

Физико-механические свойства гранитоидов Кочкарского месторождения***В.В. Ефремов***

Московский физико-технический институт (Государственный университет)

Введение

Кочкарское золоторудное месторождение находится в Челябинской области. Его начали разрабатывать в 19 веке закрытым способом. Основные промышленные объекты на рудном поле находятся в его средней части и в пределах города Пласта.

История исследований Пластовской площади разделяют на три периода. Первый из них характеризуют маршрутные и кратковременные экспедиционные исследования XIX и начала XX века, связанные с именами И.В. Мушкетова, А.П. Карпинского, М.И. Мельникова, Н.К. Высоцкого и др. Большинство из этих работ посвящено самым общим вопросам геологического строения района, минералогии коренных и россыпных месторождений золота. Второй этап исследований начинается в 20-30-х годах XX века, когда на площади проводятся поисковые работы на золото, мышьяк, полиметаллы, редкие металлы, а на разобщенных планшетах - геологосъемочные работы. Исследования этого этапа были прерваны войной. С конца 50-х годов XX века на третьем этапе широким фронтом начинаются поисковые геологоразведочные и геофизические работы на рудное и россыпное золото, редкие и радиоактивные металлы, асбест, каолин, пьезокварц, железные и медные руды и другие полезные ископаемые. Поиски и оценка известных и открытых в ходе работ месторождений сочетаются с проведением на площади геологических съемок масштаба 1:50 000, тематическими научными работами, работами, обобщающими материалы поисковых и съемочных исследований.

Для разработки любого месторождения необходимо знать инженерно-геологические условия района. Поскольку разработка Кочкарского месторождения ведется с помощью подземных горных выработок, то особенно актуальной становится оценка физико-механических свойств вмещающих пород. Это необходимо для расчетов устойчивости горных выработок, а также прогнозирования опасных горно-геологических процессов, таких как горные удары, вывалы пород, стреляние и прочее. Особенно важно учитывать выработки, которые были пройдены близко к поверхности при строительстве домов, т.к. часть выработок находится под городом.

Геологические условия

Кочкарское месторождение принадлежит переходной зоне между предгорьями Южного Урала и равнинной областью Зауральского пенеппена.

Пластовская площадь охватывает структуры сочленения Магнитогорской и Восточноуральской мегазон. Естественной границей мегазон в западной части площади является Уйско-Новооренбургская зона смятия (УНЗ), в пределах которой тектонически скучены пластины разновозрастных и разно измененных пород. Примыкающая к УНЗ с востока Сухтелинская зона (СЗ) сложена вулканогенными, вулканогенно-осадочными и осадочными породами палеозоя, охватывающими возрастную диапозон от ордовика до карбона. Расположенная восточнее центральная подзона Кочкарско-Адамовской зоны (КАЗ) отделена от Сухтелинской зоны Муранкинской зоной смятия, подобной УНЗ, но меньшего масштаба. КАЗ является отрезком «Главного уральского гранитного пояса», в котором гнейсы и кристаллические сланцы вмещают разновозрастные гранитоидные массивы.

Методы исследования

Исследования микротрещиноватости и физико-механических свойств проводились на 8 образцах, представленных гранитами и гранодиоритами. Физические и физико-механические свойства определялись стандартными методами на образцах цилиндрической формы с отношением высоты к диаметру равным 2. Плотность твердой фазы определялась при помощи

прибора Калачёва – ПЭЛА. Деформационные свойства определялись двумя методами - динамическим и статическим. Динамический модуль упругости (E_d) и коэффициент Пуассона (μ_d) рассчитывались через скорости ультразвуковых волн по формулам:

$$\mu_d = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

$$E_d = \frac{V_p^2 \rho (1 + \mu_d)(1 - 2\mu_d)}{1 - \mu_d}$$

Где v_p, v_s — скорости распространения продольной и поперечной волн; E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона; ρ — плотность. Скорости продольных и поперечных волн определялись на приборе «Ультразвук» с частотой датчиков 250 кГц.

