 0 & 0 & 0 \\ -K'_{11}/2 & K'_{11} & -K'_{11}/2 & 0 & 0 & 0 \\ -K'_{11}/2 & -K'_{11}/2 & K'_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K'_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K'_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K'_{44} \end{bmatrix},$$

получим представление констант пластичности в виде:

$$K'_{11} = \frac{2}{3} h (S'_{11} - S'_{12})$$

$$K'_{44} = h S'_{44}$$

где h - константа пропорциональности.

Подставляя полученные выражения, найдем представление Q через компоненты материального пластического девиатора монокристалла в виде:

$$Q = \frac{K'_{11}}{3K'_{11} - K'_{44}}.$$

Учитывая, что коэффициенты K'_{11} и K'_{44} непосредственно связаны с пределами текучести монокристалла следующими зависимостями:

$$K'_{11} = \frac{1}{\sigma_{\langle 100 \rangle}^2}; \quad K'_{44} = \frac{3}{\sigma_{\langle 111 \rangle}^2},$$

где $\sigma_{\langle 100 \rangle}$ - предел текучести монокристалла в направлении $\langle 100 \rangle$; $\sigma_{\langle 111 \rangle}$ - предел текучести монокристалла в направлении $\langle 111 \rangle$, выражение (8.19) можно записать в виде:

$$Q = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{\sigma_{\langle 100 \rangle}^2}{\sigma_{\langle 111 \rangle}^2} \right)^{-1}.$$

Из последнего представления Q становится понятным физический смысл положительных и отрицательных значений параметра Q . Отрицательным значениям соответствуют материалы, для монокристаллов которых выполняется неравенство $\sigma_{\langle 100 \rangle} > \sigma_{\langle 111 \rangle}$; положительным же соответственно $\sigma_{\langle 100 \rangle} < \sigma_{\langle 111 \rangle}$.

При этом, когда $\sigma_{\langle 111 \rangle} - \sigma_{\langle 100 \rangle} \rightarrow \pm 0$, значения Q стремятся к $\pm \infty$, а когда $\sigma_{\langle 111 \rangle} - \sigma_{\langle 100 \rangle} \rightarrow \pm \infty$, Q стремится к нулю либо к 0,5 в зависимости от знака бесконечности.

Необходимо также отметить, что параметр Q выражается через отношение основных компонент пластического девиатора (в том, что других независимых компонент нет, можно убедиться из (8.17)), и является величиной безразмерной. Следовательно, он является и определенной характеристикой пластических свойств монокристаллов.

Лекция 5

Определение параметров текстуры по величине показателей анизотропии

Математическая модель (8.4) помимо прямого расчета коэффициентов μ_{ij} по известным текстурным характеристикам материала позволяет решить и обратную задачу: определить по заданным значениям анизотропии необходимые ориентационные факторы Δ_i , а затем и соответствующие им идеальные ориентировки или компоненты текстуры.

Для решения этой задачи необходимо соотношения (8.4) представить в виде следующей системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} \Delta_1 + (-2\mu_{12})\Delta_2 - \Delta_3 = (-2\mu_{12})Q; \\ (-2\mu_{12})\Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3 = (-2\mu_{21})Q; \\ (-\mu_1)(\Delta_1 + \Delta_2) + \frac{1}{2}(\mu_1 - 1)\Delta_3 = \frac{1}{2}(-\mu_1) + (\mu_1 - 1)Q \end{cases}$$

которая имеет одно единственное решение- $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$.

После несложных математических преобразований системы трех линейных уравнений относительно трех неизвестных получим следующие выражения для ориентационных факторов:

$$\Delta^*_1 = \left\{ \frac{1}{2} \mu_{12}(1 - \mu_1) + \left[\mu_{12}(\mu_1 - 2) + \frac{1}{2} \mu_{21}(\mu_1 + 1) + \mu_{12}\mu_{21}(-3\mu_1) \right] Q \right\} / C;$$

$$\Delta^*_2 = \left\{ \frac{1}{2} \mu_{21}(1 - \mu_1) + \left[\mu_{12}(\mu_1 - 2) + \frac{1}{2} \mu_{21}(\mu_1 + 1) + \mu_{12}\mu_{21}(-3\mu_1) \right] Q \right\} / C;$$

$$\Delta^*_3 = \left\{ \frac{1}{2} (1 - \mu_1)(\mu_{21} + \mu_{12} - 2\mu_{12}\mu_{21}) + (\mu_{21} + \mu_{12})(\mu_1 - 2) + 2\mu_{12}\mu_{21}(-4\mu_1) \right\} / C,$$

$$\text{где } C = \frac{1}{2} (\mu_{21} + \mu_{12})(1 + \mu_1) + \mu_{12}\mu_{21}(1 - 3\mu_1).$$

