

УДК 539.319

©1995

МЕТОДИКА ВЫБОРА КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ И МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ МОНОКРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

С.И.Бахолдин, Е.В.Галактионов, В.М.Крымов, В.Д.Слабодинский

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург
(Поступила в Редакцию 20 сентября 1994 г.)

Разработана методика расчета касательных напряжений в системах скольжения для кристаллов произвольного кристаллографического класса. Проведены расчеты ориентационных зависимостей касательных напряжений в сильно анизотропных кристаллах каломели (Hg_2Cl_2) при механических испытаниях и выращивании. Определены ориентации, позволяющие разделить работу различных систем при испытаниях на сжатие и минимизировать уровень термических напряжений при выращивании.

Как известно, пластическая деформация в кристаллах при нагружении начинается тогда, когда касательное напряжение в системе легкого скольжения достигает критического значения. В силу симметрии кристаллической решетки каждый монокристалл обладает совокупностью кристаллографически эквивалентных систем скольжения (т.е. пар плоскость скольжения–направление скольжения), причем первой всегда начинает действовать та из них, напряжение в которой максимально (закон Шмидта) [1].

Для случая одноосного растяжения (сжатия) кристалла с одной системой скольжения касательное напряжение τ в этой системе связано с приложенным нормальным напряжением σ следующим образом:

$$\tau = \sigma \cos \varphi \cos \theta, \quad (1)$$

где σ — нормальное напряжение, а φ и θ — углы между направлением приложения усилия и соответственно нормалью к плоскости скольжения и направлением скольжения. Произведение $\cos \varphi \cos \theta$ часто называют «фактором Шмидта».

Соотношение (1) определяет простой способ выбора кристаллографической ориентации образцов для определения критического скалывающего напряжения и исследования одиночного скольжения: фактор Шмидта максимален, когда $\varphi = \theta = 45^\circ$. Но во многих монокристаллах имеется несколько семейств систем скольжения, т.е. скольжения возможно по нескольким плоскостям с различными индексами и в каждой

плоскости может быть несколько кристаллографически различных направлений скольжения. Кроме того, в каждом семействе обычно имеется несколько эквивалентных систем. В этом случае для изучения работы отдельной системы желательно выбрать такую ориентацию, которая обеспечивает достаточно большой фактор Шмидта для этой системы и малые значения фактора для всех остальных систем. Если учесть, что наличие нескольких семейств систем скольжения наиболее характерно для некубических кристаллов, в которых расчеты углов между направлениями весьма громоздки, то становится ясным, что задача выбора оптимальной ориентации оказывается весьма трудоемкой.

В практике выращивания и исследования монокристаллов встречаются и другие случаи, когда необходим расчет напряжений в системах скольжения. Примером может служить исследование процесса образования дислокаций под действием термических напряжений, возникающих при выращивании монокристаллов. В этом случае напряженное состояние кристалла оказывается сложным, т.е. в тензоре напряжений имеется несколько ненулевых компонент, и формулу (1) необходимо записывать в тензорном виде. При этом в ней вместо одного появляются несколько слагаемых, каждое из которых имеет свои значения направляющих косинусов. Объем расчетов, необходимых для выбора оптимальной ориентации, обеспечивающей минимум напряжений во всех системах скольжения, оказывается столь значительным, что выполнить их вручную практически невозможно.

С учетом вышесказанного в данной работе предлагаются алгоритм расчета касательных напряжений в системах скольжения для кристаллов произвольного кристаллографического класса и любого вида напряженного состояния и разработанная на его основе методика выбора ориентации. Проведены расчеты, позволившие выбрать оптимальные ориентации для двух случаев: механического испытания в условиях одноосного нагружения и выращивания кристаллов, в процессе которого реализуется сложноподвиженное состояние под действием термических напряжений.

В качестве объектов для расчетов были выбраны сильно анизотропные кристаллы каломели Hg_2Cl_2 (тетрагональная сингония), в которых имеется целый набор семейств систем скольжения. Эти кристаллы перспективны для применения в оптических и акустических устройствах. Кроме того, для них ранее были проведены исследования температурных полей и термоупругих напряжений, возникающих в процессе выращивания [2-5].

