УДК 548.2, 548.21, 669.3

В.И. Славов

СИММЕТРИЯ ОРИЕНТАЦИЙ И СИСТЕМ ДВОЙНИКОВ КРИСТАЛЛОВ

Двойники кристаллов наблюдают с давних времен в минералах, металлах, сплавах и друзах кристаллов. Они характеризуются плоскостью двойникования, по отношению к которой атомные конфигурации находятся в зеркальном положении. Множество двойников образованы в разных физических условиях: во время кристаллизации, деформации, удара, взрыва, отжига или фазовых превращений. Двойникование часто представляют как процесс релаксации упругих напряжений в кристаллической решетке, «конкурирующий» со скольжением. Конкуренция предполагает одновременность действия скольжения и двойникования, их «борьбу» за право участия в трансформации структуры под влиянием внешнего воздействия. В действительности один механизм сменяет другого, когда возможности предыдущего исчерпаны. Двойники образуются на некоторых специальных границах. Продемонстрирована возможность исследования двойников методом реперной дифракции.

Ключевые слова: кристаллы, двойники, системы двойникования, группы симметрии ориентаций, группы симметрии полей механических и термических напряжений, реперная дифракция.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-183-194

Инструментарий, необходимый для понимания и прогноза кристаллографии двойников

Ориентированный кристалл кодируется группой симметрии ориентации (ГСО), содержащей 4 числа: $(n)g_1g_2g_3$, где n — номер ориентации, $g_1g_2g_3$ — группы симметрии огранки ориентированной ячейки кристалла, когерентной геометрии поля физического воздействия. ГСО содер-

Таблица 1

Периодическая система кристаллографических индексов (hkl)

Периоды (n)	Группы ($Г$)							
	1 $S=8n$	**2** $S=8n+1$	**3** $S=8n+2$	**4** $S=8n+3$	**5** $S=8n+4$	**6** $S=8n+5$	**7** $S=8n+6$	**8** $S=8n+7$
0	0 000	1 100	2 110	3 111	4 200	5 120	6 112	7 —
1	8 220	9 122,300	10 130	11 113	12 222	13 230	14 123	15 —
2	16 400	17 140,223	18 114,330	19 133	20 240	21 124	22 233	23 —
3	24 224	25 340,500	26 134,150	27 115,333	28 —	29 234,250	30 125	31 —
4	32 440	33 144,225	34 334,350	35 135	36 244,600	37 160	38 116,235	39 —

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 183–194.
© В.И. Славов. 2017.

Таблица 2

7 типов ограниченных ориентаций кристаллов

Номер типа ориентации *n*	Формула ограниченной ориентации	Примеры ограниченных ориентаций
1	$S_P = S_\perp = S_{\|\|}$	$\begin{vmatrix}001\\010\\100\end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix}122\\21\bar{2}\\2\bar{2}1\end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix}236\\62\bar{3}\\3\bar{6}2\end{vmatrix}$
2	$S_P = 1, S_\perp = S_{\|\|}$	$\begin{vmatrix}001\\110\\1\bar{1}0\end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix}001\\120\\2\bar{1}0\end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix}001\\410\\1\bar{4}0\end{vmatrix}$
3	$S_\perp = 1, S_P = S_{\|\|}$	$\begin{vmatrix}110\\001\\1\bar{1}0\end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix}120\\001\\2\bar{1}0\end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix}410\\001\\1\bar{4}0\end{vmatrix}$
4	$S_{\|\|} = 1, S_P = S_\perp$	$\begin{vmatrix}110\\1\bar{1}0\\001\end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix}120\\2\bar{1}0\\001\end{vmatrix}$ $\begin{vmatrix}410\\1\bar{4}0\\001\end{vmatrix}$
5	$l^2S_\perp = S_P \cdot S_{\|\|}$	$l=1\begin{vmatrix}111\\11\bar{2}\\1\bar{1}0\end{vmatrix}$ $l=2\begin{vmatrix}121\\\bar{4}12\\1\bar{2}3\end{vmatrix}$ $l=3\begin{vmatrix}114\\17\bar{2}\\\bar{5}11\end{vmatrix}$
6	$n^2S_{\|\|} = S_P \cdot S_\perp$	$n=1\begin{vmatrix}111\\1\bar{1}0\\11\bar{2}\end{vmatrix}$ $n=2\begin{vmatrix}121\\1\bar{2}3\\\bar{4}12\end{vmatrix}$ $n=3\begin{vmatrix}114\\\bar{5}11\\17\bar{2}\end{vmatrix}$
7	$m^2S_P = S_\perp \cdot S_{\|\|}77$	$m=1\begin{vmatrix}112\\1\bar{1}0\\111\end{vmatrix}$ $m=2\begin{vmatrix}412\\1\bar{2}1\\12\bar{3}\end{vmatrix}$ $m=3\begin{vmatrix}172\\11\bar{4}\\51\bar{1}\end{vmatrix}$