При практическом применении выражений входящие в них коэффициенты пластической анизотропии μ_{ij} задаются требованиями, а характеристический параметр монокристалла Q может быть определен по справочным данным и формулам.

В таблице 3 приведены результаты расчета параметров текстуры для листов А1 99, имеющих осредненный в плоскости показатель анизотропии $\bar{\mu}$ (случай трансверсальной изотропии). Данные этой таблицы свидетельствуют, что при трансверсальной изотропии показатели анизотропии μ_{ij} в плоскости листа могут принимать действительные значения лишь в интервале 0,35-0,65. Остальным же показателям анизотропии соответствуют нереальные значения текстурных параметров (т.е. не удовлетворяющие условию (8.2)).

Лекция 6

Расчет вариантов многокомпонентной текстуры

Ориентационные факторы Δ_i хорошо зарекомендовали себя при количественном описании текстуры. Они позволяют установить взаимосвязь между анизотропией свойств материала и его текстурой. Но на практике оценивать текстурованное состояние материала удобнее представлением текстуры в виде весовых долей, составляющих ее идеальных ориентировок.

Таблица 3

Связь параметров текстуры с коэффициентами анизотропии листов из А1 99

$\bar{\mu}$	Δ_1	Δ_2	Δ_3
0.05	-0.191	-0.191	-0.844
0.1	-0.108	-0.108	-0.621
0.15	-0.0414	-0.0414	-0.444
0.2	0.0125	0.0125	-0.3
0.25	0.0571	0.0571	-0.1881
0.3	0.0947	0.0947	-0.0807
0.35	0.127	0.127	0.00488
0.4	0.155	0.155	0.0788
0.45	0.179	0.179	0.143
0.5	0.2	0.2	0.2
0.55	0.218	0.218	0.250
0.6	0.236	0.236	0.295
0.65	0.251	0.251	0.336
0.7	0.265	0.265	0.375
0.75	0.277	0.277	0.405
0.8	0.288	0.288	0.425
0.85	0.299	0.299	0.463
0.9	0.308	0.308	0.488
0.95	0.317	0.317	0.512

Различные изменения, возникающие в текстуре в процессе обработки листов, также легче учитываются изменением весовых долей отдельных компонентов. Из этого следует, что для эффективного практического применения разработанных теоретических зависимостей необходимо установить способ перехода от текстурных параметров к многокомпонентной текстуре, состоящей из конечного числа кристаллографических ориентировок, входящих в текстуру с некоторыми весовыми долями P_i ($i = 1, N$). При таком переходе не будет однозначного соответствия, так как одним и тем же параметрам Δ_i могут соответствовать различные наборы ориентировок. Но в данной ситуации это даже облегчит задачу подбора оптимальных компонент текстуры, так как количество возможных вариантов при этом значительно возрастает.

Для многокомпонентной текстуры ориентационные факторы определяются по следующему выражению:

$$\Delta = \sum_{\{hkl\}\{uvw\}} P_{\{hkl\}\{uvw\}} \Delta^{\{hkl\}\{uvw\}},$$

где $P_{\{hkl\}\{uvw\}}$ - весовая доля компоненты $\{hkl\}(uvw)$;

$\Delta^{\{hkl\}\{uvw\}}$ - ориентационные факторы компоненты $\{hkl\}(uvw)$.