1. Алгоритм расчета

В данной работе построен алгоритм нахождения всех систем скольжения заданного семейства и касательных составляющих тензора термоупругих напряжений для кристалла произвольного кристаллографического класса. Этот алгоритм позволяет определить число эквивалентных систем скольжения, а также индексы плоскостей и направлений этих систем, построить матрицы направляющих косинусов для произвольной ориентации кристалла, рассчитать компоненты тензора напряжений во всех системах скольжения и среднеквадратичное касательное напряжение.

В качестве исходных данных используются 1) номер кристаллографического класса, которому принадлежит кристалл, его кристаллографические характеристики; 2) тензор напряжений; 3) ориентация кристалла; 4) тип семейства действующей системы скольжения, заданный индексами любой из систем данного семейства.

На первом этапе вычисляются индексы всех кристаллографически различных систем скольжения заданного семейства для кристаллов данной группы симметрии.

Каждому классу симметрии кристалла соответствует множество преобразований, в результате действия которых на элементарную ячейку она совмещается сама с собой. Множество таких преобразований образует группу. Для нахождения всех систем скольжения заданного семейства необходимо знать кристаллографические индексы одной из систем скольжения этого семейства. Любой из 32 классов симметрии имеет от одного до трех генераторов операций, порождающих группу симметрии. Учитывая, что системы скольжения инвариантны относительно генератора $\bar{1}$, т. е. их количество не зависит от наличия или отсутствия центра инверсии, отождествим классы, имеющие одинаковые группы симметрии относительно прямых. В результате число различных с точки зрения пластической деформации классов симметрии уменьшится до двенадцати, число генераторов каждого класса — до двух. Последовательное применение этих генераторов к исходной системе скольжения позволяет определить индексы всех систем заданного семейства.

На втором этапе определяются касательные компоненты тензора напряжений во всех найденных системах скольжения. В кристаллофизике для описания физических свойств кристаллов используется стандартная кристаллофизическая система координат X_1, X_2, X_3 , представляющая собой декартову систему, связанную с кристаллографическими осями. Правила выбора осей кристаллофизической системы стандартны и описаны в разделе 86 [6]. Для тетрагональных кристаллов каломели оси кристаллофизической системы совпадают с кристаллографическими осями. В практических задачах вводится другая система координат X, Y, Z , обычно также декартова, связанная с условиями нагружения или элементами симметрии внешней формы кристалла (рис. 1).

Системы скольжения связаны с кристаллической решеткой и задаются кристаллографическими индексами нормали к плоскости скольжения в обратной и индексами направления скольжения (вектора Бюргера дислокаций) в прямой кристаллографических системах. Системой координат, связанной со скольжением, считаем декартову систему, первые два базисных вектора которой совпадают с вышеуказанными векторами единичной длины, а третий является векторным произведением двух первых. Обозначим оси этих систем X_k^s, Y_k^s, Z_k^s ($k = 1, \dots, N$), N — искомое число различных систем скольжения заданного типа.

Сдвиговое напряжение τ^k , определяющее работу k -й системы скольжения, совпадает с компонентой τ_{12}^k тензора напряжений в системе координат X_k^s, Y_k^s, Z_k^s , связанной с этой же k -й системой скольжения. Как известно [6], пересчет компонент тензора напряжений при

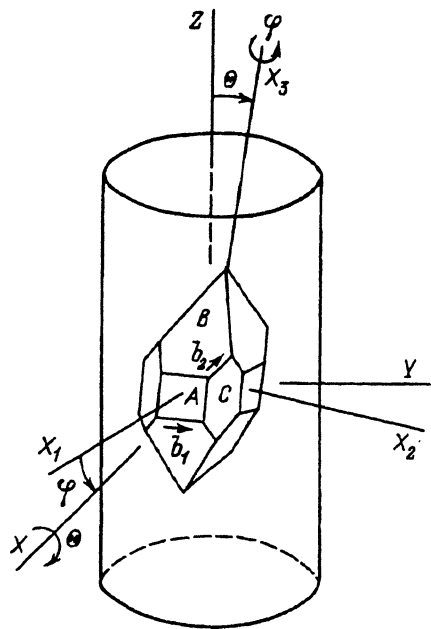


Рис. 1. Системы координат и возможные плоскости и направления скольжения для кристаллов каломели.

