



Научная статья
УДК 620.17

Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения

А.П.ГОСПОДАРИКОВ¹, А.В.ТРОФИМОВ², А.П.КИРКИН¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Господариков А.П., Трофимов А.В., Киркин А.П. Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 539-548. DOI: 10.31897/PMI.2022.87

Аннотация. Одним из самых надежных методов оценки физико-механических свойств горных пород в результате их разрушения являются лабораторные испытания с применением жестких или сервоприводных испытательных прессов. Они позволяют получить достоверную информацию об изменении этих свойств за пределом прочности на сжатие. Представлены результаты проведенных лабораторных испытаний образцов богатой сульфидной руды, позволившие получить графики их запредельного деформирования. Испытаны как монолитные образцы, так и образцы с концентраторами напряжений в виде отверстий круглого сечения диаметром 3, 5 и 10 мм. Выявлено, что в процессе разрушения образцов модуль упругости и деформации уменьшаются в 1,5-2 раза, а в зоне остаточной прочности – в 5-7 раз.

Ключевые слова: физико-механические свойства; лабораторные испытания; запредельное деформирование; сервогидравлические испытательные прессы; поперечные деформации; модуль упругости; модуль деформации

Поступила: 20.06.2022

Принята: 07.10.2022

Онлайн: 03.11.2022

Опубликована: 03.11.2022

Введение. С увеличением производительности отработки месторождений, разрабатываемых подземным способом, для поддержания темпов добычи необходимо вскрывать новые горизонты, которые часто находятся глубже существующих. С увеличением глубины разработки повышаются риски в осложнении геотехнической обстановки [1-3], которые могут проявляться в виде повышенного горного давления, в том числе и в динамической форме [4-6]. Так, например, глубина разработки рудников Талнаха на некоторых участках достигает более 1000 м при критической глубине удароопасности в 700 м [7-9]. Соответственно, при таких больших глубинах и высоких значениях напряжений для массива горных пород характерно разрушение краевой части. Оно проявляется потенциально в хрупкой форме с высвобождением упругой энергии в виде горного удара. Особенно опасными становятся целики, поскольку они принимают на себя повышенную нагрузку от вышележащей толщи пород. В этом случае применяются противоударные мероприятия, цель которых сформировать локальную зону податливости наведением трещиноватости взрывным способом [10-12] или постепенным разрушением пород, вызванным бурением строчки разгрузочных скважин [13, 14]. Однако оценить изменение физико-механических свойств горных пород в образующихся зонах податливости достаточно трудно. Стандартные лабораторные испытания в рамках ГОСТов направлены на исследование свойств только монолитных горных пород, а оценка нарушенности массива рейтинговыми системами делает в большей степени акцент на природную трещиноватость [15-17]. Один из способов оценки изменения модуля упругости – определение скорости распространения продольных волн до/после разрушения массива [18, 19]. Но решение такой задачи может быть осложнено невозможностью распространения упругой волны сквозь разрушенные участки массива.



При широком развитии компьютерных технологий распространено применение математического моделирования на основе эффективных численных методов конечных или дискретных элементов [20-22]. Реализованные в них упруго-пластические модели позволяют получить информацию (с некоторыми допущениями) о состоянии массива (целиков) и перераспределении в нем напряжений в результате разрушения последнего. Однако для построения адекватных геомеханических моделей необходимы достоверные данные о свойствах материала. Так, для идеально упруго-пластических моделей необходимо знать следующие параметры: сцепление и угол внутреннего трения (или пределы прочности при растяжении и сжатии), модуль упругости, коэффициент Пуассона. Для геомеханических моделей с остаточной прочностью необходимо иметь представление об остаточной прочности горных пород. Так, например, при использовании программы RS2 (Rocscience) при разработке упруго-пластической модели с учетом критерия Кулона – Мора с остаточной прочностью необходимы данные паспорта остаточной прочности горных пород [23, 24]. Часто используемый критерий прочности Хука – Брауна дополнительно требует данные картирования выработок для оценки нарушенности массива [25-27]. Следовательно, необходимые исходные данные можно получить только в результате проведения лабораторных испытаний и полевых исследований.

Оценить процесс разрушения горных пород возможно только при моделировании нагружения, приближенного к реальным условиям. С этой целью можно провести пробоподготовку образцов кубической или цилиндрической формы, испытать в условиях одноосного сжатия в соответствии с ГОСТ 21153.2 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии». Но в таком случае накопленная прессом упругая энергия высвобождается, что приводит к разрушению образца с разлетом его кусков. Чтобы избежать этого, необходимо проводить испытания на жестких или сервоприводных прессах. В таком случае появляется возможность получить полное представление о разрушении образцов с определением значений деформаций за пределом прочности горной породы. Методические основы подобных испытаний представлены в работах [28-30]. Представленные методики нашли свое применение для оценки удароопасности горных пород [31-33]. Такие типы испытаний являются очень сложными в реализации, требуют современного технологического оборудования.

Особенностью проведения испытаний на сервоприводных прессах также является контроль скорости роста значений поперечных деформаций, а, следовательно, получение «петель» спада и нагружения при выравнивании скорости деформирования образца. Однако данный вид испытаний является трудоемким и затратным по времени. Так, в работе [30] указано, что при достижении 70 % от предела прочности необходим контроль нагружения по значениям поперечных деформаций, а скорость нагружения прессом должна обеспечивать их скорость роста не более, чем 0,0001 мм/мм/с. Относительно простой в реализации подход к оценке остаточной прочности представлен в работе [34], подходящий больше для оценки массива бортов карьеров, чем для условий подземной разработки. В данной работе приведены результаты испытаний на запредельное деформирование богатых сульфидных руд Норильского промышленного района для определения изменения деформационных характеристик в процессе разрушения. Отсутствие значительной трещиноватости в рудном массиве (рис.1) в совокупности с высокой жесткостью и высоким показателем коэффициента хрупкости (отношение предела прочности на сжатие к пределу прочности на растяжение),



Рис.1. Керна богатой сульфидной руды на контакте с габбро-долеритами

1 – механическое повреждение керна; 2 – естественные трещины



колеблющимся в пределах 9-12 при невысоких значениях предела прочности на сжатие в образе делают данный тип руды удароопасной.