Отсюда получим следующую систему из четырех уравнений для определения весовых долей текстурных компонент:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\{hkl\}\{uvw\}} P_{\{hkl\}\{uvw\}} \Delta_1^{\{hkl\}\{uvw\}} = \Delta^*_1 \\ \sum_{\{hkl\}\{uvw\}} P_{\{hkl\}\{uvw\}} \Delta_2^{\{hkl\}\{uvw\}} = \Delta^*_2 \\ \sum_{\{hkl\}\{uvw\}} P_{\{hkl\}\{uvw\}} \Delta_3^{\{hkl\}\{uvw\}} = \Delta^*_3 \\ \sum_{\{hkl\}\{uvw\}} P_{\{hkl\}\{uvw\}} = 1 \end{array} \right.$$

Для четырехкомпонентной текстуры система имеет единственное решение, т. е. задавая набор из четырех идеальных ориентировок $\{hkl\}(uvw)$, можно однозначно найти их весовые доли в той текстуре, которая обеспечит требуемые значения Δ^*_i .

Если к системе добавлять дополнительные условия типа:

$$P_{\{hkl\}\{uvw\}} = g,$$

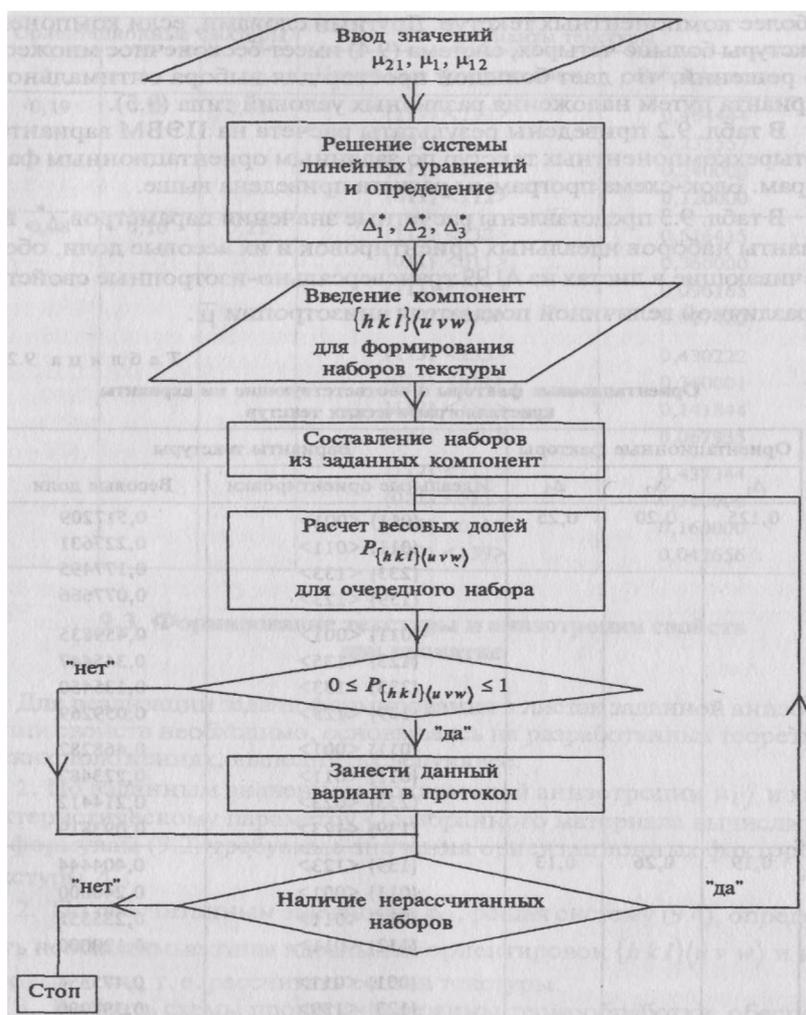


Рисунок 3 Блок-схема программы расчета

то система позволит однозначно находить весовые доли пяти и более компонентных текстур. Другими словами, если компонент текстуры больше четырех, система имеет бесконечное множество решений, что дает большой простор для выбора оптимального варианта путем наложения различных условий типа.

В таблице 4 приведены результаты расчета на ПЭВМ вариантов четырехкомпонентных текстур по заданным ориентационным факторам. Блок-схема программы расчета приведена выше. В таблице 3 представлены расчетные значения параметров Δ_i^* , варианты наборов идеальных ориентировок и их весовые доли, обеспечивающие в листах из А199 трансверсально-изотропные свойства с различной величиной показателя анизотропии $\bar{\mu}$.

