

PACS: 62.20.M-, 62.20.F-

Г.П. Стариков<sup>1</sup>, Т.Н. Мельник<sup>2</sup>, Д.А. Нескреба<sup>1</sup>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

<sup>1</sup>Институт физики горных процессов, Донецк

<sup>2</sup>Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 23 октября 2020 года

*Представлены результаты экспериментов по одноосному сжатию порошков, полученных при разрушении объемных образцов горной породы (глинистого сланца). Выполнен анализ процессов, происходящих при одноосном сжатии фракций диспергированных материалов, характеризующихся разным размером частиц. Результаты предложены в качестве обоснования экспериментального метода определения прочностных характеристик диспергированных материалов, в частности горных пород.*

**Ключевые слова:** прочность, одноосное сжатие, естественные горные породы, разрушение

### Введение

Одной из важнейших характеристик любого твердого тела является прочность, или способность материала сопротивляться разрушению, а также необратимому изменению формы под действием внешних нагрузок. Ввиду особой важности определения и прогнозирования изменения прочности конструкционных материалов в настоящее время имеется большое число методов установления физических параметров, характеризующих прочность материала в конкретных условиях эксплуатации объекта.

Разрушающие методы состоят в выявлении предельных несущих способностей в ходе испытания контрольных образцов до их полного разрушения. Эти методы являются наиболее точными, и результаты, полученные в процессе их применения, максимально приближены к реальным физическим характеристикам материалов. К сожалению, далеко не всегда методы данной группы возможно применить на практике. Неразрушающий контроль построен на косвенном определении свойств и характеристик материалов.

Однако указанные методы основаны на исследовании свойств макроскопического сплошного объекта. В то же время диспергированные материалы (к примеру, порошковые) также могут стать источником информации о прочности.

При определении прочности горных пород наиболее доступными и производительными методами являются испытания на одноосное сжатие или растяжение при различных конфигурациях измерительных установок. Со-

гласно действующим ГОСТам (ГОСТ 24941-81, ГОСТ 21153.5-88, ГОСТ 21153.8-88, ГОСТ 21153.2-84, ГОСТ 21153.3-85 и т.д.) для лабораторных исследований необходима тщательная обработка и подготовка серии идентичных образцов, что может быть в некоторых случаях затруднительным ввиду сложности выполнения регламентированных требований к их размерам и форме из-за хрупкости изучаемой породы.

Заслуживает внимания и тот факт, что горные породы по своей сути являются существенно неоднородными объектами как по своей структуре, так и по химическому составу, причем размер неоднородностей вполне может быть сравним с размером исследуемых образцов [1]. Таким образом, образцы, изготовленные из материала, взятого на некотором ограниченном участке породного пласта, могут не отражать целостной картины распределения механических характеристик по его толщине или протяженности.

Кроме того, изготовление образцов предписанной формы с поверхностью, обработанной надлежащим образом, для хрупких материалов с развитой поровой или трещиноватой структурой (каковыми является большое число естественных горных пород) может быть весьма трудоемким процессом, требующим значительного времени на выполнение подготовительных действий.

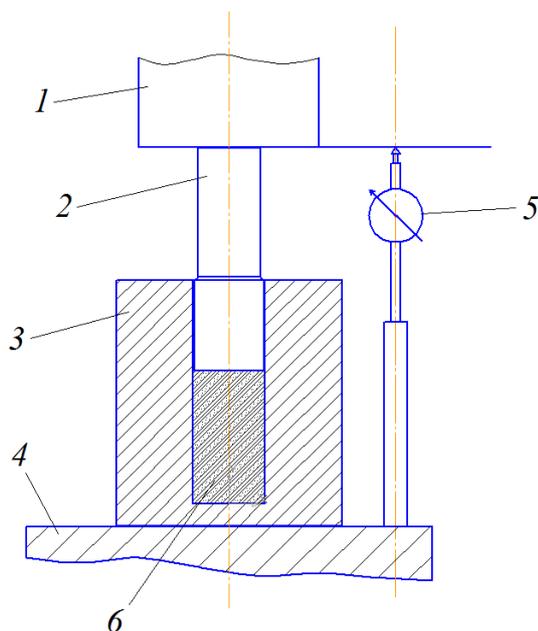
Поэтому представляется целесообразным разработка метода определения прочности образцов диспергированных горных пород, т.е. анализ прочности измельченных образцов, разделенных на фракции с различающимися размерами частиц. В данном случае имеется возможность значительно сократить длительность подготовительного этапа измерений и избежать искажений их результатов вследствие локальных отклонений в структурном и химическом составе породы.