Определение деформационных характеристик при одноосном сжатии основано на измерении продольных и поперечных деформаций при непрерывном нагружении образца с постоянной скоростью. Испытания проводились на гидравлическом полуавтоматическом прессе Controls (с максимальным усилием 1500 кН) с измерительным модулем управления и контроля. Для регистрации деформаций использовалось 8-канальное измерительное устройство Datalog. Измерения деформаций в ходе эксперимента осуществлялись с помощью потенциометрических датчиков линейного перемещения WF 17006. Точность измерения деформации составляла 0,001 мм. Для регистрации продольной деформации использовался один датчик, поперечная регистрировалась двумя датчиками, далее для расчетов бралась средняя величина. Испытание заключалось в нагружении образца с постоянной скоростью (около 1 кН/с) до нагрузки, не превышавшей 50-60% от максимального разрушающего усилия. Далее производилась разгрузка. В процессе нагружения и разгрузки образца регистрировались абсолютные деформации (отсчет снимался каждую секунду). По результатам испытаний были построены деформационные кривые в координатах «напряжение — относительная деформация». По ветви нагрузки рассчитывались общий модуль деформации и коэффициент поперечного расширения, по ветви разгрузки — модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Петрографическая характеристика пород

В результате петрографических исследований выяснено, что вмещающие породы месторождения в основном представлены гранитами, среди которых выделяются плагиограниты и биотитовые разновидности. Так же два образца представлены табашками.

Биотитовый гранит по структуре полнокристаллический, микрозернистый с крупными вкрапленниками, трещиноватый. Порода полиминеральная, состоит из К-полевого шпата (5%) с размером зёрен 0.3-0.5 мм, плагиоклаза (25%) 0.5-1.0 мм, кварца (10%) 0.1-2.5 мм, биотита (25%) 0.2-3.7 мм, роговой обманки (5%) 0.25-1.0 мм, клинопироксена (10%) 0,025-0,1, ортопироксена (20%) 0,025-0,1. Отмечается пелитизация по КППШ, серицитизация по плагиоклазу.

Плагиогранит по структуре полнокристаллический, микрозернистый с крупными вкрапленниками, трещиноватый. Порода полиминеральная, состоит из К-полевого шпата (25%) с размером зёрен 0.3-0.5 мм, плагиоклаза (25%) 0.25-0.5 мм, кварца (5%) 0.1-2.5 мм, ортопироксена (10%) 0.05-0.1 мм, клинопироксена (5%) 0.05-0.1 мм, роговой обманки (10%) 0.05-0.15 мм. Отмечается пелитизация по КППШ, серицитизация по плагиоклазу.

Табашка. Выделяется по большому содержанию биотита. Порода полнокристаллическая, микрозернистая. Порода полиминеральная, состоит из К-полевого шпата (10%) с размером зёрен 0.03-0.15 мм, плагиоклаза (15%) 0.03-0.15 мм, кварца (15%) 0.01-0.05 мм, клинопироксена (15%) 0.05-0.1 мм, роговой обманки (15%) 0.05-0.15 мм, биотита (30%) 0.5-1.0 мм. Отмечается пелитизация по КППШ, серицитизация по плагиоклазу.

Физическая и физико-механические свойства пород

Значения физических и физико-механических свойств пород Кочкарского месторождения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физические и физико-механические свойства исследуемых грунтов

№ образца, Порода		$\rho_{\text{возд-сух}}$, г/см ³	ρ_s , г/см ³	n, %	$\mu_{\text{дин}}$, д.е.	$\mu_{\text{стат}}$, д.е.	$\nu_{\text{стат}}$, д.е.	$E_{\text{дин}}$, ГПа	E_y , ГПа	E_o , ГПа	R_c , МПа	R_p , МПа
Биотитовый гранит	1	2.80	2.84	1.5	0.16	0.24	0.25	46.7	15.0	13.4	60.2	6.7
Плагиогранит	2	2.79	2.93	4.7	0.24	0.30	0.25	52.2	29.7	24.5	103.0	10.4
	4	2.69	2.79	3.6	0.28	0.49	0.46	71.9	27.2	26.3	169.3	14.2
	5	2.66	2.72	2.0	0.24	0.34	0.33	61.3	25.0	24.9	74.1	11.9
	6	2.64	2.78	5.2	0.33	-	-	57.1	-	-	110.9	7.1
	7	2.60	2.72	4.3	0.32	-	-	44.0	-	-	123.4	10.0
Табашка	3	2.85	2.89	1.3	0.25	0.39	0.38	69.7	22.0	21.5	21.5	13.2
	9	2.70	2.77	2.7	0.27	0.27	0.22	45.3	9.6	8.0	137.8	6.9

Большинство образцов плагиогранитов (обр. №1,2,4,5) имеют близкую плотность, меняющуюся в интервале 2,69-2,80 г/см³, и пористость 1,3-4,7%. Поскольку эти образцы близки по плотности, то можно предположить, что основным фактором, влияющим на прочностные и деформационные свойства, будет микрорешчатость.

Два образца (№ 6 и 7), соответствующие плагиогранитам, отличаются более низкой плотностью 2,60-2,63 г/см³ и более высокой пористостью 4.3-5.3%, они отличаются высоким содержанием кварца относительно других образцов

Два образца табашки, одна просто табашка (обр. №3), а другая табашка с кварцем (обр. №9) имеют плотность 2,85 и 2,77 г/см³ соответственно и близкую пористость 1,3 и 2,7%.