Методология. Для испытаний были подготовлены образцы из керна богатой сульфидной руды, диаметр которых составил 45 ± 1 мм, соотношение высоты образца к диаметру 2:1. Образцы взвешивались, и на них проводились неразрушающие испытания (определение скоростей распространения продольных и поперечных волн и деформационных характеристик). Деформационные характеристики определялись с помощью ГОСТ 28985 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии» на прессе H100KU, с применением LVDT-датчиков точностью 0,5 мкм для оценки изменения базы измерений при нагружении/разгрузке образца.

В некоторых образцах создавались концентраторы напряжений в виде отверстий в центре продольного сечения образца. Рассматривались образцы: стандартные цилиндрические (без отверстий); с отверстием Ø3; 5; 10 мм; с двумя отверстиями Ø5 мм. Дополнительно были изготовлены образцы с двумя отверстиями Ø5 мм и поперечной трещиной, имитирующей зону разгрузки, проходящей через данные отверстия. Расстояние между отверстиями было принято в размере трех их диаметров. После рассверловки образцы с отверстиями повторно испытывались на определение деформационных характеристик (модули Юнга и деформации).

Для образцов с одиночным отверстием Ø3 и 5 мм результаты повторных испытаний не имели значительных расхождений с первоначальными испытаниями, что объясняется различной базой измерения и установкой датчиков в разных точках. Были приняты первоначальные данные. Результаты неразрушающего контроля образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства горных пород до испытаний

Диаметр, мм	Высота, мм	Модуль деформации, МПа	Модуль упругости, МПа	Модуль деформации (отверстия), МПа	Модуль упругости (отверстия), МПа	Коэффициент поперечной деформации	Коэффициент Пуассона	Отверстие
44,62	90,65	48400	56700	48400	56700	0,148	0,143	Без отверстий
44,54	87,67	65300	68600	65300	68600	0,218	0,187	
44,63	87,99	60500	64000	60500	64000	0,249	0,246	
44,58	91,92	40300	45300	40300	45300	0,198	0,158	
44,80	89,26	38500	44400	38500	44400	0,127	0,117	
44,96	89,53	34100	37700	34100	37700	0,186	0,140	
44,94	89,80	52200	52300	52200	52300	0,201	0,201	
44,47	89,12	59200	61300	59200	61300	0,202	0,202	Одно отверстие Ø3 мм
44,63	86,48	31900	36700	31900	36700	0,151	0,151	
44,62	89,12	66100	72100	66100	72100	0,203	0,194	
44,34	90,68	64100	64800	64100	64800	0,229	0,221	
44,25	88,79	30300	36000	30300	36000	0,154	0,166	
44,74	89,55	66700	71200	66700	71200	0,224	0,219	
44,61	87,53	58400	62700	58400	62700	0,205	0,201	Одно отверстие Ø5 мм
44,67	89,72	79000	80800	79000	80800	0,155	0,140	
44,58	87,45	65000	66600	61000	62500	0,206	0,192	Одно отверстие Ø10 мм
44,74	88,58	81900	82200	78000	78300	0,201	0,198	
44,66	88,88	50800	54100	42700	45500	0,122	0,119	
44,95	90,5	43600	49300	36600	41400	0,149	0,172	
44,75	89,17	50100	58000	42200	47500	0,173	0,170	
44,64	88,27	63400	74800	59400	69500	0,185	0,177	
44,61	87,71	48600	52200	44200	47500	0,172	0,172	Два отверстия Ø5 мм
44,69	87,99	76300	76900	63100	63600	0,203	0,194	
44,65	88,71	40900	44100	24900	32800	0,141	0,148	
44,94	91,24	53900	59200	49700	54300	0,200	0,206	
44,54	89,70	72900	76000	61100	67400	0,151	0,138	
44,62	88,76	57300	65000	45900	52700	0,171	0,136	
44,65	89,35	56200	64300	32200	43600	0,118	0,102	Два отверстия Ø5 мм + поперечная трещина
45,00	89,18	38100	45000	32100	38300	0,14	0,136	
44,92	89,81	37300	40800	31800	31400	0,172	0,172	
44,93	90,2	39400	46600	32900	40100	0,176	0,178	
44,77	89,55	44600	56900	35800	43100	0,171	0,181	
44,71	86,65	31000*	37400*	10200	—	—	—	

* Первоначальные деформационные характеристики образца определены с учетом поперечной трещины, полученной в результате пробоподготовки.

