

УДК 552.23:548.734

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Р.М. Султаналиева

Приведены результаты определения параметров структуры горных пород рентгенографическим методом, которые позволяют управлять их деформационными и прочностными свойствами для решения задач при добыче и переработке полезных ископаемых.

Ключевые слова: структура; параметры; рентгенографический метод; дифракция; горная порода; минерал; термообработка.

DETERMINATION OF THE PARAMETERS A STRUCTURAL STATE OF ROCKS X-RAY METHOD

R.M. Sultanalieva

The article presents the results of determination parameters of rocks structure by x-ray method which allow to control their deformation and strength properties for the solution of tasks at production and processing of minerals.

Keywords: structure; parameters; radiographic method; diffraction; rock; mineral; heat treatment.

Результаты рентгенографического метода исследований параметров структурного состояния позволяют управлять деформационными и прочностными свойствами горных пород и минералов для решения задач при добыче и переработке полезных ископаемых, создании строительных материалов.

Рентгенографическое определение деформаций и напряжений в минералах позволяет изучить природу физических процессов, протекающих в горной породе, подвергающейся воздействию внешних полей (механических, тепловых и т. д.).

В основу изучения атомной структуры минералов положено явление дифракции в них рентгеновских лучей.

Если направить пучок рентгеновских лучей на скопление атомов, то их электронные оболочки будут взаимодействовать с падающей волной и рассеивать её в пространство [1]. Направление распространения волны обычно задается вектором \vec{k} , модуль которого равен

$$|\vec{k}| = 2\pi / \lambda,$$

где λ – длина волны.

Дифракцию на минерале можно интерпретировать как “отражение” луча плоскостями кри-

сталлической решетки под вполне определенными фиксированными углами падения и отражения.

Это наблюдается потому, что “отражение” происходит лишь тогда (под тем углом), когда волны, рассеянные параллельными атомными плоскостями, оказываются в фазе и усиливают друг друга.

В этом случае разность хода при рассеянии от соседних плоскостей равна целому числу n длин волн λ :

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta. \quad (1)$$

Формула (1) – закон Вульфа–Брэгга, связывающий направление отражения рентгеновского монохроматического излучения, характеризуемое углом θ , с межплоскостным расстоянием d_{hkl} в решетке (n – порядок отражения). Если это условие не выполняется, то из-за наличия в кристалле очень большого количества плоскостей, возникающих при отражении от них разности фаз, приводят к полному гашению рассеянных пучков при любых углах (рисунок 1).

Формула Вульфа–Брэгга показывает, что дифрагированные пучки для данного d_{hkl} могут быть получены в монохроматическом излучении (т. е. при постоянной λ) только за счет изменения ориентации кристалла, т. е. углов θ .

Таблица 1 – Деформационные характеристики горных пород

Название и место отбора породы	Состояние породы	Номер образца	Модуль упругости, (E)×10 ³ МПа	Коэффициент Пуассона, μ
1	2	3	4	5
Песчаник (Рогун)	Исходное	2	0,39	0,20
	После термообр.	1	0,28	0,30
	После термообр.	4	0,33	0,30
Гранит (Кыртабылга)	Исходное	10	0,85	0,25
	После термообр.	6	0,10	0,30
Мрамор (Новоросийск)	Исходное	12	0,76	0,18
	После термообр.	7	0,30	0,40
Кварц (Восточ. Коунрад, шх.6, г. 220)	Исходное	13	0,75	0,23
	Исходное	14	0,75	0,23
Гранит (Восточ. Коунрад, шх.6, г.150)	Исходное	15	0,43	0,27
	Исходное	16	0,43	0,27

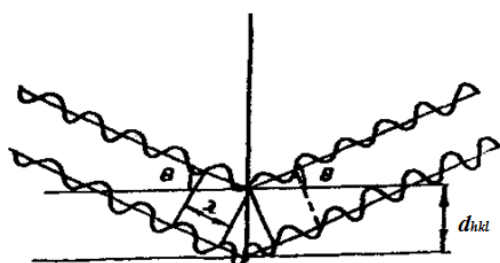


Рисунок 1 – Схема формирования отражения от атомных плоскостей

Расчет параметров тонкой структуры пороодообразующих минералов производится в несколько этапов [2]. Из-за интегральной природы формирования дифракционного пика от поликристаллического образца, разброс значений напряжений вокруг средней величины, связанный с величиной микро деформацией (ϵ), вызовет его уширение. Кроме того, ширина и форма профиля дифракционной линии рентгенограммы поликристалла зависят от величины рассеивающих областей (D) блоков мозаики. Сначала находят интегральную ширину $B_{эксп}$, зависящую от состояния структуры:

$$B = \frac{1}{I_{\max}} \left[h \sum_{k=1}^n I_k - \frac{I_{\phi 1} + I_{\phi 2}}{2} nh \right], \quad (2)$$

где I_{\max} – интенсивность в максимуме дифракционного пика; h – шаг перемещения детектора; n – число точек измерения интенсивности дифракционного пика; $I_{\phi 1}$, $I_{\phi 2}$ – интенсивность фона на краях дифракционного пика.

Плотность дислокаций, находящихся на границе блоков, определяется по формуле:

$$\rho_D = \frac{6nD}{2D^2} = \frac{3n}{D^2}, \quad (3)$$

где ρ – длин линий дислокаций в единице объема (плотность дислокаций); D – размер блока; n – число дислокаций на грани блока.

При $n = 1$ (хаотическое распределение дислокаций)

$$\rho_D = \frac{3}{D^2} \quad (4)$$

можно вычислить плотность дислокаций внутри блока (ρ_g) и истинную плотность дислокаций ($\rho_{ист}$).