Плотность твердой фазы меняется довольно сильно 2,72-2,93 г/см³, что объясняется минеральным составом. Так, в минеральном составе плагиогранита (обр. №2) с максимальной плотностью (2,93 г/см³) содержится большое количество темноцветных минералов - пироксенов 15% и роговой обманки 10%. У плагиогранита с минимальной плотностью 2,72 г/см³ (обр. №5) пироксенов 5%, а роговой обманки нет, т.е. меньше тяжелых минералов.

Таблица 2. Скорости продольных и поперечных волн.

№ образца, Порода		v_p , км/с	v_s , км/с
Биотитовый гранит	1	4.2	2.7
Плагиогранит	2	4.7	2.7
	4	5.8	3.2
	5	5.2	3.0
	6	5.8	2.9
	7	4.9	2.5
Табашка	3	5.5	2.9
	9	4.7	2.5

Как видно из таблицы 2 скорости продольных волн для всех образцов изменяются от 4,2 до 5,8 км/с. Для плагиогранитов 4,7-5,8 км/с, для биотитового гранита 4,2 км/с и для табашки 4,7-5,5 км/с. Зависимость от типа породы не прослеживается, что подтверждает результаты из статьи Ефремова В.В. и Фроловой Ю.В. [1], т.е. динамические свойства больше зависят от пустотности породы, чем от минералогического состава.

Скорости поперечных волн для образцов очень близки и меняются в пределах от 2,5 до 3,2 км/с, как и со скоростями продольных волн четкой зависимости от типа породы не прослеживается.

В результате испытаний на одноосное сжатие было выявлено, что прочность на одноосное сжатие изменяется от 21,5 до 169,3 МПа. Для плагиогранитов характерна довольно близкая прочность от 74,1 до 169,3 МПа, у биотитового гранита прочность ниже - 60,2 МПа. Прочность табашки меняется в широком интервале от 21,5 до 137,8 МПа. Большое различие прочности для табашки объясняется тем, что в одном из образцов большое содержание кварца.

Таким образом, из значительного различия прочности можно сделать вывод, что при проходке горных выработок в породах с низкой прочностью будет происходить стрельяние и горные удары, а в породах с высокой прочностью этого не будет. Если производить бурение перед проходкой, то можно предсказать участки, где необходимо ставить крепь.

Отношение прочности на одноосное сжатие к прочности на разрыв у разных видов пород разное. Так для гранитов прочность на одноосное сжатие примерно в 10 раз больше прочности на разрыв, а для табашек прочность на одноосное сжатие превышает в 20 раз прочность на разрыв, за исключением, когда прочность на одноосное сжатие низкая.

В результате испытаний на одноосное сжатие было выявлено два типа разрушения. Первый - разрушение со взрывом на дресву и мелкую щебенку, а второй - с образованием верхнего, либо нижнего конуса. Граниты, как правило, разрушаются с образованием конуса, а табашки со взрывом.

Модуль Юнга для образцов имеет довольно большой разброс от 9,6 до $29,7 \cdot 10^3$ МПа. Для плагиогранитов он примерно одинаков и самый высокий относительно других пород $25,0 - 29,7 \cdot 10^3$ МПа. Для биотитового гранита составляет $15,0 \cdot 10^3$ МПа, а для табашки меняется сильно от 9,6 (обр. 3) до $22,0 \cdot 10^3$ МПа (обр. 9). В тоже время у образца 3 меньше пористость и больше плотность относительно образца 9, и по теоретическим идеям у образца 3 модуль упругости должен быть выше, но в образце 9 есть крупные жилы кварца и благодаря этому его упругие свойства выше.

Для модуля общей деформации тенденция такая же, как и для модуля Юнга. Разброс значений довольно большой от 8,0 до 26,3 ГПа. Для плагиигранитов максимум попадает на образец 4 ($26,3 * 10^3 \text{ МПа}$) при том, что модуль Юнга для него $27,2 * 10^3 \text{ МПа}$. Для образца 2 модуль общей деформации составляет $24,5 * 10^3 \text{ МПа}$, в то время, как модуль Юнга $29,7 * 10^3 \text{ МПа}$. Это можно объяснить тем, что у образца 2 больше пористость, чем у образца 4.

Деформационные кривые, полученные при статическом нагружении, у разных образцов имеют свои особенности. Выделяются два типа кривых. Первый тип характеризуется существенным расхождением кривой нагрузки и разгрузки (обр. №№ 1, 2, 3, 9 рис. 6). Например, для образца 1 (биотитовый гранит) модуль упругой деформации $15 * 10^3 \text{ МПа}$, а общей деформации $13,4 * 10^3 \text{ МПа}$. Для образца 2 (плагиигранит) модуль упругой деформации $29,7 * 10^3 \text{ МПа}$, а общий модуль деформации $24,5 * 10^3 \text{ МПа}$.