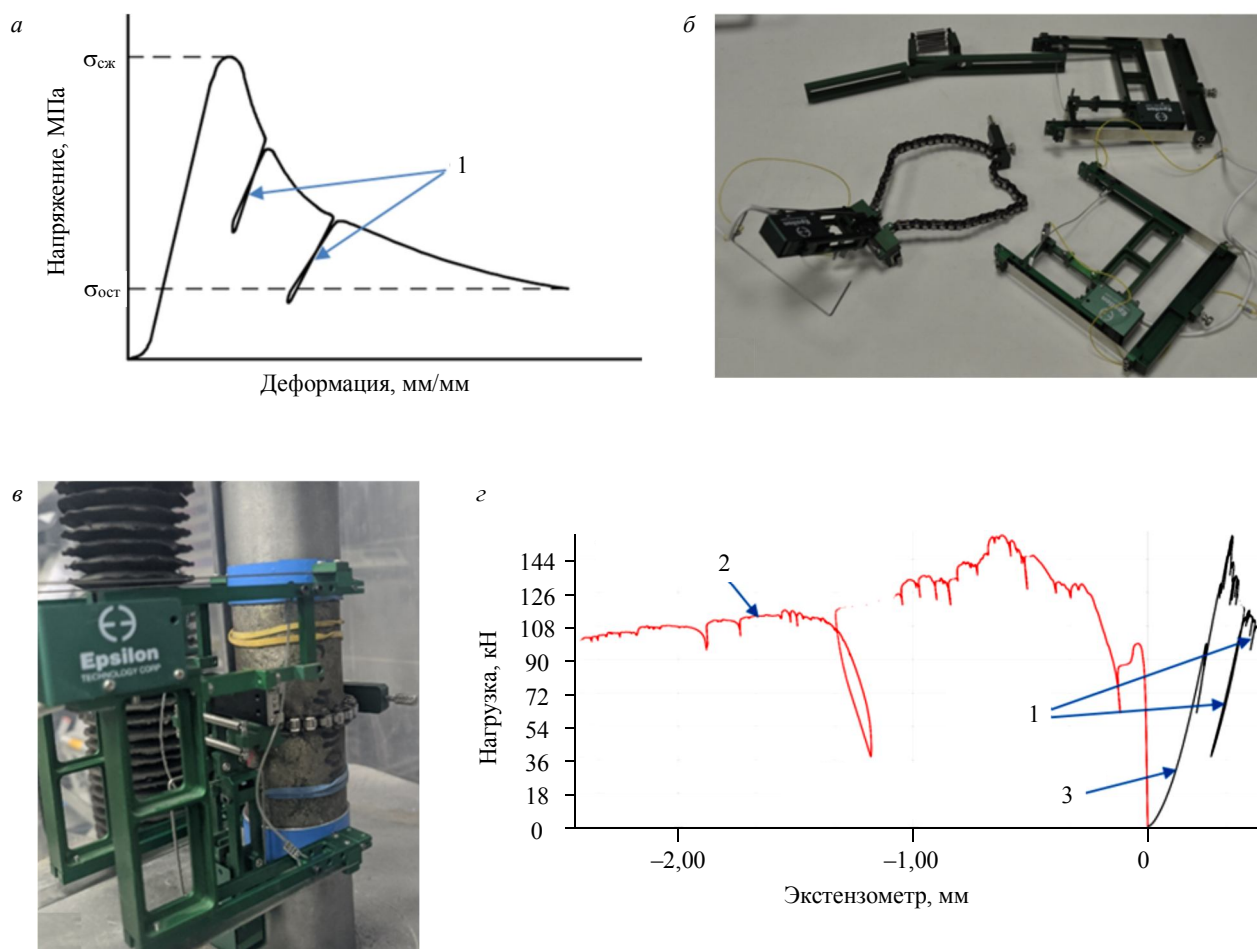


Рис.2. Проведение испытаний: а – график «напряжение – деформация» с «петлями» разгрузки и нагружения; б – экстензометры продольных и поперечных деформаций Epsilon; в – установка для испытаний; г – график нагружения с «петлями», сформированный ПО «Horizont»
1 – «петли»; 2 – перемещения радиального экстензометра; 3 – перемещения продольного экстензометра

Методической основой для определения модуля упругости разупрочненного образца послужил раздел VI «Оценка удароопасности по хрупкости пород с помощью запредельного деформирования» Методических рекомендаций по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам. Для испытаний использовался испытательный сервоуправляемый пресс ТО Super L60 с максимальной нагрузкой 300 кН. Сервопривод позволяет испытательной машине выравнять нагрузку в соответствии с постоянной скоростью деформирования, что является аналогом режима нагружения на жестких испытательных прессах. Особенностью нагружения с помощью сервопривода является построение характерных «петель» резкого спада и нагружения для выравнивания скорости деформирования при плавном разрушении образца (рис.2, а).

Для получения четкой кривой спада (запредельное деформирование) контроль поддержания заданной скорости деформирования велся по поперечным деформациям, позволяющим на ранней стадии зафиксировать рост трещин и увеличение поперечного сечения вследствие дилатансии и предотвратить разрушение образца упругой энергией. Деформации измерялись специализированными для испытания горных пород экстензометрами тензометрического типа: поперечных – Epsilon 3544-100M-060M-HT2, продольных – Epsilon 3542RA2-100M-600M-HT2 (рис.2, б).