Таблица 3

7 типов осевых ориентаций кристаллов

Номер типа ориентации *n*	Структура индексов осевой ориентации
1	<001>
2	<110>
3	<hk0>
4	<111>
5	<hkk> 112 k < h
6	<hhl> 122 h < k
7	<hkl>

жит полную информацию о такой ориентации кристалла, которая бы соответствовала симметрии полей напряжений. Кристаллографические индексы кодируются номерами групп периодической системы индексов [1]. Геометрическими образами ГСО являются прямоугольные параллелепипеды (ограниченные текстуры) и прямоугольные призмы (осевые ориентировки). С физической точки зрения для описания двойников достаточен анализ симметрии ориентаций, принадлежащих одной группе симметрии исходной ориентации (ГСО).

В 3D-мире все многообразие физических воздействий ограничивается 17 группами симметрии. 14 групп соответствуют симметрии полей напряжений: $\infty/\infty \cdot m$, $m \cdot 2{:}m$, $\infty{:}2$, $2{:}2$, ∞/∞, $2{:}m$, $m \cdot \infty{:}m$, $\bar{4} \cdot m$, $\bar{4}$, $2 \cdot m$, m, $\bar{2}$, 2, 1. Три оставшиеся группы принадлежат симметрии электрических ($\infty \cdot m$), магнитных ($\infty{:}m$) и гравитационных (∞) полей [2, 3].

В результате размещения ГСО в заранее разработанных таблицах: сингония — группа симметрии поля получены 14 таблиц ГСО кристаллов всех сингоний в полях напряжений всех 14 групп симметрии [4—7]. В данной работе в 6 таблицах отмечены позиции систем двойникования (курсив) и ориентировок двойников (жирный шрифт) в разных металлах и металлоидах, образованных в полях напряжений разных групп симметрии.

Прогнозирование двойников на основе существующих оценок двойникования

В кубических кристаллах известны системы двойникования: {111}<112> ГЦК и {112}<111> в ОЦК кристаллах. Они соответствуют группам симметрии ориентаций (ГСО) кубических кристаллов в поле напряжений продольной прокатки симметрии $m \cdot 2{:}m$ (табл. 4). Деформационные двойники и двойники отжига ГЦК — металлов и сплавов разориентированы на границе РСУ <111> на угол 60°.

Когда повороты решеток из-за сильного трения и широких дефектов упаковки, затруднены перестройка структуры происходит двойникованием. В отличие от сдвига, при котором соблюдаются условия линейной когерентности, двойникование сопровождается генерацией одной ГСО. Все экспериментальные данные о двойниках приведены из монографий [8—9].

Данн обнаружил, что при малых обжатиях в кристаллах железа двойникование происходит: в зернах (110) <001> появляются полосы Неймана с ориентировкой (114)<221>. Обе ориентировки зерен принадлежат ГСО <2>323 кубических кристаллов в поле напряжений группы симметрии $m \cdot \infty{:}m$ (табл. 5).

При двойниковании в серебре и его сплавах наряду с ориентациями зерен (112)<111> образуются их двойники (552)<115>. Обе ориентировки принадлежат одной ГСО (7)743 в поле симметрии $m \cdot 2{:}m$.

В текстуре рекристаллизации латуни появляются двойники отжига: (131) $<2\bar{1}1>$ и (557) $<25\bar{5}>$, (771) $<1\bar{2}7>$ и (113) $<\bar{7}12>$. Двойники принадлежит ГСО кубических кристаллов <5>477 в поле термических напряжений группы симметрии $\bar{4} \cdot m$ (табл. 6).

