УДК 548.735.6 : 552.112

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОЛИВИНОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

В. И. Колесников[1], ***В. В. Бардушкин***[2], ***А. Н. Никитин***[3], ***А. П. Сычев***[4], ***В. Б. Яковлев***[5]

MECHANICAL PROPERTIES OF OLIVINE ROCKS UNDER HIGH PRESSURE

Kolesnikov V. I., Bardushkin V. V., Nikitin A. N., Sytchev A. P., Yakovlev V. B.

The work considers the behavior of textured polycrystals of natural origin at high pressures. The relation between crystallographic textures and effective characteristics of olivine rocks has been established, and the analysis of texture influence on the local stress-strain state of the samples under study has been carried out. It is shown that significantly distinguished textures can be produced under similar conditions of materials formation; however, this is poorly reflected on effective properties. As a result, the local stress-strain state can have essential distinctions.

В своей повседневной деятельности человек использует огромное количество материалов: органические и неорганические, аморфные, стеклообразные, кристаллические, жидкие и газообразные, созданные искусственно или полученные из природных источников. Важнейшими из них являются кристаллические материалы, среди которых в последнее время активно исследуются поликристаллы различной структуры и состава. Эти два фактора (структура и состав) и определяют свойства поликристаллических материалов. Очень часто упорядочение в структуре поликристаллов называют поликристаллической текстурой. Именно она вызывает анизотропию свойств поликристаллических материалов. Для поликристаллов различают два вида текстур — текстуру формы и ориентационную текстуру [1, 2]. Первая связана с формой и размерами компонентов (упорядоченных пор и микротрещин, инородных включений). Вторая определяется преимущественной ориентировкой зерен неоднородностей (кристаллитов) в поликристалле. Наличие текстуры в материале позволяет анализировать поведение исследуемого материала как качественно, так и количественно, а также изучать историю его формирования. Последнее исключительно важно в геофизических исследованиях. При этом анализу, как правило, подвергаются механические свойства образцов поликристаллов.

Горные породы и их образцы, в основном, являются поликристаллами и обладают анизотропией физико-механических свойств, которая обусловлена как текстурой формы, так и ориентационной текстурой [3–5]. Поэтому теоретические и экспериментальные методы текстурного анализа наряду с методами вычисления механических свойств являются основой фундаментальных и прикладных исследований в современной геофизике.

[1]Колесников Владимир Иванович, академик РАН, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Теоретическая механика» Ростовского государственного университета путей сообщения.

[2]Бардушкин Владимир Валентинович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Высшая математика» Московского института электронной техники.

[3]Никитин Анатолий Николаевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований.

[4]Сычев Александр Павлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» Ростовского государственного университета путей сообщения.

[5]Яковлев Виктор Борисович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Высшая математика» Московского института электронной техники.

Данные о текстурном строении горных пород являются основой для интерпретации сейсмической анизотропии литосферы Земли, для реконструкции палеотектонических напряжений и деформаций в блоках и массивах земной коры, исследования механизмов подготовки землетрясений и многих других геологических и геофизических задач. Одним из основных источников данных о составе, состоянии и свойствах глубинных зон литосферы Земли являются оливиновые ксенолиты и дуниты из базальтовых лав, распространенных в областях новейшего вулканизма в пределах континентальных рифтов и областей предрифтового развития. Поскольку возраст этих лав в геологическом масштабе сравнительно молодой, то сами оливины могут давать уникальную информацию о составе, структуре и свойствах вещества верхней мантии Земли.

Исследование текстур, включающее определение размеров и взаимной ориентации кристаллитов, осуществляется различными способами. Однако для получения информации о текстуре массивных образцов наилучшим является нейтронографический метод. В настоящей работе исследуется влияние текстуры на некоторые физико-механические характеристики естественных поликристаллических материалов (образцы оливиносодержащих горных пород) при высоком (400 МПа) всестороннем давлении. В этом случае, как показали исследования [5], кристаллографическая текстура оливина является основным фактором, определяющим упругую анизотропию оливиносодержащих горных пород. Экспериментальные данные и расчеты приведены для образцов ксенолитов и дунитов, отобранных из базальтовых лав горных массивов Центральной и Южной Европы: 9721 (Иврийская зона, Балмучийский перидотитовый массив, Северная Италия), Zb1 и SEM1 (Богемский массив, г. Железный Брод, Чехия), BQ4 (Албанская мирдитовая зона, массив Кукес).