База измерения продольных датчиков постоянна и равнялась 100 мм. Продольная деформация контролировалась по стальным пуансонам, между которыми был установлен образец (рис.2, в). При разрушении образца отдельные части, сформированные при образовании новых поверхностей, испытывают перемещения в непрогнозируемых направлениях и могут перемещаться относительно

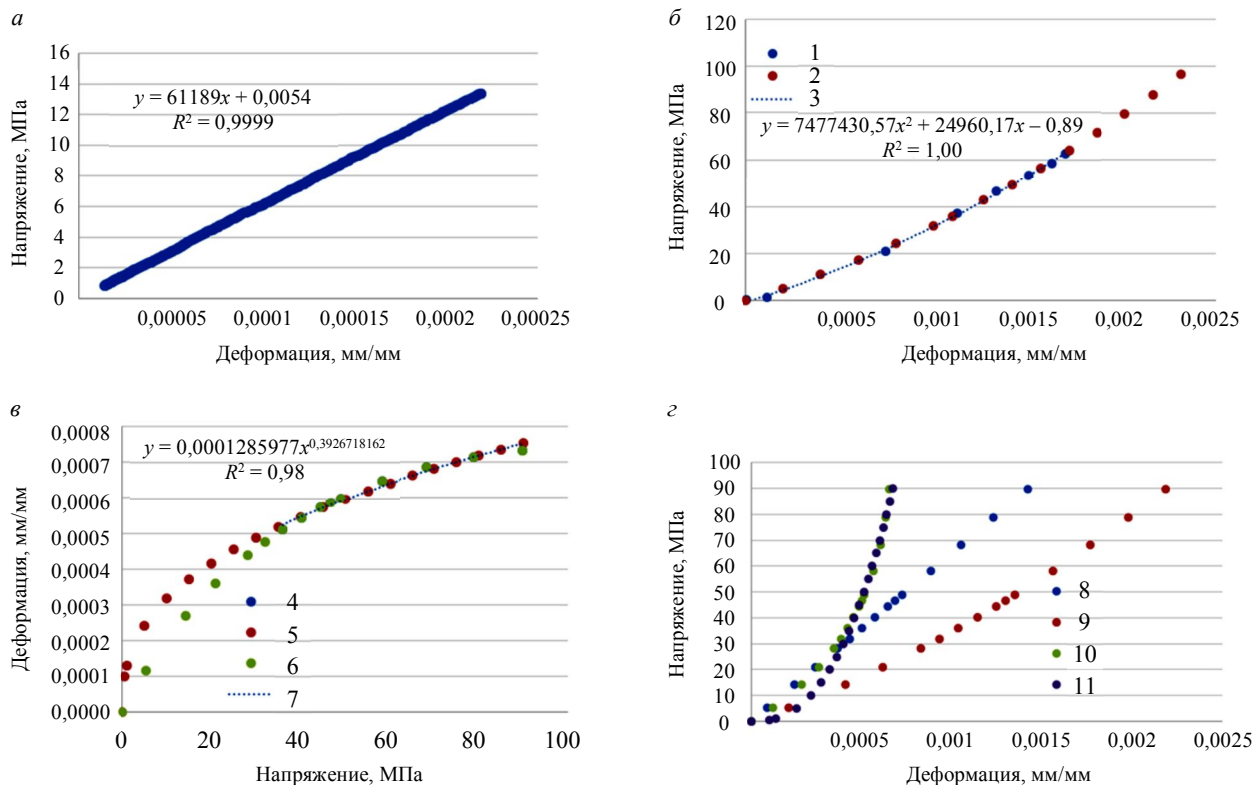


Рис.3. Определение калибровочной функции: а – первоначальное испытание (LVDT) по кривой нагружения; б – испытание на запредельное деформирование (упругий участок); в – нахождение аппроксимационной зависимости; г – сопоставление приведенных экспериментальных данных и полученной аппроксимации

1 – кривая нагружения (Epsilon); 2 – кривая нагружения (аппроксимация); 3 – полиномиальная кривая нагружения (Epsilon); 4 – экспериментальная кривая (30-90 МПа); 5 – аппроксимация; 6 – экспериментальная кривая (0-90 МПа); 7 – степенная экспериментальная кривая (30-90 МПа); 8 – деформации (LVDT); 9 – деформации (Epsilon); 10 – разность деформаций (экспериментальная кривая); 11 – разность деформаций (аппроксимация)

друг друга, не отражая при этом общего направления деформирования. Результирующим видом разрушения является сжимающая деформация. Для ее надежной регистрации необходимо устанавливать продольный экстензометр на нагрузочные плиты (пуансоны). Такой подход уменьшает искажение результатов измерения при разрушении образца, так как исключает потерю контакта экстензометра с поверхностью. При этом регистрируются дополнительные деформации, возникающие на контакте торцевой поверхности образца и пуансона. При интерпретации результатов измерений этот эффект необходимо учитывать, особенно на участке упругих деформаций, где перемещения относительно малы.

Создание испытательной методики и управление процессом происходило через оболочку специализированного ПО «Horizon» (рис.2, г), поставляемого вместе с прессами TO Super L60. Первый этап испытаний: сжатие образца при постоянной скорости изменения поперечных деформаций (изменения длины окружности образца) 0,02-0,04 мм/мин. Расчет скорости изменения значений поперечных деформаций проводился пересчетом со скорости нагружения образца в 0,1 мм/мин. Данная скорость нагружения характерна при испытаниях удароопасных горных пород [35, 36].

После значительного разрушения образца и недостижения остаточной прочности проводился второй (третий при необходимости) этап испытаний с увеличенной в 2-3 раза скоростью нагружения, так как в данном случае хрупкое разрушение уже невозможно, и увеличение скорости нагружения только сокращает время проведения испытаний.

Для анализа полученных результатов использовались значения продольных перемещений. Модули упругости и деформации определялись на участках деформирования за пределом прочности в моменты, когда сервопривод пресса выравнивал скорость деформирования образца и образовывал на графике «петли» резкого спада и нагружения.