В отожженной поликристаллической латуни компонента текстуры прокатки (110) $<1\bar{1}2>$ — ГСО (5) 374 поля $m \cdot 2{:}m$ трансформируется в двойники отжига (110) $<5\bar{5}2>$ и (114) $<17\bar{2}>$, образующиеся в поле группы симметрии $m \cdot \infty{:}m$ кубических кристаллов — ГСО <2> 374.

В двойниковом положении относительно текстуры прокатки (110) $<1\bar{1}0>$ (исходное положение задано для кристаллов гексагональной сингонии <2>332 — $m \cdot \infty{:}m$) находятся и зерна латуни с ориентировками (110) $<1\bar{1}4>$ и (114) $<1\bar{1}0>$ — ГСО гексагональных кристал-

лов <2>332 в том же поле напряжений группы симметрии $m \cdot \infty{:}m$. Латунь имеет низкую энергию дефектов упаковки. При увеличении степени деформации текстура латуни имеет последовательность: {110}<112> → {135}<211> → {112}<111> [10]. Ориентация {135}<211> соответствует гексагональной модификации латуни ГСО (6) 473 в поле напряжений группы симметрии $m \cdot 2{:}m$. Область гексагональной конфигурации расположения атомов в ГЦК решетке определяется шириной дефектов упаковки.

Классический пример: в текстурах отжига ГЦК металлов часто наблюдают двойники $(001)\langle 100\rangle \rightarrow (221)\langle 1\bar{2}2\rangle$. Они принадлежат ГСО <1>223 кубической решетке в поле группы симметрии $m \cdot \infty{:}m$. В структуре отжига ГЦК металлов можно ожидать сложные ориентировки двойников: $(236)\langle 62\bar{3}\rangle$, $(148)\langle 8\bar{4}1\rangle$, $(269)\langle 9\bar{6}2\rangle$ и т.д.

Двойникование в большей степени распространено в кристаллах средних и низших классов симметрии, в которых существуют ограничения в количестве принадлежащих им ГСО.

Образование двойников характерно для цинка, висмута, сурьмы, олова, бериллия, урана и для других многочисленных кристаллов и минералов с некубическими решетками.

Таблица 4

15 ГСО кристаллов в поле напряжений группы симметрии m · 2 : m

№	Сингония кристалла						
	Кубич.	Гексагон.	Тетрагон.	Ромбоэдр	Ромбич.	Монокл.	Триклин.
1	(2) 001 2 140 2 410 2		(3) 140 2 001 2 410 2		(4) 140 2 410 2 001 2		
2	(5) 110 3 112 7 111 4	(5) 111 4 541 3 123 7	(5) 112 7 174 3 311 4				
3	(6) 110 3 111 4 112 7	α-Ti (6) 113 4 332 7 110 3	(6) 112 7 311 4 174 3				
4	**Ag (7)** **112 7** **111 4** **110 3**	(7) 541 3 123 7 111 4	(7) 741 3 113 4 121 7				
5	*ГЦК (5)* *111 4* *112 7* *110 3*						
6	(6) 111 4 110 3 112 7						
7	*ОЦК (7)* *112 7* *110 3* *111 4*						

Таблица 5

17 ГСО кристаллов в поле напряжений группы симметрии $m \cdot \infty : m$

№	Сингония кристалла						
	Кубич.	Гексагон.	Тетрагон.	Ромбоэдр	Ромбич.	Монокл.	Триклин.
1	**ГЦК** **<1>** **001 2** **010 2** **110 3**	**Латунь** **<2>** **110 3** **110 3** **001 2**	**In,Sn** *<3>* *310 3* *001 2* *310 3*		<1> 001 2 110 3 210 6	<1> 001 2 210 6 110 3	
2	**As,Sb,Bi** **<2>** **110 3** **001 2** **110 3**	<1> 100 2 011 3 010 2	<2> 110 3 111 4 112 7	<3> 310 3 131 4 132 7	As,Sb,Bi		
3	<3> 140 2 411 3 413 3		<1> 001 2 010 2 120 6				
4	**11** <3> 310 3 130 3 001 2			<1> 100 2 021 6 010 2			
5	**Латунь** **<2>** **110 3** **112 7** **111 4**						
6	<3> 310 3 132 7 131 4			**α-Hg** <4> 111 4 112 7 110 3			
7	<4> 111 4 110 3 112 7						