По дифракционным спектрам, зарегистрированным в ходе времяпролетной дифракции тепловых нейтронов (импульсный реактор ИБР-2 пучок №7a в Объединенном институте ядерных исследований г. Дубна), были определены коэффициенты $C_l^{\mu\nu}$ разложения функции распределения кристаллитов по ориентациям $f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$ (ФРО) в пространстве эйлеровых углов $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$ для исследуемых образцов. По результатам экспериментов эти коэффициенты различны для каждого из образцов оливинов. В табл. 1 значения $C_l^{\mu\nu}$ приведены для четных l ($l \leqslant 4$). Поскольку упругие характеристики описываются тензорами, ранг которых не превышает четырех, то для их расчета обычно ограничиваются только четными членами разложения ФРО в ряд по обобщенным шаровым функциям до $l = 4$ включительно и используют функцию $f_4(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$

$$f_4(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) = 1 + \sum_{\mu,\nu} C_2^{\mu\nu} G_2^{\mu\nu}(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) + \sum_{\mu,\nu} C_4^{\mu\nu} G_4^{\mu\nu}(\varphi_1, \Phi, \varphi_2),$$

где $G_l^{\mu\,\nu}(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$ — симметричные обобщенные шаровые функции [6, 7].

Для количественного описания текстуры исследуемых оливинитов в работе [7] была решена задача построения функции распределения кристаллитов по ориентациям (ФРО). Как показали расчеты, имеется существенное различие в значениях ФРО для каждого из образцов оливинов.

В табл. 2 представлены данные по текстуре исследуемых оливинитов. В графе «концентрация» указаны объемные доли материала v_i, кристаллографические оси которых ориентированы в направлении соответствующих эйлеровых координат. Указанные направления установлены в процессе экспериментов по рассеиванию нейтронов. Каждому подобному направлению соответствует свой номер индексированного пика интенсивности рефлекса [3].

На рис. 1 показано расположение индексированных пиков интенсивности рефлексов исследуемых материалов в эйлеровом пространстве. Анализ показывает, что ориентации кристаллографических осей кристаллитов сосредоточены в определенной области. Это позволяет сделать вывод о том, что структуры этих образцов формировались в литосфере Земли в схожих условиях и их макросвойства (иначе — эффективные свойства) будут похожи. Отметим, что для оливинов Zb1 и SEM1 ориентации осей кристаллитов расположены в узком поясе эйлерова пространства, а для оливинов 9721 и BQ4 они имеют довольно сильный разброс по отношению к этому поясу. Это, по-видимому, обусловлено тем, что дальнейшее формирование текстуры оливинов Zb1 и SEM1 происходило в ходе вулканической деятельности и характеризовалось