### Эксперимент и обработка данных

Суть экспериментов, положенных в основу экспресс-метода определения прочности, состоит в следующем. Вначале проводится отбор образцов, изготавливается кубический образец с гранями размером 55 mm. В данной работе отбирались образцы песчано-глинистого сланца (нарушенной породы), взятые на шахте им. А.А. Скочинского.

Подготовленный образец устанавливали на пресс с регистрирующей аппаратурой (записываются давление и смещение поршня) и нагрузку увеличивали вплоть до полного разрушения образца (рис. 1). Измерение прочности требовалось в дальнейшем лишь для того, чтобы можно было ориентироваться, в каком диапазоне нагрузок происходит разрушение.

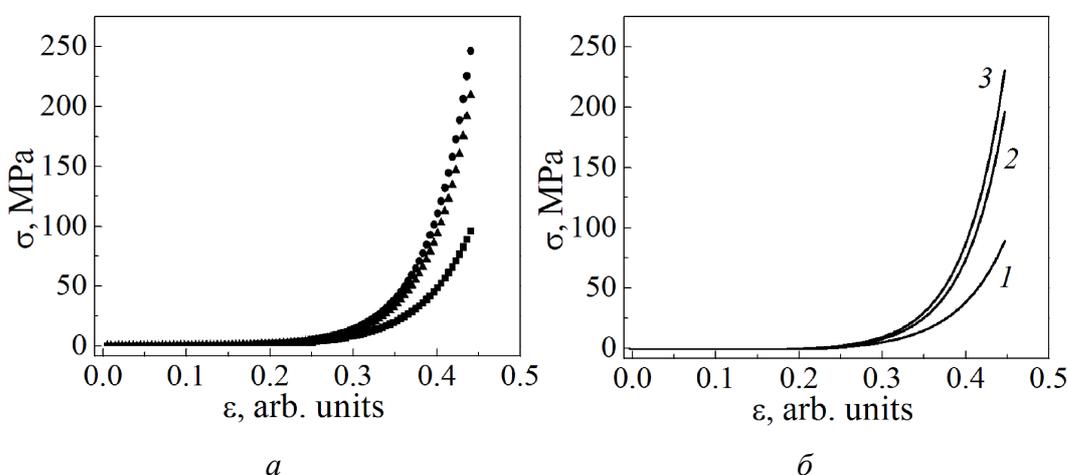
Из диспергированной породы, образовавшейся после разрушения образца, отбирали фракции разных размеров. Следует отметить, что и само распределение частиц по размеру уже является характеристикой прочности [2], в частности особое значение имеет минимальный достижимый размер частиц, напрямую связанный с коэффициентом вязкости разрушения и твердостью материала.



**Рис. 1.** Схема установки одноосного сжатия, используемой в эксперименте по определению прочности: 1 – шток прессы, 2 – шток камеры, 3 – камера, 4 – установочная плита, 5 – индикатор часового типа, 6 – образец

В данной работе были отобраны три фракции с диаметром гранул 0.4–0.5; 2–2.5 и 5 mm с навеской по 35 g. Фракции поочередно засыпали в контейнер высокого давления, который устанавливали на тот же пресс с регистрирующей аппаратурой.

Результаты измерений позволили построить графики нагрузка–относительная деформация для каждой из фракций (рис. 2). Из графиков видно, что имеются существенные различия между кривыми нагрузки для фракций раз-



**Рис. 2.** Соотношение усилия нагрузки и относительной деформации для фракций разного размера: *a* – экспериментальные данные для фракций размером, mm: 0.4–0.5 (■), 2–2.5 (▲), 5 (●); *б* – экспоненциальная аппроксимация

ного размера. Несмотря на то, что численные характеристики кривых разнятся от образца к образцу (что вполне естественно), имеются закономерности, общие для всех наборов экспериментальных данных. Экспериментальные кривые хорошо аппроксимируются экспоненциальными зависимостями вида  $\sigma(\epsilon) = \sigma_0 + A \exp(R_0 \epsilon)$ . Данные о параметрах аппроксимации представлены в таблице.