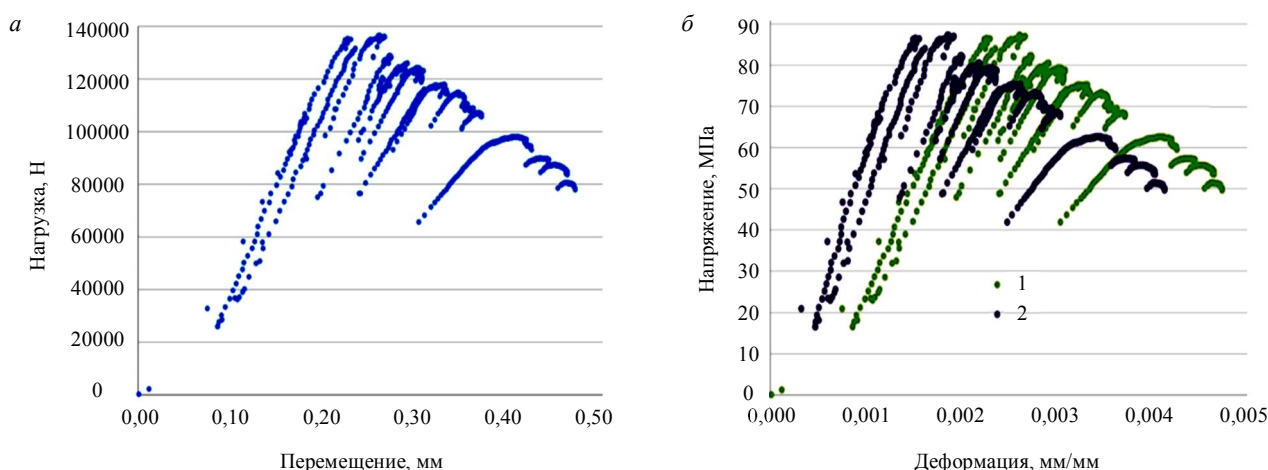


Рис. 4. Графики испытаний: а – исходный (нагрузка – перемещения); б – напряжения – деформации до/после калибровки
1 – исходный график; 2 – калибровка

Калибровка графиков испытаний. Поскольку с помощью продольных экстензометров измерялись перемещения между нагружающими пуансонами, то могли исказиться результаты ввиду фиксации дополнительных деформаций на торцах образцов, что привело к занижению значений модулей упругости и деформации. Причем разница в значениях логично возрастала с увеличением жесткости образца.

Для отсека лишней деформации проведена калибровка графиков по зоне упругости (рис.3). В калибровку заложено допущение, что отклонение $\Delta\epsilon$ является функцией $f(P)$, где P – нагрузка на образец, МПа.

Для выявления этой зависимости определены аппроксимирующие функции ветвей нагрузки при первоначальном определении деформационных характеристик (в случае образцов с отверстиями определение деформационных характеристик после рассверловки) с помощью LVDT-датчиков (деформации (LVDT) и в зоне упругости при испытании на предельное деформирование (деформации (Epsilon)). Выявлены значения деформаций по аппроксимированным кривым при одинаковых значениях напряжений, вычислены значения $\Delta\epsilon$, что является разницей между деформациями Epsilon и LVDT, построены графики «напряжение – деформация». Наибольшая сходимость достигалась при аппроксимации степенной функцией.

Калибровка графика полного деформирования проведена индивидуально для каждого образца в необходимом интервале напряжений, поэтому степенная аппроксимация графика «напряжение – деформация» (рис.3, б) в каждом случае уникальна. Пересчет деформаций проведен по формуле

$$\epsilon_{\text{калибр}} = \epsilon_{\text{Eps}} - \Delta\epsilon(P), \quad (1)$$

где ϵ_{Eps} – деформации (Epsilon), мм/мм; $\Delta\epsilon(P)$ – степенная функция типа $\Delta\epsilon = AP^B$, мм/мм; P – напряжение в образце, вызванное нагрузкой пресса, МПа; A и B – эмпирические коэффициенты. Пример обработки графика испытаний одного из образцов представлен на рис.4.

После калибровки графиков оценивались модули упругости и деформации. В случаях, когда образец испытывался в несколько этапов, при наличии «петель» разгрузки и нагрузки на полке остаточной прочности, модули упругости и деформации определялись именно на этих участках.

Обсуждение результатов. Результаты определения значений модулей упругости и деформации после калибровки представлены в табл.2. Однако по некоторым образцам не удалось выявить «петли» разгрузки и нагрузки.