Таблица 1

Коэффициенты $C_l^{\mu\nu}$ разложения ФРО в ряд по обобщенным шаровым функциям

		$l=2$			$l=2$				
		$\nu=-2$	$\nu=0$	$\nu=2$	$\nu=-4$	$\nu=-2$	$\nu=0$	$\nu=2$	$\nu=4$
	$\mu=-4$	–	–	–	0,03012	−0,45745	−0,07129	0,27334	0,05648
	$\mu=-2$	0,15926	0,02602	−0,09505	0,00000	0,21253	−0,16595	0,11077	0,39066
9721	$\mu=-1$	0,00000	0,41273	−0,14723	0,07100	0,22656	0,48042	−0,27351	0,39670
	$\mu=1$	0,52235	0,08524	−0,16750	0,00000	−0,02184	−0,04280	0,09656	0,03180
	$\mu=2$	0,00000	−0,10598	1,39472	0,49204	0,08327	0,10005	−0,24120	−0,57849
	$\mu=4$	–	–	–	0,00000	0,29487	0,35624	−0,23114	0,00216
		$\nu=-2$	$\nu=0$	$\nu=2$	$\nu=-4$	$\nu=-2$	$\nu=0$	$\nu=2$	$\nu=4$
	$\mu=-4$	–	–	–	0,16550	0,60302	−0,21901	0,37789	−0,15197
	$\mu=-2$	0,72696	0,72345	−0,05853	0,00000	−0,38956	0,13615	0,17128	0,12183
Zb1	$\mu=-1$	0,00000	0,31756	−0,50204	−0,02554	−0,19437	−0,30248	0,47673	0,12878
	$\mu=1$	−0,03295	0,17821	0,85835	0,00000	0,50041	0,16828	−0,14774	−0,09944
	$\mu=2$	0,00000	0,95584	−0,87696	−0,41895	−0,33537	0,16956	0,56177	−0,20116
	$\mu=4$	–	–	–	0,00000	−0,46305	0,14920	0,67723	−0,80397
		$\nu=-2$	$\nu=0$	$\nu=2$	$\nu=-4$	$\nu=-2$	$\nu=0$	$\nu=2$	$\nu=4$
	$\mu=-4$	–	–	–	−0,31991	−0,06959	0,16731	−0,01390	−0,00992
	$\mu=-2$	−0,03351	−0,61065	0,13137	0,00000	0,05642	−0,31231	0,06114	−0,05923
SEM1	$\mu=-1$	0,00000	0,53538	0,07295	−0,21734	−0,16201	−0,04519	−0,00015	−0,07329
	$\mu=1$	0,49416	−0,64723	0,27424	0,00000	0,39057	−0,43573	−0,01623	0,01751
	$\mu=2$	0,00000	0,87801	0,02033	−0,23076	−0,25254	−0,01183	−0,09403	0,15009
	$\mu=4$	–	–	–	0,00000	0,30763	−0,38821	0,13427	−0,14721
		$\nu=-2$	$\nu=0$	$\nu=2$	$\nu=-4$	$\nu=-2$	$\nu=0$	$\nu=2$	$\nu=4$
	$\mu=-4$	–	–	–	−0,17683	0,46367	0,23896	0,45070	−0,39283
	$\mu=-2$	−0,09224	0,85239	−0,09893	0,00000	−0,03504	0,05662	0,52192	0,30663
BQ4	$\mu=-1$	0,00000	0,37251	0,08538	−0,32688	−0,22511	−0,68322	−0,10934	0,39263
	$\mu=1$	0,45301	0,28919	0,13034	0,00000	0,53945	0,49608	−0,87827	0,04599
	$\mu=2$	0,00000	1,51321	−1,78406	−0,16192	0,80737	−0,32146	1,39416	−1,28508
	$\mu=4$	–	–	–	0,00000	0,24032	−0,12701	−0,28801	−0,42469

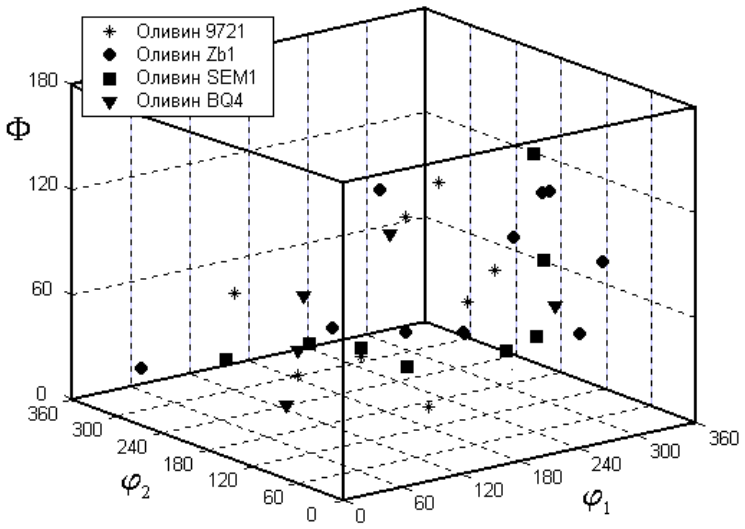


Рис. 1. Расположение в эйлеровом пространстве основных ориентаций кристаллографических осей кристаллитов, определяющих кристаллографическую текстуру оливинитов

Таблица 2

Объемные доли и основные направления ориентации кристаллитов; соответствующие им значения диагональных компонент тензоров локальных напряжений и деформаций при объемном сжатии 400 МПа