Таблица 4

Ориентационные факторы и соответствующие им варианты кристаллографических текстур

Ориентационные факторы			Варианты текстур	
Δ_1	Δ_2	Δ_3	Идеальные ориентировки	Весовые доли
			{011}<001>	0.517

0.125	0.2	0.25	{011}<011>	0.228
			{233}<133>	0.177
			{139}<123>	0.078
			{011}<001>	0.460
			{123}<135>	0.345
			{233}<133>	0.135
			{139}<123>	0.059
			{011}<001>	0.468
			{011}<011>	0.223
			{233}<023>	0.214
			{139}<123>	0.094

Лекция 7

Формирование текстуры и анизотропии свойств при прокатке

Для реализации задачи формирования в листах заданной анизотропии свойств необходимо, основываясь на разработанных теоретических положениях, выполнить следующее:

1. По заданным значениям показателей анизотропии μ_{ij} и характеристическому параметру Q выбранного материала вычислить по формулам (9.2) требуемые значения ориентационных факторов текстуры Δ_i^* .

2. По рассчитанным значениям Δ_i^* , решая систему (9.4), определить необходимые типы идеальных ориентировок $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ и их весовые доли, т. е. рассчитать состав текстуры.

3. Выбрать схемы прокатки и режимы термообработки, обеспечивающие образование в составе текстуры расчетного количества требуемых ориентировок и их весовых долей.

Таблица 5

Состав текстуры, обеспечивающий траисверсально-изотропные свойства листов А199

Показатель анизотропии $\bar{\mu}$	Значения параметров текстуры			Компонент текстуры	Весовые доли
	Δ_1	Δ_2	Δ_3		

0,40	0,250	0,250	0,099	{139}<123>	0,526684
	0,0	0,0	0,0	{001}<001>	0,387829
	0,274	0,289	0,316	{233}<133>	0,080746
	0,250	0,0	0,250	{011}<011>	0,004741
0,45	0,099	0,169	0,090	{013}<139>	0,489531
	0,250	0,250	0,099	{139}<123>	0,243349
	0,250	0,0	0,250	{011}<011>	0,144689
	0,274	0,289	0,316	{233}<133>	0,122432
0,50	0,099	0,169	0,090	{013}<139>	0,393282
	0,274	0,289	0,316	{233}<133>	0,388825
	0,250	0,0	0,250	{011}<011>	0,133297
	0,250	0,250	0,099	{139}<123>	0,084596
0,55	0,274	0,289	0,316	{233}<133>	0,376481
	0,099	0,250	0,250	{123}<139>	0,272175
	0,250	0,0	0,250	{011}<011>	0,186609
	0,250	0,250	0,099	{139}<123>	0,164735
0,60	0,213	0,277	0,316	{233}<023>	0,368885
	0,274	0,289	0,316	{233}<133>	0,367018
	0,211	0,090	0,250	{123}<135>	0,239910
	0,250	0,250	0,099	{139}<123>	0,024187
0,65	0,250	0,250	0,333	{111}<0П>	0,986772
	0,274	0,289	0,316	{233}<133>	0,007015
	0,213	0,277	0,316	{233}<023>	0,004603
	0,250	0,0	0,250	{011}<0П>	0,001610

Другими словами, выбрав металл по параметру Q, необходимо затем сформировать в нем расчетное количество компонент текстуры, обеспечивающее заданные значения μ_{ij} . В идеальном случае для проверки данной методики достаточно было бы прокатанный с заданным набором идеальных ориентировок лист испытать на анизотропию и сравнить полученные значения μ_{ij} с заданными.

Однако современное состояние теории текстурообразования и технологии листопрокатного производства пока еще не позволяет непосредственно реализовать подобные эксперименты.

В связи с этим экспериментальные исследования формирования состава текстуры и его видоизменений в условиях существующего производства осуществлялись путем определения компонент текстуры и их весовых долей на различных стадиях процесса прокатки листов, что тоже позволило косвенно оценить возможность получения в листах заданных характеристик анизотропии. Затем на

основе установленных в текстуре проката наборов идеальных ориентировок по выражению определялись параметры Δ_i , а по формулам вычислялись расчетные значения коэффициентов μ_{ij} . Параллельно на этих же стадиях производства определялись экспериментальные значения показателей анизотропии μ_{ij} путем механических испытаний образцов на растяжение. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений коэффициентов анизотропии на различных стадиях прокатки позволит оценить возможность практической реализации разработанных теоретических положений.