Таблица 2

Физико-механические свойства образцов после испытаний

Отверстия	Модуль деформации (с отверстиями) Ед, МПа	Модуль упругости (с отверстиями) Еу ₁ , МПа	Модуль деформации (с отверстиями) Epsilon Ед ₂ , МПа	Модуль деформации (с отверстиями) калиброванный Ед ₃ , МПа	Модуль деформации при разупрочнении Ед ₄ , МПа	Модуль упругости при разупрочнении Еу ₄ , МПа	Ед/Ед ₄	Еу/Еу ₄	Предел прочности на одностороннее сжатие, МПа	Остаточная прочность, МПа
Нет	48400	56700	25200	46000	7109	11219	6,81	5,05	42,83	3,2
Нет	65300	68600	33800	65100	17264	27047	3,78	2,54	63,24	–
Нет	60500	64000	45800	65300	30397	46038	1,99	1,39	87,27	–
Нет	40300	45300	31700	37200	–	–	–	–	70,88	–
Нет	38500	44400	33700	38600	33598	38393	1,15	1,16	71,96	3,4
Нет	34100	37700	32000	35900	25136	25760	1,36	1,46	66,08	1,96
Нет	52200	52300	47400	54800	8388	12402	6,22	4,22	95,54	5,4
Одно (3 мм)	59200	61300	33400	47200	10349	11569	5,72	5,3	49,81	2,5
Одно (3 мм)	31900	36700	22300	33100	9173	8220	3,48	4,46	53,96	3,2
Одно (3 мм)	66100	72100	26400	63900	36444	21045	1,81	3,43	49,88	3,89
Одно (3 мм)	64100	64800	37500	62900	48613	53710	1,32	1,21	47,83	2,3
Одно (3 мм)	30300	36000	28200	30200	7984	7965	3,8	4,52	53,21	3,7
Одно (3 мм)	66700	71200	42833	58800	–	–	–	–	87,23	–
Одно (5 мм)	58400	62700	31800	52900	–	–	–	–	63,26	1,0
Одно (5 мм)	79000	80800	46100	76500	–	–	–	–	100,08	–
Одно (10 мм)	42200	47500	34600	37100	–	–	–	–	64,32	1,5
Одно (10 мм)	59400	69500	30100	52000	–	–	–	–	71,20	1,0
Одно (10 мм)	61000	62500	25100	58600	–	–	–	–	39,07	1,65
Одно (10 мм)	78000	78300	39100	74200	29259	24976	2,67	3,14	74,05	2,0
Одно (10 мм)	42700	45500	18600	43800	–	–	–	–	33,62	2,5
Одно (10 мм)	36600	41400	26400	34200	18617	32614	1,97	1,27	58,60	2,2
Два (5 мм)	44200	47500	24200	43700	15414	–	2,87	–	42,33	4,1
Два (5 мм)	63100	63600	43000	61800	25453	17735	2,48	3,59	65,17	5,4
Два (5 мм)	24900	32800	17800	21200	14547	12621	1,71	2,6	32,03	11,2
Два (5 мм)	49700	54300	36400	45200	42257	41618	1,18	1,3	98,95	2,2
Два (5 мм)	61100	67400	52500	61900	39301	39167	1,55	1,72	104,28	1,34
Два (5 мм)	45900	52700	34900	45500	25176	24965	1,82	2,11	77,03	–
Два (5 мм) + трещина	32200	43600	27200	32200	20250	–	1,59	–	52,65	4,4
Два (5 мм) + трещина	32100	38300	28400	32600	15908	15182	2,02	2,52	56,86	3,1
Два (5 мм) + трещина	31800	31400	31200	32000	–	–	–	–	54,27	–
Два (5 мм) + трещина	32900	40100	30700	33000	2572	5324	12,8	7,53	47,01	5,0
Два (5 мм) + трещина	35800	43100	30000	37400	5875	–	6,09	–	38,72	6,9
Два (5 мм) + трещина	10200	–	–	–	–	–	–	–	25,10	–

Из табл.2 следует, что у образцов модули упругости и деформации, определенные до предела остаточной прочности, уменьшаются в 1,2-2 раза по сравнению с исходными характеристиками, а при оценке «петель» на «полках» остаточной прочности наблюдается уменьшение модулей в 5-7 раз. Образцы с двумя отверстиями и поперечной трещиной часто при испытаниях доводились до полки остаточной прочности. Однако количество «петель» меньше из-за равномерного развития пластических деформаций ввиду наличия трещины, что не позволило в полной мере оценить их деформационные характеристики в процессе разрушения.