№ пика	Концентрация	Координаты пика в эйлеровом пространстве (в градусах)			σ_{11}, МПа	σ_{22}, МПа	σ_{33}, МПа	$\varepsilon_{11}\times\times10^3$	$\varepsilon_{22}\times\times10^3$	$\varepsilon_{33}\times\times10^3$
		φ_1	Ф	φ_2						
Оливин 9721										
1	0,02425	142,17	14,37	246,19	141,413	123,347	134,516	0,2994	0,4233	0,3117
2	0,08227	117,29	56,13	297,75	124,434	134,171	141,808	0,3739	0,3600	0,3005
3	0,02359	166,19	30,69	194,14	149,973	119,173	129,584	0,2508	0,4358	0,3478
4	0,01782	286,18	68,41	172,46	112,381	140,112	148,544	0,4637	0,2980	0,2728
5	0,02891	192,25	111,56	167,52	146,688	136,529	116,441	0,2705	0,3177	0,4462
6	0,00821	136,54	25,92	64,46	144,418	120,427	134,215	0,2780	0,4378	0,3186
7	0,01000	219,17	129,48	158,83	125,578	144,102	131,179	0,3885	0,2913	0,3544
8	0,00141	265,79	51,37	181,85	109,907	144,792	146,698	0,4775	0,2843	0,2726
Оливин Zb1										
1	0,08937	303,99	117,51	132,51	140,468	120,358	139,240	0,3052	0,4112	0,3180
2	0,02728	334,49	109,43	162,11	148,490	130,622	120,916	0,2775	0,3354	0,4215
3	0,29140	28,84	22,43	306,17	146,896	120,377	133,049	0,2862	0,4245	0,3237
4	0,01346	190,45	121,98	200,19	152,984	128,358	118,983	0,2546	0,3551	0,4247
5	0,05095	356,65	72,99	120,41	138,165	148,034	113,580	0,3064	0,2652	0,4629
6	0,01793	211,20	116,24	49,30	145,536	129,429	125,129	0,2765	0,3626	0,3953
7	0,02533	266,85	56,90	34,85	120,325	131,600	148,000	0,4227	0,3446	0,2671
8	0,02225	254,36	12,19	345,97	122,110	141,919	135,697	0,4230	0,3068	0,3046
9	0,00992	308,64	19,15	242,69	151,751	113,374	135,289	0,2608	0,4637	0,3099
10	0,00278	256,16	24,58	251,78	140,373	121,933	137,860	0,3180	0,4175	0,2989
Оливин SEM1										
1	0,06623	227,92	104,55	31,33	135,781	129,198	134,261	0,3311	0,3537	0,3482
2	0,06195	185,10	58,54	25,55	146,889	134,777	118,019	0,2782	0,3255	0,4301
3	0,04199	133,52	45,51	90,70	133,815	131,912	134,288	0,3336	0,3678	0,3327
4	0,04783	230,03	58,45	43,26	120,773	143,07	135,682	0,4108	0,2891	0,3332
5	0,03692	297,84	140,30	135,80	143,164	117,670	138,652	0,2932	0,4373	0,3032
6	0,03885	1,98	54,75	158,45	150,403	130,189	119,280	0,2622	0,3511	0,4209
7	0,02976	137,55	44,67	156,03	122,730	144,067	132,638	0,4114	0,2824	0,3393
8	0,00635	143,28	34,45	233,24	148,154	119,356	132,317	0,2673	0,4316	0,3356
Оливин BQ4										
1	0,15254	27,27	32,43	111,13	140,458	129,226	130,972	0,3293	0,3631	0,3419
2	0,09221	332,80	45,36	153,17	134,677	137,335	127,388	0,3642	0,3007	0,3691
3	0,10488	36,34	63,79	108,94	142,960	129,691	128,315	0,2953	0,3589	0,3803
4	0,22925	117,43	68,71	206,56	131,550	125,106	143,323	0,3775	0,3577	0,2988
5	0,03846	195,95	97,08	194,89	155,130	131,740	114,870	0,2664	0,3095	0,4588

быстрым выносом породы и ее охлаждением. Для оливинов 9721 и BQ4 окончательное формирование текстуры происходило в результате длительных экструзивных процессов.