Для исследований были выбраны 6 слэбов из сплава АМЦ и алюминия А1 99 толщиной 400 мм. Схема прокатки, время гомогенизации, температура нагрева и степень обжатия представлены на рисунке. Скорость прокатки в последней клетке составляла 180 м/ мин. Остальные параметры соответствовали общепринятой технологии прокатки.

Для исследования изменения состава текстуры и показателей анизотропии свойств полуфабрикатов на каждой стадии отбирали образцы для определения преимущественных кристаллографических ориентировок и соответствующих им показателей анизотропии. Компоненты текстуры исследовали на дифрактометре ДРОН-2 с гониометрической приставкой ГП-4, а показатели анизотропии вычислялись по выражению (8.4), а также определялись путем механических испытаний образцов на растяжение.

По результатам рентгеновских измерений определяли полюсные плотности для образцов на каждой стадии прокатки и строили обратные полюсные фигуры (ОПФ), примеры которых представлены на рисунках. Результаты обработки полюсных фигур и расчетные значения идеальных ориентировок и их весовых долей у исследуемых сплавов представлены в таблице 4.

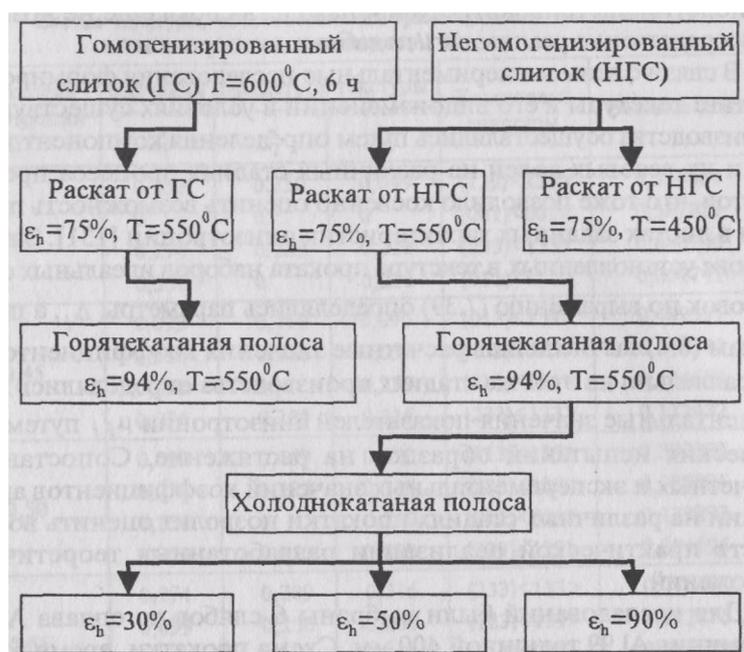


Рисунок 4. Схема опытной прокатки слитков

Сопоставляя данные табл. 9.4 и 9.5, необходимо отметить следующее:

1. Показатели анизотропии в различных направлениях монокристалла алюминия (соответствующие различным идеальным ориентировкам) изменяются в значительно больших пределах:

($\mu_{ij} = 0,143-0,857$, чем в реальном текстурированном листе, где

$\mu_{ij} = 0,29-0,55$ для сплава АМЦ и $\mu_{ij} = 0,26 - 0,58$ для А199 [29].

2. Одни и те же или близкие величины μ_{ij} могут быть получены при различных сочетаниях кристаллографических ориентировок.