X, Y, Z — система координат, связанная с геометрией внешней формы кристалла, Z — направление одноосного сжатия или направление вращения, $X_1 X_2 X_3$ — кристаллофизическая система координат, A, B, C — плоскости скольжения, b_1, b_2 — направления скольжения, φ и θ — углы, задающие ориентацию кристалла.

повороте осей координат производится следующим образом:

$$\tau_{ij}^k = C_{i\alpha}^k C_{j\beta}^k \sigma_{\alpha\beta},$$

где $\sigma_{\alpha\beta}$ — тензор напряжений в рабочей системе координат X, Y, Z , C^k — матрицы перехода от рабочей системы к системам координат, связанным со скольжением.

Они отыскиваются в виде $C^k = C_0^k C_{0R}$, где C_0^k связывают стандартную кристаллографическую систему с системами, построенными на элементах скольжения описанным выше образом. От ориентации рабочей системы эти матрицы не зависят. Матрица C_{0R} связывает рабочую систему с кристаллографической и зависит только от ориентации рассматриваемого кристалла.

Среднеквадратичные значения касательных напряжений по всем кристаллографически эквивалентным системам рассчитывались по формуле

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\tau_{12}^k)^2}. \quad (2)$$

Более подробное описание алгоритма, а также текст соответствующей программы на языке Фортран приведены в [7]. Для использования алгоритма необходимо задать численные значения компонент тензора напряжений σ_{ij} . В общем случае эти значения могут быть заданы условиями нагружения кристалла или получены в результате предшествующего расчета.

2. Расчеты касательных напряжений при механических испытаниях монокристаллов каломели

В качестве исходного тензора напряжений используется простейший тензор одноосного сжатия, содержащий лишь одну ненулевую компоненту σ_{zz} . В [8-10] на основе анализа кристаллической решетки каломели определены вероятные системы скольжения (табл. 1). На рис. 1 совокупность возможных плоскостей и направлений скольжения изображена в виде многогранника, который связан с кристаллофизическими осями X_1, X_2, X_3 . Пространственная ориентация рабочей системы координат X, Y, Z , связанной с геометрической формой образца, относительно совокупности систем скольжения задается двумя углами: φ — поворота вокруг оптической оси X_3 ; θ — отклонения оптической оси от направления приложения нагрузки Z .

На рис. 2 представлены результаты расчетов касательных напряжений, действующих в перечисленных в табл. 1 системах, для монокристаллов каломели при одноосном сжатии. В каждом семействе систем выбрана та система, где касательные напряжения максимальны. Величина напряжений (в относительных единицах) равна длине радиус-вектора от начала координат до точки на графике. Анализ этих зависимостей показывает, что выбором ориентации невозможно разделить работу всех систем. В то же время можно указать ряд

Таблица 1

Вероятные системы скольжения в кристаллах каломели

№ п/п	Плоскость скольжения	Направление скольжения	Число эквивалентных систем (N)
1	A {100}	b_1 (010)	2
2	B {101}	b_1 (010)	4
3	B {101}	b_2 (111)	8
4	C {110}	b_2 (111)	4

Таблица 2

Системы скольжения кристаллов каломели, работающие
при одноосном сжатии образцов различной ориентации

Номер ориен- тации	Направ- ление сжатия	Плоскость боковой грани	φ, °	θ, °	Ab ₁	Bb ₁	Cb ₂	Bb ₂
1	[001]	(110)	0	0				+
2	[110]	(1 $\bar{1}$ 0)	45	90	+	+		
3		(100)	0	45		+	+	+
4		(110)	45	45	+	+	+	+
5	[100]	[010]	0	90			+	+
6			15	20-25			+	+
7			0	70			+	