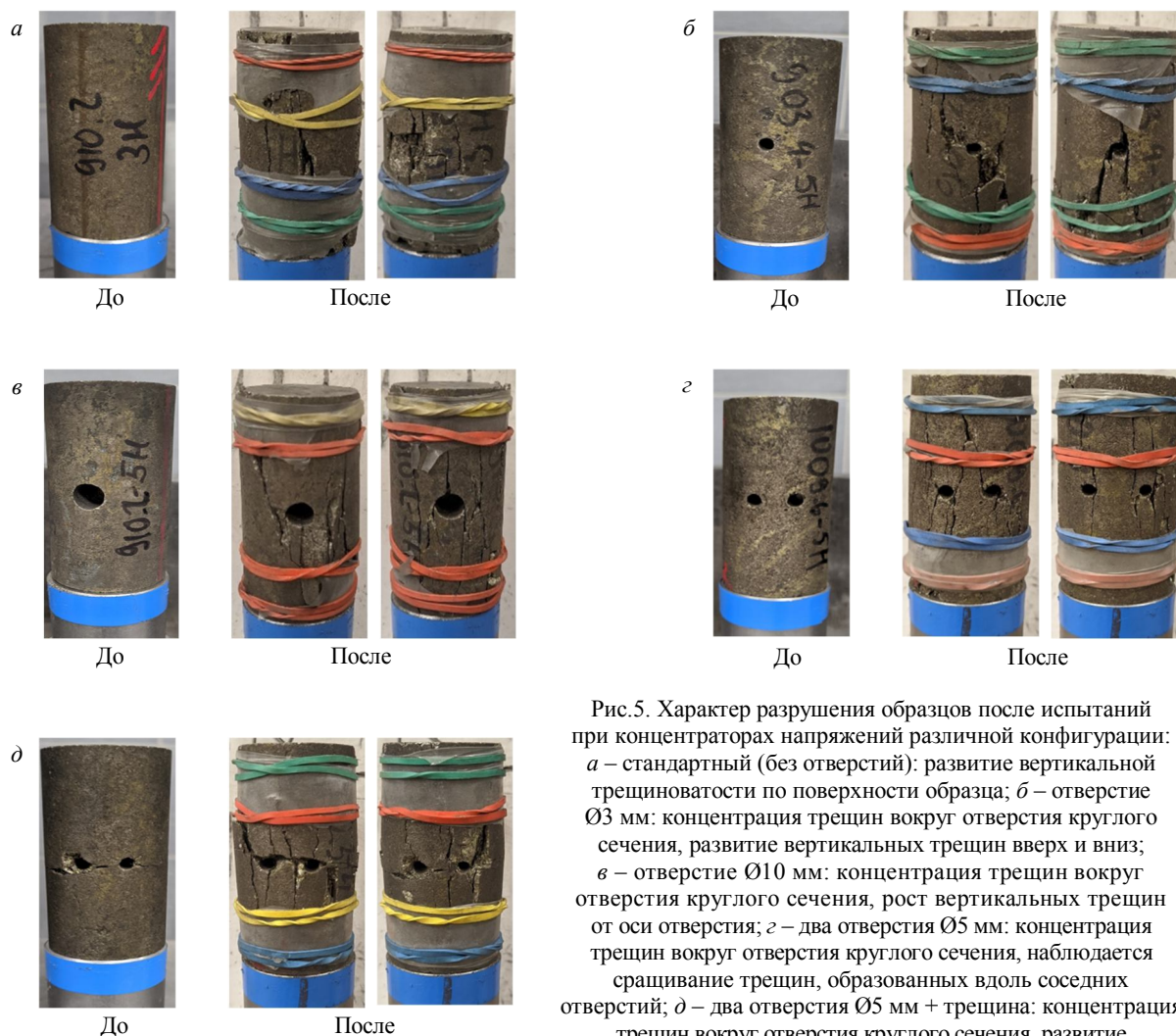


Рис.5. Характер разрушения образцов после испытаний при концентраторах напряжений различной конфигурации: а – стандартный (без отверстий): развитие вертикальной трещиноватости по поверхности образца; б – отверстие $\varnothing 3$ мм: концентрация трещин вокруг отверстия круглого сечения, развитие вертикальных трещин вверх и вниз; в – отверстие $\varnothing 10$ мм: концентрация трещин вокруг отверстия круглого сечения, рост вертикальных трещин от оси отверстия; г – два отверстия $\varnothing 5$ мм: концентрация трещин вокруг отверстия круглого сечения, наблюдается сращивание трещин, образованных вдоль соседних отверстий; д – два отверстия $\varnothing 5$ мм + трещина: концентрация трещин вокруг отверстия круглого сечения, развитие вертикального трещинообразования в «щелике» между отверстиями

Независимо от влияния отверстия на характер спада нагружений, наличие отверстий позволило сохранить разрушенный образец в более устойчивом состоянии, чем образцы без отверстий. Так, из семи монолитных образцов форму после разрушения держали только три образца, тогда как все образцы с отверстиями сохранили форму. Возможно, это связано с тем, что в монолитных образцах разрушение равномерно распределялось по всему образцу, тогда как в образцах с отверстиями именно отверстия концентрировали на себе большую часть разрушения (рис.5).

Заключение. Несмотря на широкий спектр возможностей, для оценки разрушения горной породы под нагрузкой лучшим способом является проведение лабораторных испытаний с последующим построением графиков запредельных деформаций. Запредельные испытания на сервогидравлических испытательных прессах с контролем скорости роста значений поперечных деформаций, благодаря построению «петель» разгрузки и нагружения, позволяют оценить модули упругости и деформации за пределом прочности образца. Проведенные испытания на примере образцов богатой сульфидной руды показали, что в процессе разрушения модули упругости и деформации уменьшаются примерно в 1,5-2 раза, а в зоне остаточной прочности в 5-7 раз.

Концентраторы напряжений (отверстия $\varnothing 3$ и 5 мм) незначительно повлияли на изменение прочностных свойств и почти не сказались на изменении изначального значения модуля упругости и деформации. Однако отверстий таких размеров было достаточно, чтобы изменить характер разрушения образцов – трещины развивались вблизи отверстий. В случае испытаний образцов без отверстий трещинообразование происходило по поверхности практически равномерно. Наличие таких концентраторов напряжений, как два отверстия $\varnothing 5$ мм совместно с поперечной трещиной,