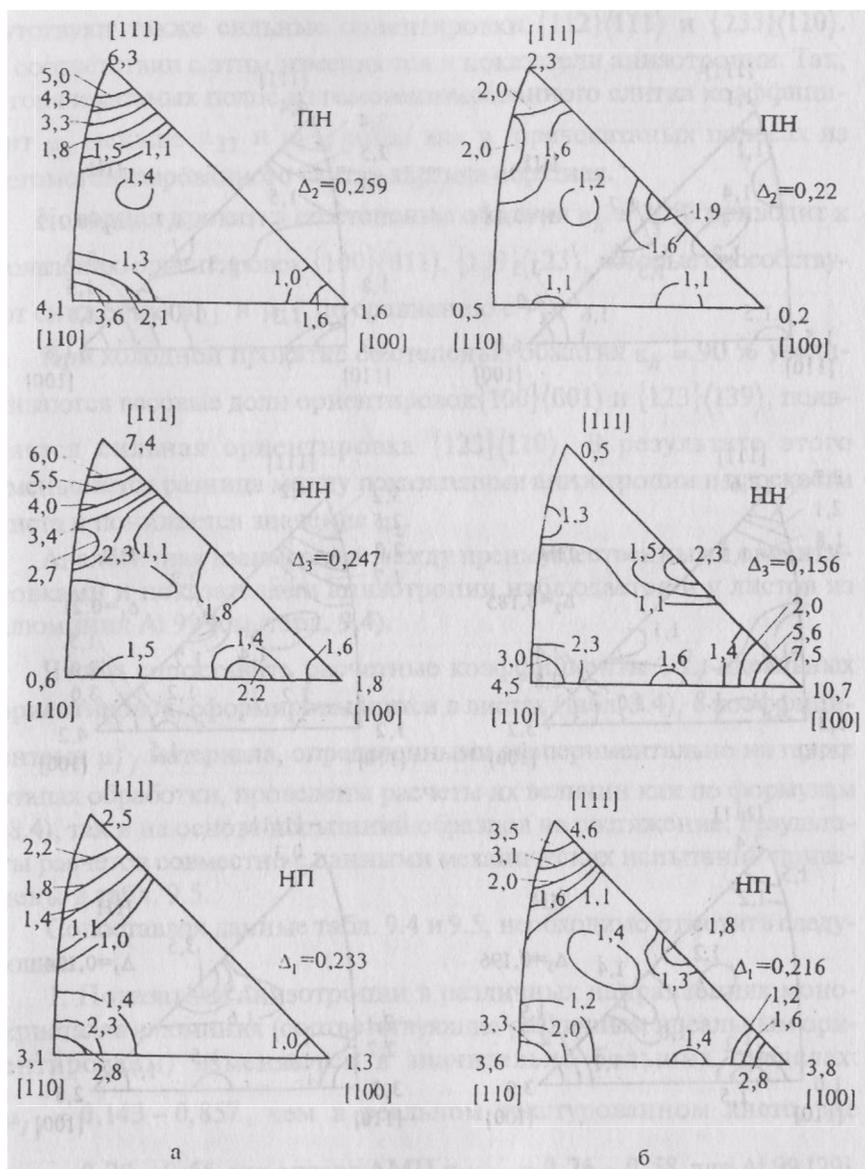


Рисунок 5 Обратные полюсные фигуры горячекатаной заготовки (а) ($s = 6$ мм) и холоднокатаного листа (б) ($s = 1,2$ мм) из сплава АМЦ

Например, в АМЦ значениям $\mu_{21} = 0.58$, $\mu_1 = 0.54$, $\mu_{12} = 0.5$ соответствуют как ориентировки $\{123\}\langle 112\rangle$, так и $\{112\}\langle 123\rangle$; значениям $\mu_{21} = \mu_1 = \mu_{12} = 0.619$ соответствуют ориентировки $\{111\}\langle 112\rangle$ и $\{111\}\langle 123\rangle$.

3. В листах сплава АМЦ и алюминия А1 99 реально присутствуют кристаллографические ориентировки, дающие как максимальные, так и минимальные значения коэффициентов μ_{ij} .