У второго типа линия нагрузки и разгрузки практически совпадают (обр. №№ 4, 5 рис. 7), что свидетельствует о преобладании упругих деформаций. Для образца 4 модуль упругой деформации $27,2 * 10^3 \text{ МПа}$, а общей деформации $26,3 * 10^3 \text{ МПа}$. Для образца 5 модуль упругой деформации $25 * 10^3 \text{ МПа}$, а общий модуль деформации $24,9 * 10^3 \text{ МПа}$.

Таким образом, получается, что первый тип деформации характерен для биотитового гранита и табашек, а второй для плагиигранитов. Это можно объяснить тем, что биотит имеет низкую прочность на сдвиг, а так как в табашке и биотитовом граните много биотита, то из-за этого возрастает неупругая деформация.

Полученные зависимости относительной деформации от напряжения не являются линейными. Как правило, на деформационной кривой в области продольных деформаций можно выделить два или три участка. Например, при деформировании образца 4 выделяются три участка [2]. На первом участке (до 10 МПа) видимо происходит закрытие микротрещин, на втором участке происходит упругая деформация скелета породы, которая продолжается до 20-25 МПа, на третьем участке, по-видимому, начинается образование новых микротрещин. На кривой деформации образца 5 видно два участка. На первом участке (до 30 МПа) происходит смыкание трещин, а уже на втором участке происходит упругая деформация породы.

Однако Э.Г. Газиев [2] считает, что разрушение образца (т.е. рост трещин) начинается сразу же при начале нагружения. Это доказывается при одновременном проведении испытания на одноосное сжатие и регистрации акустических волн в образце.

Заключение

Исследование гранитоидов Кочкарского месторождения, расположенного на Южном Урале позволило сделать следующие выводы.

1. В результате петрографических исследований выяснено, что вмещающие породы месторождения в основном представлены гранитами, среди которых выделяются плагииграниты и биотитовые разновидности. Так же два образца представлены табашками.

2. Большинство образцов плагиигранитов имеют близкую плотность, меняющуюся в интервале $2,60-2,79 \text{ г/см}^3$, и пористость 2,0-5,2%. Образец биотитового гранита имеет плотность $2,80 \text{ г/см}^3$ и пористость 1,5%, а образцы табашки $2,77-2,89 \text{ г/см}^3$ и пористость 1,3-2,7%. Прочность на одноосное сжатие для гранитов меняется от 60,2 до 169,3 МПа, а для табашек от 21,5 до 137,8 МПа. Прочность на разрыв для гранитов меняется от 6,7 до 14,2 МПа, а для табашек от 6,9 до 13,2 МПа. Отношение прочности на одноосное сжатие к прочности на разрыв для гранитов примерно 10, а для табашек 2. Выявлен различный характер разрушения. Граниты разрушаются с образованием верхнего или нижнего конуса, а табашки «со взрывом» на дресву и мелкий щебень. Модуль упругости для гранитов от 15,0 до 29,7 ГПа, а для табашек от 9,6 до 22,0 ГПа. Таким образом граниты более упруги, чем табашки.

3. Выделено два типа деформационных кривых, полученных при статическом нагружении и разгрузке образцов. Первый тип характеризуется существенным расхождением кривой нагрузки и разгрузки и наблюдается у пород с повышенным содержанием биотита – табашек и биотитовых

гранитов, а Во втором типе – ветви практически совпадают, то есть при деформировании породы преобладают упругие деформации. Второй тип характерен для большинства плагиогранитов.

4. Выяснено, что динамический модуль упругости примерно в три раза больше статического модуля упругости.

5. В результате анализа прочностных и упругих свойств, а также трещиноватости можно сделать заключение, что граниты благоприятны для прохождения горных выработок, т.к. они упруги, слаботрещиноваты и имеют высокую прочность на сжатие и на разрыв. Табашки, напротив, не благоприятны для ведения горных работ. Они имеют низкий модуль упругости и низкие значения прочности, что может способствовать проявлению горных ударов, вывалов, стреляния, и из-за этого необходимо ставить крепь.

Литература

1. *Ефремов В.В., Фролова Ю.В.* Влияние микротрещиноватости на прочностные и деформационные свойства образцов гранитоидов Алданского щита// Инженерная геология. 2016. №1. С.16-25.
2. *Газиев Э.Г.* Скальные основания бетонных плотин. М.: Издательство ассоциации строительных вузов. 2005. 280 с.