В тетрагональных кристаллах индия (In) и олова (β-Sn) системы двойникования $\{101\}\langle 10\bar{1}\rangle$ и $\{301\}\langle \bar{1}03\rangle$ соответствуют ГСО (3)323 тетрагональных кристаллов в поле симметрии ∞:2 (табл. 8). Оси вращения $\langle 10\bar{1}\rangle$ и $\langle \bar{1}03\rangle$ лежат в плоскости двойникования.

В ромбоэдрических структурах As, Sb и Bi двойникование согласно Баррета [8] происходит по системе {110}<001>, которая соответствует гексагональной ГСО <2>332 в поле напряженного состояния группы симметрии $m \cdot \infty$:m. Ромбоэдрические кристаллы часто представляют в гексагональных осях.

Двойники в ромбоэдрической ртути характеризуются системой $\{\bar{1}11\}\langle 0\bar{1}1\rangle$, соответствующей тригональной ГСО <4> 473 в поле симметрии $m \cdot \infty$:m. В тетрагональной модификации β-Hg — двойникование происходит по системе {135} $\langle 1\bar{2}1\rangle$, принадлежащей тетрагональной ГСО <5> 473 в поле группы симметрии $\bar{4}$ (табл. 7).

В ромбическом α-уране системы двойникования $\{1\bar{1}0\}$ <110> и $\{130\}\langle 3\bar{1}0\rangle$

Таблица 6

15 ГСО кристаллов в поле напряжений осевой группы симметрии $\bar{4}\cdot m$

№	Сингония кристалла						
	Кубич.	**Гексагон.**	**Тетрагон.**	**Ромбоэдр**	**Ромбич.**	**Монокл.**	**Триклин.**
1	<2> 110 3 111 4 113 4	<5> 411 3 113 4 011 3	<7> 531 4 013 3 134 3		<5> 411 3 113 4 235 7	<5> 411 3 235 7 113 4	
2	<5> 411 3 011 3 311 4	<3> 310 3 131 4 133 4	<6> 332 7 113 4 553 4	<7> 311 7 112 4 121 4			
3	<5> 311 4 011 3 130 3		<4> 111 4 110 3 134 3				
4	<5> 211 7 111 4 113 4						
5	<4> 111 4 112 7 123 7						
6	**Латунь** **<5>** **311 4** **121 7** **233 7**						
7	<7> 531 4 112 7 231 7						

прогнозируются ромбическими ГСО (4) 332 в поле симметрии ∞:2 (табл. 8).

Ориентации механических двойников тетрагонального β-урана $\{112\}\langle 1\bar{5}2\rangle$, $\{172\}\langle 3\bar{1}2\rangle$ и $\{176\}\langle 51\bar{2}\rangle$ соответствуют одной ГСО (5)776 тетрагонального ($P4_2/mmm$) кристалла в поле напряжений группы симметрии ∞:2 (кручение).

Перечисленные в таблицах ГСО ориентации отмечены жирным шрифтом, систем двойникования — курсивом. Знаки в индексах 3D-ориентировках упущены с целью экономии пространства в таблицах. Их учет необходим для соблюдения в записи индексов ориентировок ортогональности плоскостей: тройной в группах симметрии с первым символом в (*n*) и двойной — в аксиальных ориентациях <*n*>.

Методом автоматического анализа дифракционных картин обратно рассеянных электронов EBSD были изучены двойники на границах $\sum 3$ (разориентация 60°<111>) отожженной аустенитной стали и меди, прокатанной при криогенной температуре до и после отжига [12].

Существует возможность изучения двойников в металлах и сплавах мето-

дом реперной дифракции РСУ [13]. Исследовали ориентации РСУ $\sum 3$ зерен ($\bar{d}$ = 80—100 мкм) в компоненте текстуры {111}<uvw> отожженной динамной стали по дифракции репера (100) на полюсной фигуре (102) РСУ, полученной на дифрактометре ДРОН-3 в Fe-изл. методом накопления импульсов за время τ = 20 с. [13].