Таблица

**Параметры аппроксимации экспериментальных кривых усилие–деформация**

Фракция образца, mm	$\sigma_0$ , МПа		$A$ , МПа		$R_0$	
	значение	стандартная ошибка	значение	стандартная ошибка	значение	стандартная ошибка
0.4–0.5	-0.2235	–	0.05367	–	16.65599	–
2–2.5	-0.0957	–	0.03427	–	19.74227	–
5	0.12901	$10^{-15}$	0.02903	$10^{-17}$	19.74945	$10^{-15}$

Как видно из рис. 2, на начальном этапе нагружения наблюдается резкое уменьшение объема измельченной породы. Очевидно, что данный этап соответствует первоначальному уплотнению породы и вытеснению пустот. Кривые нагружения практически совпадают для обеих фракций. Далее начинается механическое воздействие на собственно гранулы. Здесь наблюдается различие между кривыми нагружения: в случае фракции с меньшим размером гранул для достижения одной и той же степени деформации требуется приложить большее усилие.

### Анализ и обсуждение результатов

Толчок к активной работе по теоретическому анализу проблемы сжатия диспергированных материалов был дан еще в 60-х гг. XX в. в связи с развитием и широким применением методов порошковой металлургии. Именно в это время создаются основы дискретно-контактной теории прессования порошков [3,4], которая ввиду ее удобства и наглядности не утратила актуальности и в настоящий момент, несмотря на последующее развитие континуальной теории процесса.

Суть дискретно-контактных представлений о прессовании порошков состоит в анализе условий контактного взаимодействия и деформаций отдельных частиц. О поведении прессуемой навески как единого объекта судят на основании гипотезы об идентичности условий деформирования отдельной частицы и брикета в целом [5].

Исходной посылкой дискретно-контактных теорий служит уравнение прессования, которое в общем виде можно записать следующим образом:

$$\sigma = \beta \sigma_g, \quad (1)$$

где  $\sigma$  и  $\sigma_g$  – параметры, характеризующие прочность соответственно брикета и отдельной частицы;  $\beta$  – коэффициент, отражающий свойства порошкового материала, обусловленные его дискретностью. Как один из вариантов (см. [4]):

$$\sigma = \frac{\gamma}{1-2\nu} \sigma_g. \quad (2)$$

Здесь  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\gamma$  – безразмерный фактор прочности,

$$\gamma = \theta^2 \left( \frac{\theta - \theta_0}{1 - \theta_0} \right)^b, \quad (3)$$

где  $\theta$  и  $\theta_0$  – относительные плотности навески соответственно в сжатом и исходном (относительно плотности монолитного образца) состояниях;  $b > 1$ . Зачастую данные параметры выступают в качестве подгоночных при обработке результатов конкретного эксперимента.

Дискретно-контактная теория позволила объяснить стадийный характер процесса прессования, отраженный впоследствии и в континуальной теории [4,5]. На первой стадии уплотнения порошков, названной структурным уплотнением, деформация осуществляется за счет более рациональной структурной укладки частиц и их взаимной упругой деформации. Вторая стадия ассоциируется с возникновением и ростом поверхностей взаимного контакта частиц порошка, а третья – с их пластической деформацией.

Здесь следует отметить, что вторая и третья стадии прессования характерны в основном для обработки металлических, полимерных и керамических порошковых материалов. Что же касается естественных горных пород, то здесь имеет смысл ограничиться только первой стадией уплотнения, поскольку о последующей консолидации частиц речь не идет.

В экспериментах, выполненных в данной работе, в начале процесса прессования под действием прикладываемого внешнего давления происходят перемещение частиц в пустоты и разрушение имеющихся в свободно насыпанном порошке арок и мостиков между частицами.

После достижения максимально плотной укладки частиц дальнейшее уплотнение (т.е. заполнение оставшихся пустот) может осуществляться в основном лишь за счет их деформации. Затем происходит хрупкое разрушение (для твердых материалов, как в рассматриваемом здесь случае) или пластическая деформация частиц.