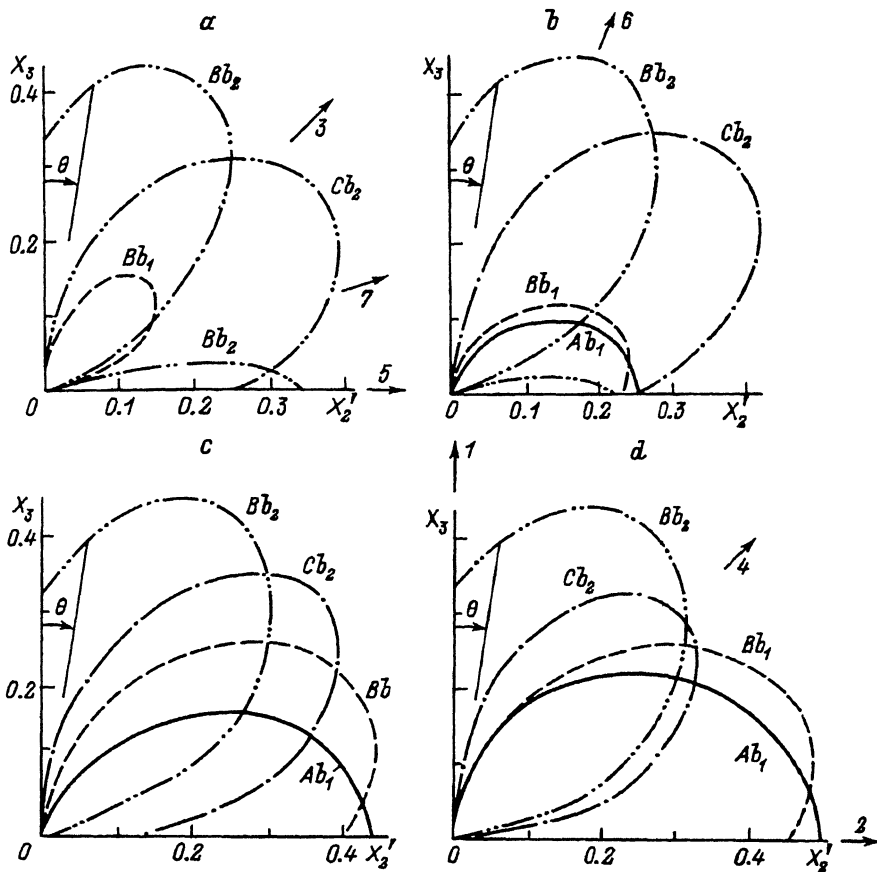


Рис. 2. Зависимость касательных напряжений от угла θ отклонения направления приложенной нагрузки от оптической оси для различных систем скольжения (сечения указательной поверхности).

Величина напряжений (в относительных единицах) равна длине радиус-вектора от начала координат до точки на графике. φ : $a - 0^\circ$, $b - 15^\circ$, $c - 30^\circ$, $d - 45^\circ$. Стрелки с цифрами показывают ориентации кристалла, приведенные в табл. 2. Ось X_2' образуется из оси X_2 при повороте системы координат вокруг оси X_3 на угол φ .

ориентаций, в которых работает одна или минимальное число систем скольжения. Эти ориентации приведены в табл. 2. Условия одиночного скольжения могут быть реализованы только для систем Bb_2 (ориентация 1) и Cb_2 (ориентация 7). В ориентациях 2 и 4 вместе работают системы Ab_1 и Bb_1 , а в ориентации 3 скольжения по Ab_1 нет, но зато работают три другие системы.

В [9,10] были проведены механические испытания образцов с ориентациями 1–5 при комнатной температуре. Оказалось, что в ориентациях 1 и 5 скольжение по системе Bb_2 не реализуется. Поэтому деформация образцов ориентации 1, в которой эта система была бы единственной ненулевой, идет путем сбросообразования, а в образцах ориентации 5 работает лишь одна система Cb_2 . В образцах других ориентаций действительно наблюдается множественное скольжение, соответствующее работе нескольких систем. На основе проведенных

расчетов в дополнение к экспериментально испытанным можно также рекомендовать ориентации 6 и 7, в которых следует ожидать одиночное скольжение по системе Cb_2 .

Расчеты напряжений, выполненные в упругом приближении, не позволяют, естественно, учесть различие критических напряжений скольжения по различным системам. Так, например, фактор Шмидта для системы Bb_2 оказался большим во многих ориентациях, однако в эксперименте полосы скольжения по этой системе наблюдались лишь на поздних стадиях деформации. Вместе с тем совместный анализ расчетных и экспериментальных данных позволяет в ряде случаев определить критические напряжения скольжения в разных системах.