На границах кубических кристаллов с осью разориентации <111> образуются РСУ гексагональной симметрии с соответствующими величинами $\sum$ = 3, 21, 39, 57...

Ориентационные соотношения между первым зерном (система координат), вторым зерном и гексагональной РСУ (в кубической и гексагональной системах) на их границе при выборе ориентации первого зерна (111) $< 11\bar{2} >$ следующие:

$$\Sigma 3 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & \bar{2} \\ 1 & \bar{1} & 0 \end{pmatrix}_1 \oplus \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{3} & 6 & \bar{3} \\ 3 & 0 & \bar{3} \end{pmatrix}_2 \rightarrow$$

$$\rightarrow \left(\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 3 & \bar{3} \\ 6 & \bar{3} & \bar{3} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & \bar{1} \\ 2 & \bar{1} & \bar{1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \bar{1} & 0 \\ 2 & \bar{1} & \bar{1} & 0 \end{vmatrix}^{\square} \right)_{рсу}$$

Таблица 7

16 ГСО кристаллов в поле напряжений осевой группы симметрии $\bar{4}$

№	Сингония кристалла						
	Кубич.	**Гексагон.**	**Тетрагон.**	**Ромбоэдр**	**Ромбич.**	**Монокл.**	**Триклин.**
1	<2> 110 3 110 3 111 4	<6> 455 3 011 3 513 4	<5> 211 7 011 3 111 4		<5> 211 7 111 4 011 3	<6> 331 4 213 7 110 3	<5> 211 7 231 7 111 4
2	<3> 310 3 131 4 130 3	<2> 110 3 111 4 110 3	**β-Hg** <5> *311 4* *121 7* *011 3*	<6> 455 3 10.53 7 513 4			
3	<6> 455 3 513 4 011 3		<3> 310 3 130 3 131 4				
4	<5> 311 4 001 3 121 7						
5	<6> 455 3 513 4 10.5.3 7						
6	<6> 331 4 110 3 213 7						
7	<5> 211 7 111 4 231 7						

Таблица 8

15 ГСО кристаллов в поле напряжений группы симметрии ∞:2

№	Сингония кристалла						
	Кубич.	Гексагон.	Тетрагон.	Ромбоэдр	Ромбич.	Монокл.	Триклин.
1	(2) 001 2 110 3 110 3		**β-U** *(3)* *110 3* *001 2* *110 3*		**α-U** *(4)* *110 3* *110 3* *001 2*	**β-U**	
2	(5) 221 2 114 3 110 3	(5) 210 6 125 7 121 7	**β-U (5)** **211 7** **251 7** **102 6**				
3	(6) 221 2 110 3 114 3	(6) 210 6 121 7 125 7	(6) 211 7 102 6 251 7				
4	(7) 114 3 110 3 221 2	(7) 521 7 121 7 012 6	(7) 521 7 012 6 121 7				
5	(5) 110 3 114 3 221 2						
6	(6) 110 3 221 2 114 3						
7	(7) 411 3 122 2 011 3						

Таблица 9

23 ГСО кристаллов в поле напряжений группы симметрии 2:m
(12 ортогональных и 11 осевых ГСО)

№	Сингония кристалл						
	Кубич.	Гексагон.	Тетрагон.	Ромбоэдр	Ромбич.	Монокл.	Триклин.
1	(5) 130 3 625 2 314 3	<5> 223 2 122 2 212 2	(6) 130 3 314 3 625 2		(7) 625 2 130 3 314 3	<3> 310 3 132 7 136 7	
2	(5) 130 3 315 4 312 7	<2> 110 3 001 2 111 4	(5) 312 7 315 4 130 3	<3> 310 3 130 3 132 7			

3	(6) 130 3 312 7 315 4	<2> 110 3 111 4 001 2	(6) 312 7 130 3 315 4	<3> 310 3 132 7 130 3			
4	(7) 315 4 312 7 130 3	<3> 130 3 001 2 311 4	(7) 315 4 130 3 312 7	<2> 110 3 112 7 332 7			
5	(5) 123 7 412 6 121 7	<3> 130 3 311 4 001 2					
6	(6) 123 7 121 7 412 6	<2> 110 3 110 3 112 7					
7	(7) 412 6 123 7 121 7	**<2> 110 3 112 7 110 3**					