Упругая деформация отдельных частиц может быть описана на основе решения широко известной контактной задачи Герца [6]. Ее решением является следующее соотношение между сдавливающей силой  $F$  и сближением частиц  $h$ :

$$h = F^{2/3} \left[ D^2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right]^{1/3}. \quad (4)$$

Здесь

$$D = \frac{3}{4} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right), \quad (5)$$

где  $\nu_1, \nu_2$  – коэффициенты Пуассона сдвливаемых тел;  $E_1, E_2$  – модули растяжения.

Учитывая, что в рассматриваемом эксперименте размер частиц и их состав (значит, и упругие характеристики) одинаковы, можно записать усилие сжатия как

$$F = h^{3/2} \left( \frac{R}{2} \right)^{1/2} \frac{2E}{3(1-\nu^2)}. \quad (6)$$

Потенциальная энергия соприкасающихся тел

$$U = \frac{4E}{15(1-\nu^2)} \left( \frac{R}{2} \right)^{1/2} h^{5/2}. \quad (7)$$

Давление на поверхность частицы

$$P = \left( \frac{h}{R} \right)^{3/2} \frac{\sqrt{2}E}{3\pi(1-\nu^2)}. \quad (8)$$

Теперь при переходе от зависимости  $P(h)$  к экспериментально регистрируемой зависимости  $\sigma(\varepsilon)$  и с учетом (2) получим

$$\sigma = \frac{\sqrt{2} l^{3/2} \gamma}{3\pi} \left( \frac{\varepsilon}{R} \right)^{3/2} \frac{E}{(1-\nu^2)(1-2\nu)}, \quad (9)$$

где  $l$  – толщина слоя навески частиц горной породы, а  $\varepsilon$  – ее относительное изменение.

Таким образом, можно ожидать, что наблюдаемое на опыте соотношение усилие–деформация на второй стадии сжатия будет описываться законом  $\sigma \sim \varepsilon^{3/2}$ .

Существенную информацию о прочностных характеристиках исследуемых образцов горных пород предоставляет именно сравнение экспериментальных результатов, полученных для порошков с разным размером гранул. Сложность структуры испытываемых образцов не позволяет точно разграничить области, где упругая деформация сменяется пластической и последующим разрушением, как это делается при изучении деформации металлов или других пластичных материалов. Помимо того, что даже в твердотельных системах с малым числом дефектов нет четко сформулированной расчетной зависимости  $\sigma(\varepsilon)$  для пластической деформации, в хрупких материалах (к которым относится большее число горных пород) величина предела текуче-

сти (при которой деформация растет без значительного увеличения нагрузки) близка к пределу прочности. Поэтому хрупкие материалы испытывают малую пластическую деформацию, быстро переходя при повышении напряжений к стадии разрушения.