Например, при испытаниях образцов ориентации 5 предел текучести составил $\sigma_c = 11.1$ МПа [9], и поскольку в этой ориентации работает только система Cb_2 , то можно определить критическое напряжение по этой системе $\tau_c = 0.25 \cdot 11.1 = 2.8$ МПа. Испытания ориентации 3 дают $\sigma_c = 2.8$ МПа [9]. Как следует из расчета, в данной ориентации могут работать системы Cb_2 (с коэффициентом 0.43) и Bb_1 (0.2). Учитывая результаты испытаний ориентации 5, можно предположить, что работает система Bb_1 и критическое напряжение скольжения по этой системе $\tau_c = 0.2 \cdot 2.8 = 0.56$ МПа. В образцах ориентации 2 фактор Шмидта для двух систем Ab_1 и Bb_1 практически одинаков и равен примерно 0.5, а предел текучести $\sigma_c = 1.4$ МПа. Поскольку в образцах наблюдались следы скольжения по обеим системам, то можно считать, что для них предел текучести примерно одинаков и равен $\tau_c = 0.7$ МПа.

3. Расчет касательных компонент тензора термоупругих напряжений при выращивании кристаллов каломели

Расчетные формулы для компонент тензора термоупругих напряжений, возникающих в растущем кристалле из-за нелинейности температурного поля, приведены в [2-4]. Они получены путем асимптотического интегрирования уравнений термоупругости и справедливы во всем объеме кристалла, за исключением областей, прилегающих к торцам. Для кристалла в форме стержня круглого поперечного сечения эти формулы имеют вид

$$\bar{\sigma}_{ij}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = \frac{\alpha_0 R^2}{S_0} \sigma_{ij}(x, y) \frac{d^2 T}{dz^2}, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}_{ij}$ — размерные значения напряжения в данной точке кристалла, α_0, S_0 — первые инварианты тензора теплового расширения и упругой податливости ($\alpha_0 = (\alpha_{11} + \alpha_{22} + \alpha_{33})/3$, $S_0 = (S_{11} + S_{22} + S_{33} + 2(S_{23} + S_{13} + S_{12})/3 + (S_{44} + S_{55} + S_{66})/3)/5$), R — радиус кристалла, $d^2 T/dz^2$ — вторая производная температуры по оси выращивания $0z$, x, y — безразмерные декартовы координаты ($x = \bar{x}/R$, $y = \bar{y}/R$). Обезразмеренные термоупругие напряжения в данной точке сечения $\sigma_{ij}(x, y)$ определены через компоненты тензоров α , S и λ (тензор теплопроводности), зависят от ориентации кристалла и не зависят от конкретных геометрических размеров и численного значения кривизны температурного поля $d^2 T/dz^2$. Поэтому в качестве входных данных для описанного

алгоритма целесообразно использовать именно значения σ_{ij} . Их распределение по сечению имеет вид

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= A_1 (1 - x^2 - 3y^2), & \sigma_{yy} &= A_1 (1 - 3x^2 - y^2), & \sigma_{xy} &= 2A_1xy, \\ \sigma_{xz} &= A_3 (1 - x^2 - 3y^2) + 2A_2xy, & \sigma_{yz} &= A_2 (1 - 3x^2 - y^2) + 2A_3xy, \\ \sigma_{zz} &= C_{11}x^2 + C_{12}xy + C_{22}y^2 - (C_{11} + C_{22})/4.\end{aligned}\quad (4)$$

Коэффициенты $A_1, A_2, A_3, C_{11}, C_{12}, C_{22}$ зависят от компонент тензоров α, S, λ (учитывают анизотропию теплофизических и упругих свойств кристаллов) и от кристаллографической ориентации выращиваемого кристалла. Для определения A_i, C_{jk} необходимо задать матрицы тензоров теплового расширения (3×3), теплопроводности (3×3) и упругой податливости (6×6).

Использовались следующие значения компонент тензоров: теплового расширения α [11]

$$\begin{bmatrix} 46.5 & 0. & .0 \\ .0 & 46.5 & .0 \\ .0 & 0. & 0.7 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \text{ K},$$

теплопроводности λ [3]

$$\begin{bmatrix} 0.46 & 0. & 0. \\ 0. & 0.46 & 0. \\ 0. & 0. & 4.5 \end{bmatrix} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$$

упругой податливости S [12]

$$\begin{bmatrix} 30.5 & -27.2 & -0.65 & 0. & 0. & 0. \\ -27.2 & 30.5 & -0.65 & 0. & 0. & 0. \\ -0.65 & -0.65 & 1.5 & 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 11.8 & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 0. & 11.8 & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 8.2 \end{bmatrix} \cdot 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}.$$

Формулы (4) позволяют определить компоненты σ_{ij} в любой точке сечения выращиваемого кристалла. В дальнейшем для расчетов была выбрана точка на оси кристалла ($x = y = 0$). Были также проведены расчеты и для других точек сечения, в частности на поверхности кристалла ($R = 1$). Они показали, что меняется лишь величина τ_{rms} , а характер ориентационной зависимости остается неизменным.