Вопросы для контроля

1. Назовите основные виды анизотропии материалов.
2. Как влияет анизотропия на характер напряженно-деформированного состояния тела?
3. Какие особенности накладывает анизотропия на структуру уравнений теории пластичности?
4. Как обозначаются кристаллографические направления и плоскости?
5. Что включает в себя понятие семейство плоскостей?
6. Как по пространственной эпюре какого-либо свойства отличить изотропное тело от анизотропного?
7. Что обладает большей анизотропией, монокристаллы или поликристаллы одних и тех же металлов?
8. Какими свойствами обладает трансверсальноизотропный материал? Приведете примеры таких материалов.
9. Какими показателями учитывается анизотропия пластических свойств?
10. Что показывает показатель μ_1 ?
11. К чему приводит учет анизотропии в процессах обработки металлов давлением?
12. Что описывают компоненты материального тензора k_{ijkl} . В каких важных соотношениях они используются?
13. Чем отличаются зависимости между показателями напряженного и деформированного состояний для изотропных и анизотропных материалов?
14. Что характеризует коэффициент Лоде?
15. Перечислите основные способы интенсификации процессов деформирования материалов.
16. Назовите основные подходы решения проблемы интенсификации деформирования за счет создания заданной анизотропии свойств.
17. С чем связаны основные трудности формирования заданной анизотропии материалов?
18. Что понимается под термином кристаллографическая текстура?
19. Для чего используются индексы Миллера?
20. Через какие характеристики определяется ориентационный фактор

- текстуры?
21. Что является первичным кристаллографическая текстура или анизотропия физических свойств?
 22. Что представляют собой прямые и обратные полюсные фигуры?
 23. Что представляют собой углы Эйлера? Как они связаны с осями кристалла?
 24. По данным, каких фигур определяются ориентационные факторы текстуры?
 25. Сколько полюсных фигур необходимо для полного учета анизотропии пластических свойств?
 26. Перечислите главные направления симметрии листовых материалов получаемых при прокатке?
 27. Свойства в каких направлениях кристалла кубической симметрии определяют степень анизотропии?
 28. Перечислите основные этапы построения обратной полюсной фигуры?
 29. Как определить ориентационный фактор текстуры по данным ОПФ?
 30. При каких допущениях может быть выведена пропорциональность упругого и пластического девиаторов?
 31. Как интерпретируется пропорциональность упругого и пластического материальных девиаторов в пространстве напряжений?
 32. Как используется пропорциональность девиаторов для расчета показателей пластической анизотропии?
 33. Что общего и в чем различие между коэффициентами Пуассона показателями пластической анизотропии?
 34. Что надо знать, чтобы рассчитать компоненты тензора податливости поликристаллического материала?
 35. Какие параметры объединяет в себе взаимосвязь показателей анизотропии и текстуры?
 36. Какими параметрами учитываются свойства материала в модели взаимосвязи показателей анизотропии и текстуры?
 37. Каким образом можно проверить на адекватность уравнения взаимосвязи показателей анизотропии с параметрами текстуры?
 38. Как определяется характеристический параметр монокристалла через упругие и пластические константы?
 39. Какая ориентировка приводит к большей анизотропии в листе, $\{100\}\langle 130\rangle$ или $\{100\}\langle 230\rangle$?
 40. Как должны соотноситься между собой весовые доли ориентировок $\{100\}\langle 100\rangle$ и $\{100\}\langle 110\rangle$ в трансверсальноизотропном листе?
 41. Какие значения может принимать характеристический параметр монокристалла для реальных металлов и сплавов?
 42. Монокристаллы алюминия или железа более анизотропны?
 43. В чем существенное отличие пластических свойств монокристаллов серебра и бромистого серебра?
 44. В чем заключается физический смысл отрицательных значений характеристического параметра монокристалла?
 45. Что больше влияет на величину анизотропии, текстура или свойства монокристалла?

46. Какие из показателей пластической анизотропии являются основными при расчете свойств листовых материалов и почему?
47. Какое условие нормировки используется при расчете многокомпонентной текстуры?
48. Какие значения могут принимать весовые доли реальных текстурных компонент?
49. Перечислите основные этапы расчета вариантов многокомпонентной текстуры, обеспечивающей требуемую анизотропию свойств.
50. В чем отличие расчета четырех- и пяти- компонентных текстур?
51. Какое максимальное число компонент может быть при расчете весовых долей многокомпонентной текстуры?
52. Сколько вариантов может быть при расчете многокомпонентной текстуры? От чего зависит их количество?
53. Как определяются ориентационные факторы текстурных компонент?
54. Какие ОПФ требуются для расчета многокомпонентной текстуры по заданным показателям анизотропии?