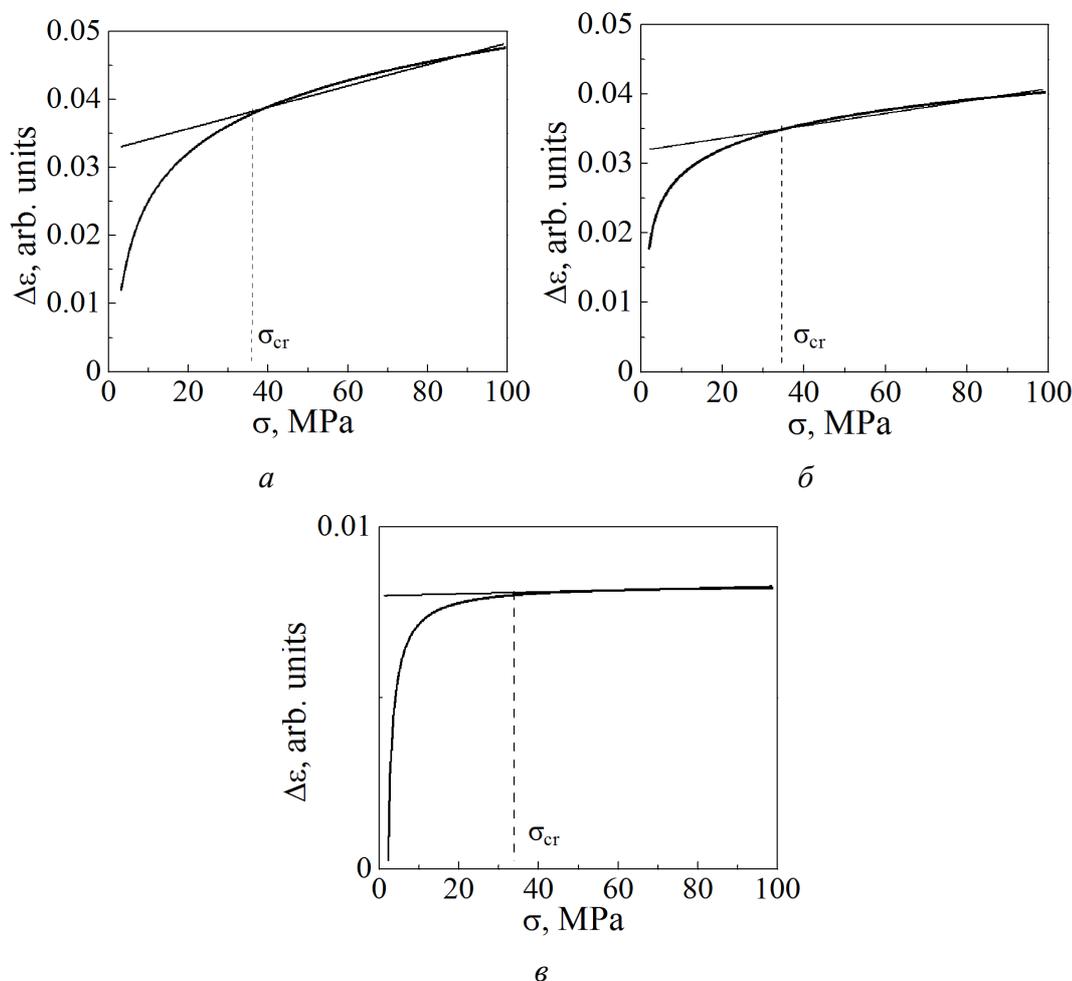
В рассматриваемом в настоящей работе случае одноосного сжатия гранул горной породы следует учитывать, что разрушение не является одномоментным, как это происходит для традиционного макроскопического кубического образца. Разрушение отдельных гранул (пусть даже эти гранулы одного размера) может осуществляться в разные моменты времени, под разным нагружением. В качестве объяснения приведем критерий разрушения Гриффитса в его простейшей форме:  $\sigma_{cr} \sqrt{a} = \text{const}$ , где  $\sigma_{cr}$  – напряжение разрушения,  $a$  – длина трещины (или иного дефекта). В реальных горных породах размер трещин и пор, по которым может произойти разрушение, варьируются в широком диапазоне. Только диаметр пор может составлять от 1 до  $10^4$  нм, а, кроме того, следует учитывать и наличие щелевидных трещин, длина которых, очевидно, как минимум того же порядка. Размер рассматриваемых гранул составляет от 400 до 5000 мкм, поэтому они могут включать в себя поры и трещины разного размера. Распределение трещин и пор по отдельным гранулам является хаотичным. Соответственно развитие данных дефектов вплоть до разрушения гранул происходит под разной нагрузкой, без четко выделенного диапазона.

Поставить в прямое соответствие экспериментальным кривым аппроксимацию типа  $\sigma \sim \varepsilon^{3/2}$  ожидаемо оказывается возможным только в ограниченном диапазоне деформаций – до  $\varepsilon \sim 0.12\text{--}0.15$ . Далее все больший вклад в соотношение усилие–деформация вносится разрушением и уплотнением разрушенных фрагментов гранул.

Поэтому представляется целесообразным исключить вклад в зависимость  $\sigma(\varepsilon)$  пластической деформации (пусть и незначительной) и разрушения частиц породы. Для этого можно найти разность экспериментальных кривых, измеренных для частиц разных диаметров, полагая, что, в силу широкого разброса дефектов по размерам и случайности их распределения по объему частиц и по отдельным частицам, данный вклад в среднем будет одинаков для навесок гранул разных размеров, взятых из одного и того же образца породы.