Были рассчитаны среднеквадратичные значения касательных напряжений по всем кристаллографически эквивалентным системам скольжения в четырех вышеуказанных семействах. Пространственная ориентация кристалла задавалась последовательными поворотами на

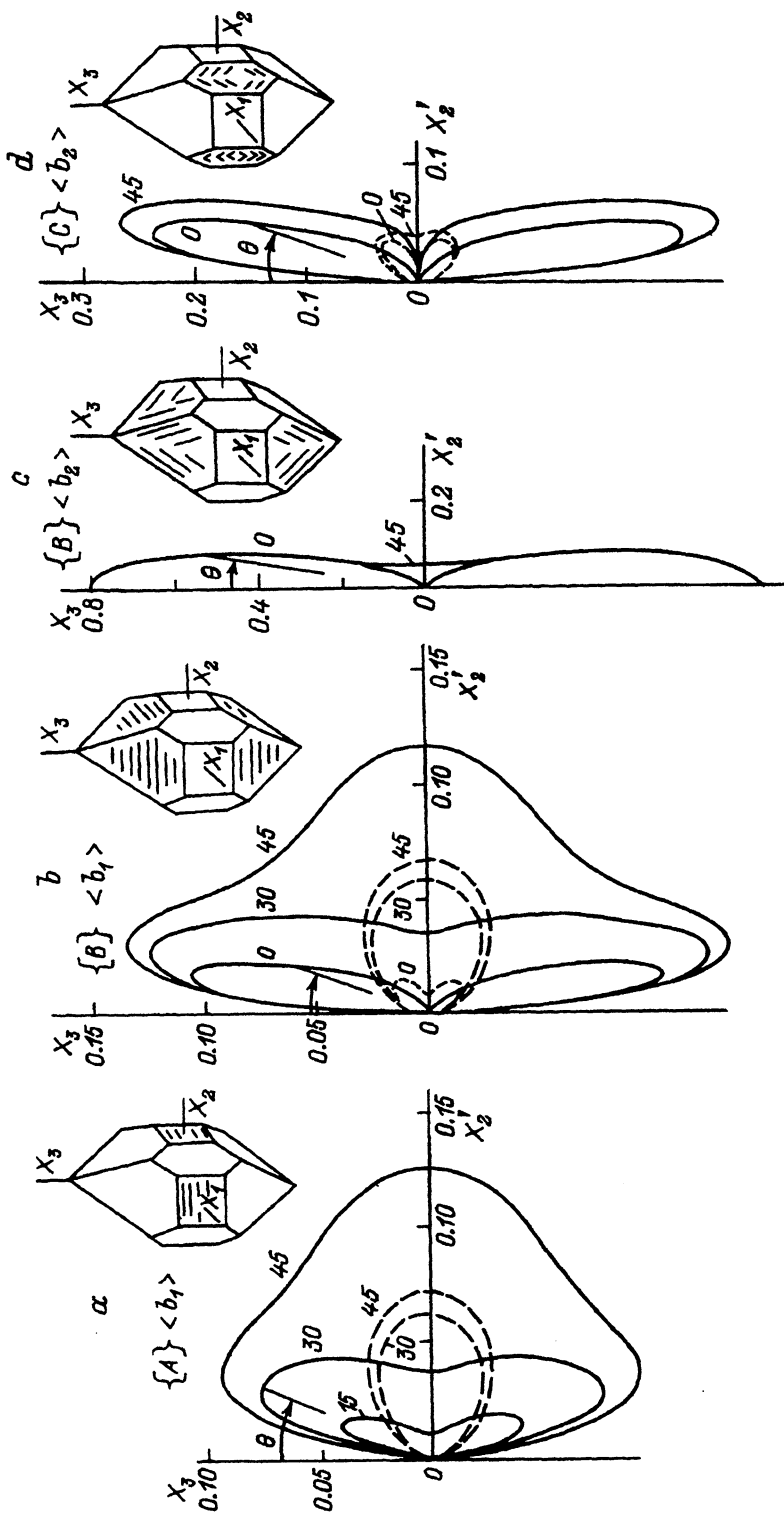


Рис. 3. Ориентационная зависимость среднеквадратичных касательных напряжений $\tau_{\text{г.м}}$ (сечения указательных поверхностей) для различных систем скольжения. Справа от кривых изображены соответствующие системы скольжения. а — $Ab_1\{100\}(010)$, б — $Bb_1\{101\}(010)$, в — $Bb_2\{101\}(111)$, д — $Cb_2\{110\}(111)$. Ось X_2' образуется из оси X_2 при повороте системы координат вокруг оси X_3 на угол φ .

углы Эйлера φ и θ , как и при механических испытаниях. В данном случае θ есть угол отклонения направления выращивания от оптической оси, а угол φ определяет плоскость, в которой это отклонение осуществляется (рис. 1).

На рис. 3 приведена ориентационная зависимость среднеквадратичных касательных напряжений по четырем различным системам скольжения. Цифры у кривых соответствуют различным значениям угла φ . Пунктиром приведены аналогичные зависимости, рассчитанные без учета анизотропии коэффициентов теплопроводности, теплового расширения и упругой податливости. Видно, что ориентационные зависимости в этом случае отличаются не только количественно, но и качественно. Поэтому учет анизотропии теплофизических и упругих свойств кристалла в данном случае обязателен.

Анализ кривых по рис. 3 показывает, что существует резкая анизотропия среднеквадратичных касательных напряжений τ_{rms} . По характеру ориентационной зависимости близки системы Ab_1 и Vb_1 , Cb_2 и Vb_2 . Характерно, что напряжения в системах Ab_1 и Vb_1 , сильно зависят как от θ , так и от φ , а в системах Cb_2 , Vb_2 зависят главным образом от угла θ .