В основе методов анализа свойств поликристаллического материала лежит представление его в виде случайной микронеоднородной среды. В этом случае необходимо решать систему стохастических дифференциальных уравнений второго порядка. Решение этой системы дает информацию не только о свойствах поликристалла в целом (эффективные характеристики материала), но и о поведении его составных частей при внешнем воздействии (локальное напряженно-деформированное состояние). Существует большое количество методов анализа, однако для расчета эффективных упругих характеристик и моделирования напряженно-деформированного состояния образцов ксенолитов и дунитов при высоком гидростатическом давлении в настоящей работе использовалось обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей [1, 7], т.к. именно этот метод позволяет наиболее математически просто учесть кристаллографическую текстуру поликристалла. Более того, используя в этом методе вспомогательный параметр (свойства тела сравнения), можно получить основные известные приближения при вычислении эффективных свойств. Расчетной формулой данного метода для эффективных упругих характеристик является выражение

$$c^* = \langle c(\mathbf{r})(I - gc''(\mathbf{r}))^{-1}\rangle\langle(I - gc''(\mathbf{r}))^{-1}\rangle^{-1}. \quad (1)$$

Здесь индекс «*» указывает на эффективные характеристики поликристалла, угловые скобки обозначают усреднение по объему материала, двойным штрихом обозначена разность между параметрами неоднородной среды и соответствующими параметрами однородного тела сравнения, I — единичный симметричный тензор четвертого ранга, — тензор модулей упругости, g — сингулярная составляющая тензора Грина уравнения равновесия, $\mathbf{r}$ — радиус-вектор случайной точки среды. Соотношение (1) учитывает взаимодействия между зернами кристаллитов [7].

Вводя вспомогательный тензор четвертого ранга $b = c^c + g^{-1}$, где верхним индексом «c» обозначены параметры тела сравнения, соотношение (1) можно представить в более удобном для вычислений виде [1, 7]

$$c^* = \langle (c(\mathbf{r}) - b)^{-1}\rangle^{-1} + b. \quad (2)$$

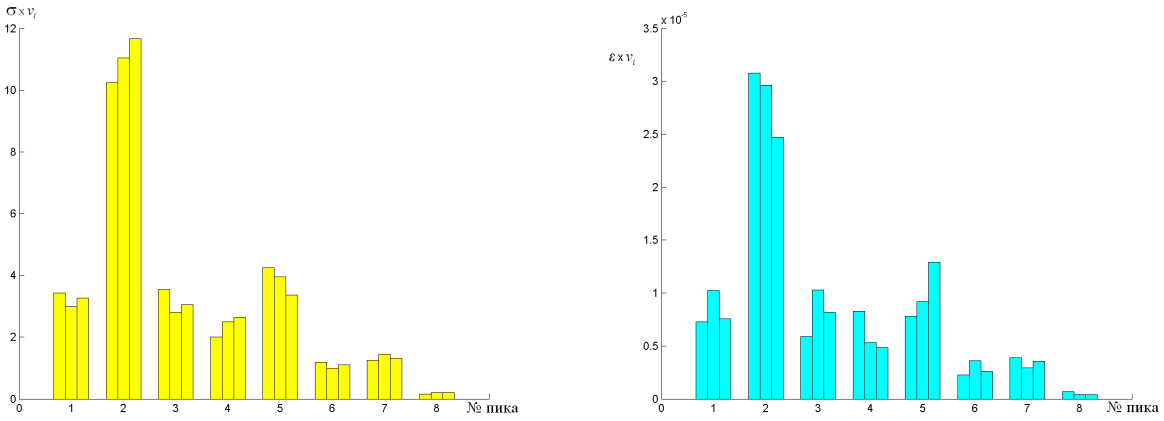
Поскольку, как указывалось выше, основное влияние на упругие характеристики исследуемых оливинов оказывает ориентационная текстура, процедура усреднения в соотношении (2) сводится к интегрированию по всевозможным эйлеровым углам $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$

$$(c^* - b)^{-1} = \frac{1}{8\pi^2}\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi} f_4(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)\times \times (c(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) - b)^{-1}\sin\Phi\, d\Phi\, d\varphi_1\, d\varphi_2. \quad (3)$$

Таким образом, зная ФРО $f_4(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$ и выбрав параметры тела сравнения, можно рассчитать эффективные упругие характеристики оливинитов по формуле (3).