Также определяется концентрация деформационных и двойниковых дефектов упаковки.

Рентгеновская дифрактометрия используется для исследования процессов, протекающих в горных породах, подвергающихся внешнему тепловому воздействию [3]. Этим методом исследуются как фазовые превращения, нарушения структуры, тепловое расширение пороодообразующих минералов, так и явления, присущие горной породе в целом – появление микроструктурных напряжений, протекание пластических микродеформаций и т. д.

Для оценки изменений параметров структуры и остаточных напряжений от воздействия теплового поля, исследовали несколько разновидностей горных пород. В таблице 1 представлены деформационные характеристики горных пород до и после их термической обработки.

Для изучения изменений параметров структурного состояния исследовали образцы, представляющие исходные (генетические) состояния и образцы после термической обработки. Исследования проводили на рентгеновском дифрактометре типа ДРОН-2, с использованием специальных гониометрических приставок. Гониометры могут быть снабжены приставками для вращения или колебания крупнозернистых образцов и исследования горных пород в особых условиях.

Таблица 2 – Параметры структуры и остаточных напряжений минералов горных пород

Название и место отбора породы	Название минерала	Состояние и номер образца	$D, \text{Å}$	$\rho_D \cdot 10^{-\text{см}^2}$	$r_D, \text{Å}$	$r_s, \text{Å}$	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\rho_s \cdot 10^{-12} \text{см}^2$	$\rho_{cp} \cdot 10^{-\text{см}^2}$	$\alpha \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^3$	$\sigma_{Bp3} \cdot 10^3 \text{Мбар}$	$\sigma_{Pч3} \cdot 10^3 \text{Мбар}$	
Гранит, Кыргабылгы	Кварц	Исходн., 10 после гермич. обработки, обр.7	254	47			-8,8	123	7,6	27	51	40	1,64	
			398	19			-3,6	18	1,8	16	7,4	10,3	0,61	
Мрамор, Новоросийск	Кальцит	Исходн., 12 после т.о., 7	566	9,4			9,2	17,5	1,3	2000	3000	11	0,80	
			324	29			-8,2	17,1	2,2	2000	3000	4,8	0,26	
Песчаник Рогун	Кальцит	Исходн., 2 после т.о., 4	784	5,0			8,9	15	0,85	2000	3000	1,4	6,46	
			239	52,0			-1,3	47	5,0	2000	2900	8,6	1,95	
	Кварц	исходн., 2 после т.о., 4	651	7,1			-0,68	0,57	0,20	2,8	3,3	0,61	5,5	
			594	8,5			-1,4	2,35	0,45	8,3	9,4	2,2	1,9	
	Кварц	Исходн., 2 ¹ после т.о., 1 пос. т.о., 4 ¹	385	20,2	223	78	-3,97							
			376	21,2	217	76	-3,42							
			535	10,5	309	73	4,11							
Кварц, Вост. Коунрад	Кварц	Исходн., 2 исходн., 2	458	14,3	264	150	-2,93							
			511	11,5	295	320	-1,48							
Гранит, Вост. Коунрад	Кварц	Исходн., 2 исходн., 2	554	9,8	320	171	-1,99							
			688	6,3	397	116	-3,02							

На основе анализа положения и формы профилей рентгеновских линий с использованием методов Фурье и гармонического анализа по интенсивностям получены данные о среднем размере блока мозаики D , величине остаточной деформации кристаллической решетки ϵ , плотности дислокации на границе блока мозаики r_e , средней плотности дислокации r_{cp} , напряжения внутри зерна $s_{г.з.}$, и на границе зерна $s_{г.г.}$, вероятности дефектов упаковки a и двойниковых дефектов g , расстояния между дислокациями на границе блока r_D , расстояния между дислокациями внутри блока r_e . Результаты измерения этих параметров приведены в таблице 2.

Результаты исследований структуры и остаточных напряжений показали, что термическая обработка в режиме закалки приводит к существенным изменениям напряжений на всех структурных уровнях.

В кварцсодержащих горных породах сжимающие остаточные напряжения на уровне кристаллической решетки в основном снижаются и при дальнейшем увеличении температуры преобразуются в растягивающие напряжения.

В мономинеральных породах, содержащих кальциты, преобладающие растягивающие напряжения преобразуются в сжимающие остаточные напряжения. При преобладании сжимающих остаточных напряжений прочность горных пород увеличивается, а при увеличении растягивающих

остаточных напряжений, наоборот происходит разупрочнение.

Плотность дислокации на границе блока изменяется неоднозначно, термообработка горных пород приводит к структурным изменениям в зависимости от минералов. В кальцитах плотность дислокаций от термообработки увеличивается в 2–5 раз, в кварцах, наоборот уменьшается от 1,5 до 2,5 раз.

В кальцитах растягивающие остаточные напряжения 3-го рода преобразуются в значительные сжимающие напряжения, напряжения растяжения внутри и на границе зерен уменьшаются в 2–3 раза.

Термическая обработка также влияет на деформационные характеристики горных пород. У гранита (Кыртабылга), песчаника (Рогун) и мрамора происходит значительное уменьшение модуля упругости.

Литература

1. Зильбершмидт М.Т. Механизм изменения структурного состояния горных пород при внешнем воздействии / М.Т. Зильбершмидт // Физические процессы в горных породах: матер. всес. конф. М., 1984.
2. Зильбершмидт М.Г. Методы анализа структурного состояния горных пород. Ч. 1 / М.Г. Зильбершмидт, Т.К. Заворыкина. М.: МГИ, 1980. С. 88.
3. Зильбершмидт М.Г. Рентгеновские методы исследования горных пород / М.Г. Зильбершмидт, С.В. Ржевская. М., 1981.