Ориентации 1 зерна соответствуют ориентации 2 зерна с вектором кристаллической решетки вдоль направления прокатки с суммой квадратов индексов, равной сумме квадратов индексов аналогичного направления 1 зерне, умноженной на величину $\sum^2$. Сумма квадратов индексов РСУ в аналогичном

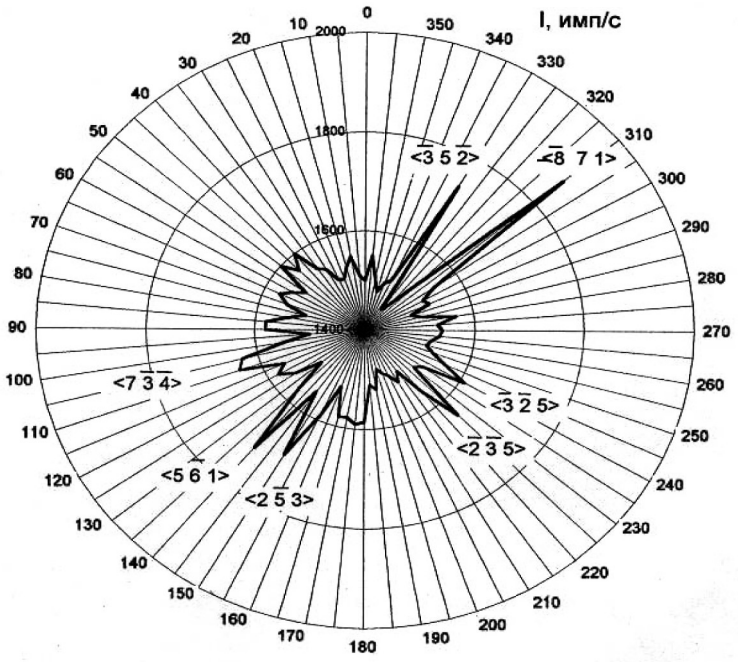


Рис. 1. Полюсная фигура гексагональной РСУ ∑3 <111> динамной стали

направлении равна сумме квадратов индексов направления в 1 зерне, умноженной на величину $\sum$.

Спектр ориентаций гексагональных РСУ $\sum 3$ <111> описывается вариациями векторов типа <352>, лежащих в плоскости $(111)_К = (0001)_Г$, ориентировками $<\bar{8}71>$, $<5\bar{6}1>$ и $<7\bar{3}\bar{4}>$.

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{8} & 7 & 1 \\ 2 & 3 & \bar{5} \end{vmatrix}_{РСУ} \rightarrow \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{3} & 5 & \bar{2} \\ 7 & 1 & \bar{8} \end{vmatrix}_1 +$$

$$+\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \overline{15} & 6 & 9 \\ 3 & \overline{24} & 21 \end{vmatrix}_2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{5} & 2 & 3 \\ 1 & \bar{8} & 7 \end{vmatrix}_2$$

Порядок и знаки индексов предопределены углом разориентировки $\rho = 60°$ между векторами 1-го и 2-го зерен и углу $\rho/2$ между РСУ и зернами.

Выводы

1. Двойникование — процесс переориентации кристаллических решеток с сохранением исходной ГСО в поле напряжений данной группы симметрии.

2 . Основными недостатками известных моделей двойникования в кристаллах являются:

• излишний механицизм геометрии двойникования в кристаллах без учета связи их с полями физического воздействия;

• двойникование слабо связано с текстурой материала;

• неизменность систем двойникования при смене физического воздействия;

• отсутствие попыток использовать аппарат теории симметрии — универсального способа общего языка между полями физического воздействия и кристаллами.

3. Наряду с современными методами исследования двойников и тонкой структуры металлов и сплавов целесообразно внедрять в практику лабораторий рентгеноструктурный метод реперной дифракции специальных и двойниковых границ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Славов В.И.*, *Вишняков Я.Д.* Периодическая система индексов и симметрия текстур кристаллов / Методы и структурные исследования по физике твердого тела. — Вологда, 1974. — С. 60—101.