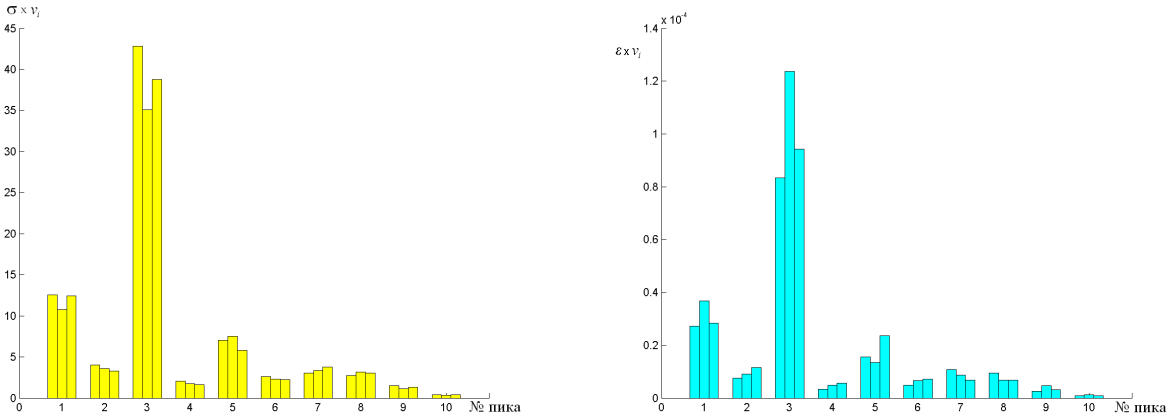
В [7] были вычислены эффективные упругие постоянные исследуемых материалов, рассчитанных в приближениях Фойгта, Ройсса, Хилла и методом самосогласования. Эти расчеты показали небольшие различия в макросвойствах образцов оливинов. Данное обстоятельство обусловлено тем, что структуры исследуемых образцов формировались в верхних слоях мантии Земли в схожих условиях. Однако это не относится к их локальному напряженно-деформированному состоянию.

Для микронеоднородных текстурированных материалов, к которым относятся поликристаллы, очень важной является характеристика распределения локальных значений напряжений и деформаций при приложении внешних нагрузок. Это соответствует установлению связи между приложенными к поликристаллическому образцу напряжениями или деформациями и их локальными значениями внутри кристаллитов или других элементов неоднородностей поликристалла. Рассмотрение поликристалла как случайно-неоднородной среды и анализ его механических свойств при помощи уравнений равновесия со случайными кусочно-неоднородными коэффициентами позволяет не только определить эффективные параметры текстурированного поликристалла, но и оценить значения локального напряженно-деформированного состояния. Это удобно



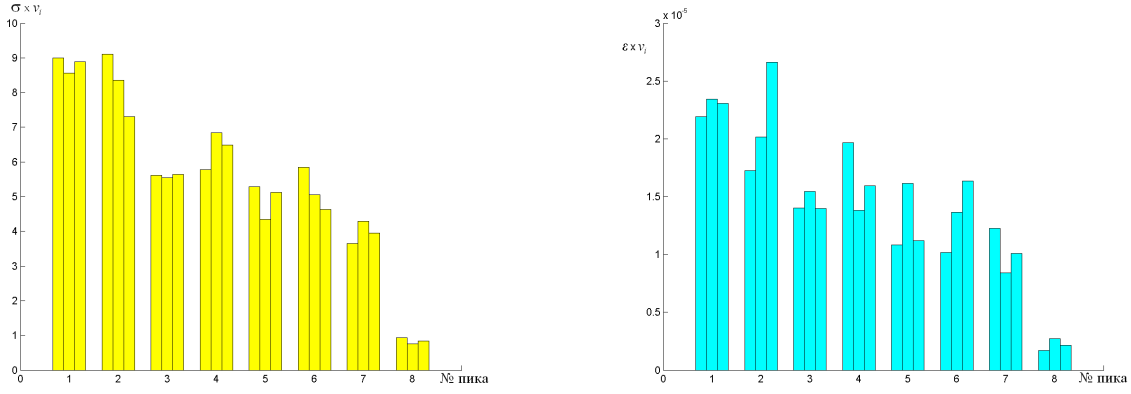
а) б)

Рис. 2. Образец оливина 9721: вклады индексированных направлений в значения диагональных компонент тензоров: а) локальных напряжений; б) локальных деформаций