имитирующей участок разгрузки, позволяют ввиду заметного снижения прочности провести испытания с большей вероятностью достижения полки остаточной прочности образца. Однако они значительно уменьшают количество «петель» разгрузки и нагружения, позволяющих достаточно точно оценить модули упругости и деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А. и др. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 61-70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2
2. Hongpu Kang, Pengfei Jiang, Yongzheng Wu, Fuqiang Gao. A combined «ground support-rock modification-destressing» strategy for 1000-m deep roadways in extreme squeezing ground condition // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 142. № 104746. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104746
3. Jian Zhou, Chao Chen, Kun Du et al. A new hybrid model of information entropy and unascertained measurement with different membership functions for evaluating distressability in burst-prone underground mines // Engineering with Computers. 2020. Vol. 38. P. 381-399. DOI: 10.1007/s00366-020-01151-3
4. Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Усиков В.И., Потапчук М.И. Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении // Горный журнал. 2016. № 12. С. 23-25. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.03
5. Тюпин В.Н. Оценка критической глубины месторождений по условию удароопасности // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 167-171. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.167
6. Сидоров Д.В., Потапчук М.И., Сидляр А.В., Курсакин Г.А. Оценка удароопасности при освоении глубоких горизонтов Николаевского месторождения // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 392-398. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.392
7. Плешко М.С., Давыдов А.А., Сильченко Ю.А., Каледин О.С. Эффективные решения по креплению сверхглубокого ствола СКС-1 рудника «Скалистый» в сложных геомеханических условиях // Горный журнал. 2020. № 6. С. 57-62. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.08
8. Сергунин М.П., Алборов А.Э., Андреев А.А., Буслова М.А. Оценка напряжений впереди фронта очистных работ при увеличении ширины зоны разгрузки в условиях Октябрьского и Талнахского месторождений // Горный журнал. 2020. № 6. С. 38-41. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.06
9. Баландин В.В., Леонов В.Л., Куранов А.Д., Багаутдинов И.И. Опыт применения обобщенного критерия Хука – Брауна к определению типов и параметров крепей в условиях Октябрьского месторождения медно-никелевых руд // Горный журнал. 2019. № 11. С. 14-18. DOI: 10.17580/gzh.2019.11.01
10. Konicek P., Schreiber. Rockburst prevention via distress blasting of competent roof rocks in hard coal longwall mining // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. P. 235-242. DOI: 10.1759/2411-9717/2018/v118n3a6
11. Vennes I., Mitri H., Chinnasane D.R., Yao M. Effect of Stress Anisotropy on the Efficiency of Large-Scale Distress Blasting // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021. Vol. 54. P. 31-46. DOI: 10.1007/s00603-020-02252-7
12. Saadatmand Hashemi A., Katsabanis P. Tunnel face preconditioning using distress blast-ingblasting in deep underground excavations // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 117. № 104126. DOI: 10.106/j.tust.2021.104126
13. Карпов Г.Н., Ковальский Е.Р., Смычник А.Д. Определение параметров разгрузки массива горных пород на концевых участках демонтажной камеры // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 8. С. 95-107. DOI: 10.25018/0236-14932019-08-0-95-107
14. Сидляр А.В., Потапчук М.И., Терешкин А.А. Геомеханическое обоснование мер безопасности при разработке Николаевского полиметаллического месторождения, опасного по горным ударам // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 7. С. 184-194. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-184-194
15. Hoek E., Brown E.T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 445-463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001
16. Winn K. Multi-approach Geological Strength Index (GSI) Determination for Stratified Sedimentary Rock Masses in Singapore // Geotechnical and Geological Engineering. 2020. Vol. 38. P. 2351-2358. DOI: 10.1007/s10706-019-01149-9
17. Hoek E., Diederichs M.S. Empirical estimation of rock mass modulus // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2006. Vol. 43. Iss. 2. P. 203-215. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.06.005
18. Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Ченур М.Д. Использование нагрева для повышения чувствительности ультразвукового метода контроля напряжений в породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11. С. 159-168. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-11-0-159
19. Раджаоалисон Х., Злотковский А., Рамболамана Ж. Определение механических свойств песчаника неразрушающим методом // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 113-117. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.113
20. Протосеня А.Г., Иовлев Г.А. Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в призабойной зоне тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5. С. 128-139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-128-139
21. Protosenya A.G., Verbilo P.E. Analysis of the jointed rock mass mechanical characteristics anisotropy under conditions of apatite-nepheline mineral deposits // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Proceedings of the XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers under the auspices of UNESCO, 13-17 May 2019, St. Petersburg, Russia. Saint Petersburg Mining University, 2019. P. 187-197.
22. Аушев Е.В., Череповский А.А., Лысенко М.В. и др. Геомеханическая оценка горнотехнической ситуации при формировании демонтажной камеры и производстве демонтажных работ // Уголь. 2019. № 11 (1124). С. 20-26. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-20-26



23. Peiqi Xi, Yuming Huo, Defu Zhu et al. Development and application of triangulation joint network based on an FEM program (RS2) // Journal of Geophysics and Engineering. 2022. Vol. 19. Iss. 2. P. 245-254. DOI: 10.1093/jge/gxac013
24. Dang V.K., Do N.A., Dinh V.D. Estimating the radial displacement on the tunnel boundary by rock mass classification systems // International Journal of GEOMATE. 2022. Vol. 22. № 9. P. 9-15. DOI: 10.21660/2022.92.19
25. Zareifard M.R. A new semi-numerical method for elastoplastic analysis of a circular tunnel excavated in a Hoek – Brown strain-softening rock mass considering the blast-induced damaged zone // Computers and Geotechnics. 2020. Vol. 122. № 103476. DOI: 0.1016/j.compgeo.2020.103476
26. Jinwang Li, Caihua Shen, Xiufeng He et al. Numerical solution for circular tunnel excavated in strain-softening rock masses considering damaged zone // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. № 4465. DOI: 10.1038/s41598-022-08531-3
27. Bertuzzi R. Revisiting rock classification to estimate rock mass properties // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 494-510. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.011
28. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб: Наука, 2001. 342 с.
29. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра, 1992. 224 с.
30. Eberhardt E. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006 // Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics. 2009. 628 p.
31. Козырев А.А., Кузнецов Н.Н., Федотова Ю.В., Шоков А.Н. Определение степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний при одноосном сжатии // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 41-50. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-41-50
32. Айнбиндер И.И., Овчаренко О.В. Исследования потенциальной удароопасности массива горных пород на проектируемых глубинах отработки месторождения «Валунистое» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6. С. 35-45. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_35
33. Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А. Геомеханическая модель. Часть 2. Использование // Горный журнал. 2020. № 2. С. 35-44. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.04
34. Павлович А.А., Кориунов В.А., Бажуков А.А., Мельников Н.Я. Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 502-509. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.502
35. Zavacky M., Stefanak J. Strains of rock during uniaxial compression test // The Civil Engineering Journal. 2019. Vol. 3. № 32. P. 398-403.
36. Tao Qin, Hongru Sun, Heng Liu et al. Experimental Study on Mechanical and Acoustic Emission Characteristics of Rock Samples under Different Stress Paths // Shock and Vibration. 2018. Vol. 2018. № 4813724. DOI: 10.1155/2018/4813724

Авторы: А.П.Господариков, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0003-1018-6841> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.В.Трофимов, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0001-7557-9801> (ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия), А.П.Киркин, аспирант, s195056@stud.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4830-8042> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.