Сравнение τ_{rms} по величине показывает, что максимальные значения напряжений в системе Vb_2 достигают 0.8 (безразмерные единицы), в системе $Cb_2 \sim 0.25$, а в системах Ab_1 и Vb_1 — ~ 0.1 . Необходимо, однако, заметить, что, по данным механических испытаний, приведенным в [9], критическое напряжение сдвига в первых двух системах скольжения в несколько раз больше, чем в двух других. Поэтому можно предположить, что все системы находятся примерно в одинаковых условиях и возможно скольжение по любой из них.

Для выбора оптимальной ориентации выращивания кривые для различных систем сведены на один график: для $\varphi = 0$ (рис. 4, а) и для $\varphi = 45^\circ$ (рис. 4, б). Видно, что минимальное значение τ_{rms} реализуется при выращивании в направлении $[010]$ ($\varphi = 0$, $\theta = 90^\circ$ или что то же самое $\varphi = 90^\circ$, $\theta = 90^\circ$ в силу существования оси симметрии четвертого порядка). Причем отклонение от этого направления по углу φ в пределах $\sim 45^\circ$ и по углу θ в пределах $\sim 30^\circ$ не приводит к значительному увеличению напряжений. По-видимому, это направление выращивания можно считать наилучшим с точки зрения получения минимальных термических напряжений.

Представляет интерес оценить реальную величину термоупругих касательных напряжений. Для этого необходимо знать величину второй производной температуры в направлении выращивания. В [2] приведены экспериментальные измерения распределения температуры при выращивании цилиндрических кристаллов каломели диаметром 24 мм. Из этих данных максимальное значение второй производной d^2T/dz^2 можно оценить как $0.3 \cdot 10^6$ К/м². Этому значению соответствует $\bar{\tau}_{rms} = 12.5\tau_{rms}$ МПа, где τ_{rms} — безразмерные значения касательных напряжений, приведенные на рис. 3, 4. Таким образом, видно, что при выращивании кристалла в неблагоприятной ориентации $[001]$ τ_{rms} может достигать ~ 10 МПа, что превышает критическое напряжение сдвига ([9]) примерно в 2 раза. При выращивании в направлении $[010]$ и близких к нему касательные напряжения могут составлять ~ 0.1 МПа и не превышают критических значений.