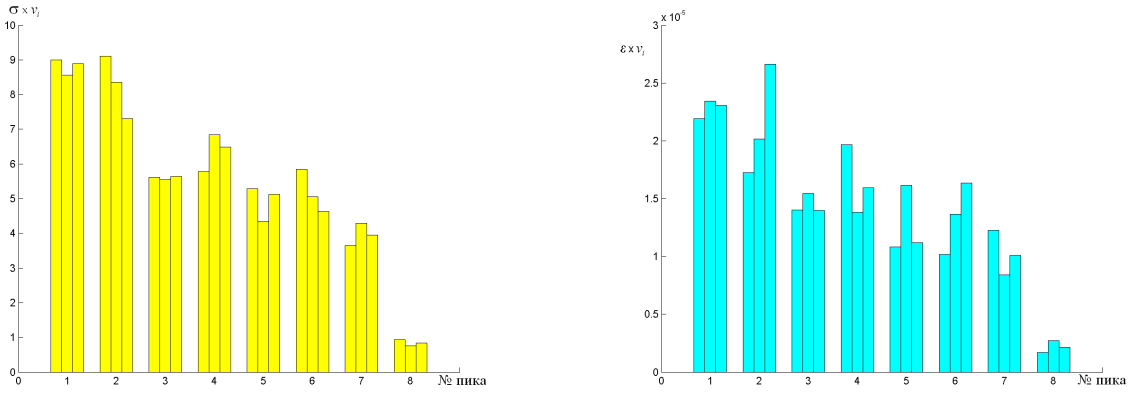
а) б)

Рис. 3. Образец оливина Zb1: вклады индексированных направлений в значения диагональных компонент тензоров: а) локальных напряжений; б) локальных деформаций



а) б)

Рис. 4. Образец оливина SEM1: вклады индексированных направлений в значения диагональных компонент тензоров: а) локальных напряжений; б) локальных деформаций



а) б)

Рис. 5. Образец оливина BQ4: вклады индексированных направлений в значения диагональных компонент тензоров: а) локальных напряжений; б) локальных деформаций

сделать при помощи операторов концентраций полей напряжений σ и деформаций ε, связывающих локальные значения с внешними,

$$\sigma(\mathbf{r}) = K^{\sigma}(\mathbf{r})\langle\sigma(\mathbf{r})\rangle, \quad \varepsilon(\mathbf{r}) = K^{\varepsilon}(\mathbf{r})\langle\varepsilon(\mathbf{r})\rangle.$$

Необходимо отметить, что в этом случае операторы концентраций зависят только от структуры и свойств среды, но не зависят от величин прикладываемого воздействия. Локальные значения тензора деформаций вычисляются, исходя из очевидного соотношения

$$\varepsilon(\mathbf{r}) = K^{\varepsilon}(\mathbf{r})s^{*}\langle\sigma(\mathbf{r})\rangle,$$

где $s^{*} = (c^{*})^{-1}$. Используя те же предположения, что и при расчете эффективных характеристик, можно получить следующие выражения для операторов концентраций полей напряжений и деформаций [4, 7]

$$K^{\sigma}(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r})(I - gc''(\mathbf{r}))^{-1}\langle c(\mathbf{r})(I - gc''(\mathbf{r}))^{-1}\rangle^{-1},$$

$$K^{\varepsilon}(\mathbf{r}) = (I - gc''(\mathbf{r}))^{-1}\langle(I - gc''(\mathbf{r}))^{-1}\rangle^{-1}.$$

В [7] были проведены вычисления операторов $K^{\sigma}(r)$ и $K^{\varepsilon}(r)$ для каждого из исследуемых материалов. Опираясь на них, можно оценить значения локальных напряжений и деформаций, возникающих при любом внешнем воздействии. Как показывают исследования [3, 5], основным видом внешнего воздействия на оливиносодержащие горные породы в период их формирования в литосфере Земли являлось высокое всестороннее давление. Поэтому в данной работе были проведены моделирование и расчет механических свойств образцов оливинов при гидростатическом давлении 400 МПа.

В табл. 2 приведены расчетные значения диагональных компонент тензоров внутренних напряжений и деформаций для кристаллитов, ориентированных в индексированных направлениях пиков интенсивности рефлексов. Однако значения локальных откликов, рассчитанные без учета концентрации v_i кристаллитов в направлении каждого из пиков, не дают полной картины внутреннего напряженно-деформированного состояния образцов оливинов. Чтобы оценить вклад каждого из индексированных направлений в это состояние, необходимо учесть объемную концентрацию кристаллитов данной ориентации. Наглядную информацию о вкладах каждого из указанных направлений можно получить по рис. 2–5. При этом левые столбцы в «пиковой тройке» соответствуют компоненте σ_{11} тензора внутренних напряжений и компоненте ε_{11} тензора внутренних деформаций, каждая из которых умножена на соответствующую концентрацию. Центральные столбцы соответствуют компонентам σ_{22} и ε_{22}, а правые столбцы — компонентам σ_{33} и ε_{33}, умноженным на эту же концентрацию.