2. *Шубников А.В. //* Известия АН ССР. Серия физическая. — 1949. — т. 13. — С. 347—375.

3. *Шубников А.В.*, *Копцик В.А.* Симметрия в науке и искусстве. — М.: Наука, 1972. — 339 с.

4. *Slavov V.I.*, *Fedorchuk N.M.* The new structure organization level of the cobalt crystals / Materials of the IV International research and practice conference. Vol. 2. (Westwood, Canada), 2014, p. 88—99.

5. *Славов В.И.*, *Нилова Л.И.*, *Федорчук Н.М.* Новый структурный уровень организации кристаллов на примере железа / Труды 10-й Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии», 25—29 июля, 2013 г. Санкт-Петербург. — СПб., 2013. — С. 649—654.

6. *Славов В.И.* Симметрия кристаллов и соединений рения / Сборник трудов 11-й Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии». — СПб., 2015. — С. 827—844.

7. *Славов В.И.* Структурный уровень организации кристаллов циркония / Труды международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов (НМФ/16)», т. 1. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. — С. 108—121,

8. *Баррет Ч.С.*, *Массальский Т.Б.* Структура металлов. Ч. 2. — М.: Металлургия, 1984. — 685 с.

9. *Cahn R.W.*, Phil. Mag., Suppl., 1954, vol. 3, p. 363.

10. *Вишняков Я.Д.* Дефекты упаковки в кристаллической структуре. — М.: Металлургия, 1970. — 215 с.

11. *Конькова Т. Н., Миронов С. Ю., Корзинков А. В., Мышляев М. М.* Разделение механических двойников и двойников отжига посредством EBSD // Физическая мезомеханика. — 2012. — т. 15. — № 3. — С. 101—104.

12. *Славов В. И.*, *Наумова О. М.*, *Яковлева Т. П.* Патент № 2142623 (РФ) Способ рентгеноструктурного анализа. № А.С. 98101668/06 (001293), 1999, Бюллетень № 34.

13. *Славов В. И.*, *Наумова О. М.*, *Пучков А. В.* Гексагональные РСУ на специальных границах <111> листовой стали // Заводская лаборатория. — 2002. — т. 68. — № 10. — С. 26—31. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Славов Владимир Ионович — доктор технических наук, профессор,
Череповецкое высшее военно-инженерное училище радиоэлектроники,
e-mail: vislavov@yandex.ru.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12, pp. 183–194.

UDC 548.2, 548.21, 669.3

V.I. Slavov

SYMMETRY OF ORIENTATIONS AND SYSTEMS OF CRYSTAL TWINS

Twins of crystals observed since ancient times, the minerals, metals, alloys and druses of crystals. They are characterized by the twinning plane, relative to which atomic configurations are mirror position.

Many twins formed in different physical conditions during crystallization, deformations impact, explosion, annealing or phase transformations.

The physical essence of the double, regardless of condition of its formation, is high speed (comparable with the speed of sound) reorientation of the lattice to its original orientation preserving symmetry groups of the indices of the plane and located in it vectors and the formation of a variety of multiplets.

Rotations around the normal to the mirror plane by using a conversion operator of perform correct mathematical twinning. The formation of the twins is connected with the rotation operations around any axis of lattice, due to the operation of reflection in a crystallographic plane of twinning in the result of the interaction between crystal and stress fields and the superposition of their symmetry groups.

Despite numerous studies of twinning in different materials, many aspects of this phenomenon still remain poorly understood and controversial.

Twinning is often presented as a process of relaxation of elastic stress in the lattice, competing with the slide. The competition involves the simultaneous action of sliding and twinning, their struggle for the right to participate in the transformation of the structure under external influences. In fact, one mechanism is replaced by another, the previous is settled.

The twins are located in some special boundaries. The possibility to study the twins by the new method of X-ray diffraction.

Key words: crystals, twins of the system of twinning, the symmetry group of the orientations of the symmetry group of the fields of mechanical and thermal stresses, reference diffraction.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-183-194

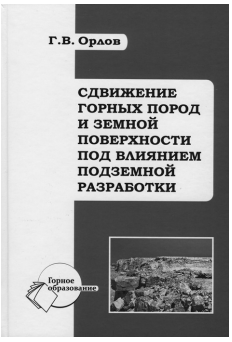
AUTHOR

Slavov V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Cherepovets Higher Military Engineering School
of Radio Electronics, 162622, Cherepovets, Russia,
e-mail: vislavov@yandex.ru.