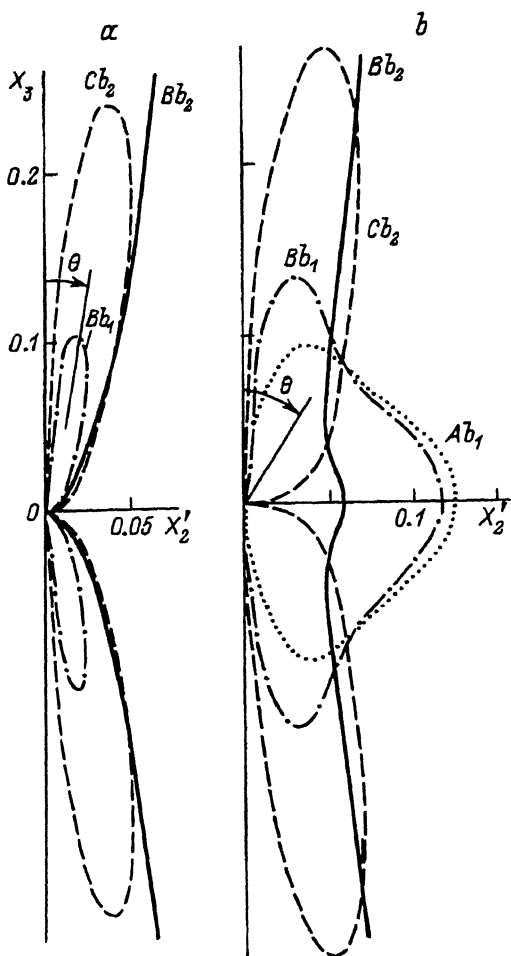


Рис. 4. Ориентационная зависимость τ_{rms} для $\varphi = 0$ (а) и 45° (б). Обозначения те же, что и на рис. 3.

Таким образом, расчет касательных напряжений в системах скольжения в монокристаллах каломели показал, что для данного кристалла невозможно найти такие ориентации, которые обеспечивали бы условия одиночного скольжения при испытаниях на сжатие для каждой из действующих систем. Указаны ориентации, обеспечивающие одиночное скольжение по одной из систем и максимально разделяющие работу остальных. Аналогичные расчеты для случая выращивания позволили установить, что ориентация $\langle 010 \rangle$ является оптимальной с точки зрения предотвращения пластической деформации и образования дефектов.

Список литературы

- [1] Современная кристаллография. М. (1981). Т. 4. С. 77.
- [2] Барта Ч., Барта Ч. (мл.), Галактионов Е.В., Крымов В.М., Антонов П.И., Триска А. Изв. АН СССР. Сер. физ. 47, 327 (1983).
- [3] Galaktionov E.V., Krymov V.M., Chvoj Z., Barta Č., Trnka J. Czech. J. Phys. 1988, V. B38, 1387 (1988).

- [4] Вандакуров И.Ю., Галактионов Е.В., Юферев В.С., Крымов В.М., Барта Ч. Изв. АН СССР. Сер. физ. **52**, 1879 (1988).
- [5] Vandakurov I.Yu., Galaktionov E.V., Yuferev V.S., Krymov V.M., Barta Č. Proc. of the Second Int. Symposium on Univalent Mercury Holides. Trutnov, Czechoslovakia (1989), P. 61-67.
- [6] Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М. (1979), С. 639.
- [7] Бахолдин С.И., Галактионов Е.В., Крымов В.М., Слободинский В.Д. Препринт ФТИ № 1603. СПб (1993), С. 34.
- [8] Бережкова Г.В., Барта Ч., Аронова А.М., Салков А.В. Кристаллография **33**, 1543 (1988).
- [9] Berezhkova G.V., Barta Č., Aronova A.M. Proc. of the Second Int. Symposium on Univalent Mercury Holides, Trutnov, Czechoslovakia (1989), P. 128-140.
- [10] Бережкова Г.В., Аронова А.М. Кристаллография **35**, 1492 (1990).
- [11] Барта Ч., Задохин Б.С., Каплянский А.А., Малкин Б.З., Марков Ю.Ф., Морозов О.В., Савенко Б.А. ФТТ **20**, 3664 (1978).
- [12] Сильверстова И.М., Барта Ч., Добржанский Г.Ф., Беляев Л.М., Писаревский Ю.В. Кристаллография. **20**, 359 (1975).