Анализ табл. 2 и рис. 2–5, показывает, что для одной и той же ориентации кристаллитов диагональные компоненты тензоров локальных напряжений и деформаций различаются в пределах 5–15%, что может свидетельствовать о правильности исходного предположения о гидростатическом напряженно-деформированном состоянии, при котором

формировались исследуемые образцы. Более того, наличие выделенного пика на рис. 2–5, определяющего вклад локального поля кристаллитов в перераспределение напряжений (деформаций) позволяет говорить о формировании типичной текстуры кристаллизации [8]. Это можно отнести и к образцу SEM1, имеющему два выделенных пика. Однако в эйлеровом пространстве эти направления расположены близко друг к другу (табл. 2, рис. 1).

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Ориентации кристаллитов, определяющие кристаллографическую текстуру, для всех образцов лежат в определенной области эйлерова пространства (рис. 1), что позволяет говорить о схожести условий формирования структур этих образцов в литосфере Земли.

2. Для образцов оливинов Zb1 и SEM1 ориентации осей кристаллитов расположены в достаточно узком поясе эйлерова пространства, а для оливинов 9721 и BQ4 они имеют довольно сильный разброс по отношению к этому поясу. При этом наблюдается существенное различие в значениях коэффициентов $C_l^{\mu\nu}$ разложения ФРО в ряд по обобщенным шаровым функциям (табл. 1). Несмотря на это, эффективные свойства материалов различаются слабо [7]. По-видимому, это обусловлено тем, что формирование одинаковых макросвойств поликристаллов может идти термодинамически различающимися путями.

3. Различия в механических свойствах образцов проявляются только при анализе их локального напряженно-деформированного состояния. При этом учет объемных концентраций кристаллитов в направлениях, определяющих кристаллографическую текстуру, позволяет определить ее вклад в перераспределение приложенного напряжения.

4. Для всех образцов, кроме SEM1, характерно одно выделенное направление с максимальным вкладом, а для образца SEM1 таких направлений два (рис. 2–5), но в эйлеровом пространстве они расположены близко друг к другу. Данное обстоятельство обусловлено схожими условиями формирования образцов поликристаллов.

Литература

1. *Шермергор Т. Д.* Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
2. *Bunge H.-J.* Texture Analysis in Material Science. L.: Butterworth, 1982. 330 p.
3. *Соболев Г. А., Никитин А. Н.* Нейтронография в геофизике // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2001. Т. 32. Вып. 6. С. 1359–1404.
4. *Соболев Г. А., Никитин А. Н., Савелова Т. И., Яковлев В. Б.* Теоретико-экспериментальный подход к исследованию микро- и макросвойств и состояния горных пород (возможное направление развития моделей очага землетрясений) // Физика Земли. 2001. № 1. С. 6–15.
5. *Никитин А. Н., Иванкина Т. И., Бурилличев Д. Е., Клима К., Локаичек Т., Прос З.* Анизотропия и текстура оливиносодержащих мантийных пород при высоких давлениях // Физика Земли. 2001. № 1. С. 64–78.
6. *Вальтер К., Никитин А. Н., Шермергор Т. Д., Яковлев В. Б.* Определение эффективных электроупругих постоянных поликристаллических текстурированных горных пород // Изв. РАН. Физика Земли. 1993. № 6. С. 83–88.
7. *Бардушкин В. В., Никитин А. Н., Сычев А. П., Яковлев В. Б.* Локальная концентрация напряжений и деформаций в поликристаллических материалах естественного происхождения // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2004. № 1. С. 30–38.
8. *Васильев В. А., Митин Б. С., Яковлев В. Б. и др.* Высокоскоростное затвердевание расплава. (Теория, технология, материалы). М.: ИнтерметИнжиниринг, 1998. 395 с.

Статья поступила 10 апреля 2004 г.

Ростовский государственный университет путей сообщения, Московский институт электронной техники, Объединенный институт ядерных исследований

© Колесников В. И., Бардушкин В. В., Никитин А. Н., Сычев А. П., Яковлев В. Б., 2004