REFERENCES

1. Slavov V.I., Vishnyakov Ya.D. *Metody i strukturnye issledovaniya po fizike tverdogo tela* (Methods and structural studies on physics of solid), Vologda, 1974, pp. 60—101.
2. Shubnikov A.V. *Izvestiya AN SSR. Seriya fizicheskaya*. 1949, vol. 13, pp. 347—375.
3. Shubnikov A.V., Koptsik V.A. *Simmetriya v nauke i iskusstve* (Symmetry in science and art), Moscow, Nauka, 1972, 339 p.
4. Slavov V.I., Fedorchuk N.M. The new structure organization level of the cobalt crystals. *Materials of the IV International research and practice conference*. Vol. 2. (Westwood, Canada), 2014, pp. 88—99.
5. Slavov V.I., Nilova L.I., Fedorchuk N.M. *Trudy 10-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye metallicheskie materialy i tekhnologii»*, 25—29 iyulya, 2013 g. Sankt-Peterburg (Modern Metallic Materials and Technologies: 10th International Scientific-Technical Conference Proceedings, 25—29 July, 2013 Saint-Petersburg), Saint-Petersburg, 2013, pp. 649—654.
6. Slavov V.I. *Sbornik trudov 11-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye metallicheskie materialy i tekhnologii»* (Modern Metallic Materials and Technologies: 11th International Scientific-Technical Conference Proceedings), Saint-Petersburg, 2015, pp. 827—844.
7. Slavov V.I. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Nanotekhnologii funktsional'nykh materialov (NMF/16)»*, t. 1 (Nanotechnologies of Functional Materials (NMF/16): International Scientific-Technical Conference Proceedings, vol. 1), Saint-Petersburg, Izd-vo Politekhnicheskogo universiteta, 2016, pp. 108—121.
8. Barret Ch.S., Massal'skiy T.B. *Struktura metallov*. Ch. 2 (Structure of metals, part 2), Moscow, Metallurgiya, 1984, 685 p.
9. Cahn R.W. *Phil. Mag., Suppl.*, 1954, vol. 3, p. 363.
10. Vishnyakov Ya.D. *Defekty upakovki v kristallicheskoy strukture* (Defects of packing in crystalline structure), Moscow, Metallurgiya, 1970, 215 p.
11. Kon'kova T.N., Mironov S.Yu., Korzinkov A.V., Myshlyaev M.M. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2012, vol. 15, no 3, pp. 101—104.
12. Slavov V.I., Naumova O.M., Yakovleva T.P. *Patent RU 2142623*, 1999.
13. Clavov V.I., Naumova O.M., Puchkov A.V. *Zavodskaya laboratoriya*. 2002, vol. 68, no 10, pp. 26—31.

НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Орлов Г.В.
Сдвижение горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки. Учебное пособие для вузов. 3-е изд., стер.
Год: 2017
Страниц: 198
ISBN: 978-5-98672-468-3 (в пер.)
UDK: 622.83.01:682.273

Рассмотрено состояние изученности вопроса сдвижения горных пород и земной поверхности при подземной разработке угольных и рудных месторождений. Приведены методы изучения деформационных процессов в породном массиве и на земной поверхности, основные параметры этих процессов и влияющие на них факторы, методы наблюдений за сдвижением земной поверхности, деформациями подрабатываемых объектов и расчета деформаций земной поверхности, а также способы определения допустимых условий выемки полезных ископаемых под инженерными и природными объектами. Изложены принципы управления сдвижением горных пород и деформациями подрабатываемых зданий и сооружений. Описаны методы построения предохранительных целиков, особенности сдвижения горных пород и земной поверхности при скважинных методах добычи твердых полезных ископаемых.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Маркшейдерское дело» направления подготовки «Горное дело». Может быть полезно студентам других специальностей горных учебных заведений и инженерно-техническим работникам горнодобывающих предприятий.