На рис. 3 представлена разность деформации навесок гранул разных размеров при одной и той же нагрузке. Видно, что в определенный момент разницы в деформации достигает постоянного значения либо начинает нарастать более медленно, практически линейно. Имеются основания полагать, что в этот момент полностью заканчивается стадия упругого деформирования гранул как отдельных объектов, где приложенное усилие зависит от размера гранул (9). Происходит разрушение гранул по линиям содержащихся в них пор и трещин, и далее максимально уплотнившаяся навеска ведет себя подобно консолидированному материалу. Косвенно данное суждение подтверждается тем, что по окончании нагружения и после снятия на-

грузки деформация навески остается практически на том же максимальном уровне. Следовательно, именно этот уровень нагружения может быть интерпретирован как предел прочности данного материала.



**Рис. 3.** Разность деформации навесок гранул разных размеров при одной и той же нагрузке, мм: *a* – 2.5 и 0.5; *б* – 5 и 0.5; *в* – 2.5 и 5

Подобная интерпретация экспериментальных результатов по сжатию и разрушению частиц малых размеров была изложена в [7]. Там было отмечено, что при сжатии отдельных частиц кварца кривая нагружение–деформация перед моментом разрушения приобретала линейную форму.

Как видно на рис. 3, начало заключительной стадии деформации при любой разнице в размерах гранул происходит на одном и том же уровне нагружения. Для данных образцов он составляет 34 МПа. Иными словами, при любой разности размеров гранул оцениваемый предел прочности не изменяется. Единственное отличие состоит в том, что при близких размерах гранул (рис. 3,в, где размер гранул отличается в 2 раза, а не в 5 раз (*a*) или в 10 (*б*)) график разности деформаций практически выходит на горизонтальную прямую насыщения, что облегчает нахождение  $\sigma_{cr}$ .

Полученная таким образом величина предела прочности  $\sigma_{cr} = 34$  МПа находится в пределах известных табличных параметров данной породы (глинистого сланца). Помимо того, она близка к нагрузке, при которой был разрушен исходный монолитный образец (28 МПа).

### Выводы

При анализе деформационно-прочностных характеристик природных материалов (грунта и горных пород) наступление заключительной стадии деформации, когда гранулированный образец максимально уплотнен вследствие разрушения гранул и заполнения пустот, можно трактовать как достижение предела прочности материала. Кривые деформация–напряжение на этой стадии демонстрируют форму, близкую к линейной. Проведенные на этом участке секущие (для определения секущего модуля деформации) практически совпадают с касательными. Данная ситуация является, в принципе, обычной для методов определения механических характеристик пород и грунтов, когда вместо единого параметра, определяющего кривую нагружения, выделяются по отдельности начальный касательный (т.е. модуль Юнга), секущий и касательный модули деформации.

Подводя итоги, на основании экспериментальных данных можно выделить следующие стадии сжатия измельченных горных пород. Первоначальное уплотнение частиц (до  $\varepsilon \sim 0.1$ ) сменяется стадией их упругой деформации (до  $\varepsilon \sim 0.15$ ). Дальнейшее разрушение частиц, продолжающееся до момента достижения предела прочности горной породы, приводит к более плотной упаковке порошка и его последующей деформации, по характеру напоминающей деформацию монолитного образца, с зависимостью между нагрузкой и деформацией, близкой к линейной. Поэтому представляется целесообразным рассматривать начало заключительного этапа (выражающегося в линеаризации экспериментальных кривых) как предел прочности данной горной породы.

Предлагаемый способ установления предела прочности гранулированного материала имеет существенное преимущество – его применение не требует изготовления образца строго определенных формы и размера. Для образцов естественного происхождения, как правило хрупких, этот факт позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на подготовку и проведение эксперимента.

1. *А.Д. Алексеев*, Физика угля и горных процессов, Наукова думка, Киев (2010).
2. *Д.В. Дмитренко*, Новые материалы и технологии в машиностроении. Сборник научных трудов по итогам научно-технической конференции, Е.А. Памфилов (ред.), БГИТУ, Брянск (2012), вып. 16, с. 23–26.
3. *М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко и др.*, Феноменологические теории прессования порошков, Наукова думка, Киев (1982).
4. *М.Ю. Бальшин*, Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна, Металлургия, Москва (1972).

5. М.Н. Самодурова, Л.А. Барков, В.А. Иванов, Б.А. Яров, Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия» **13**, № 2, 65 (2013).
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теория упругости, Наука, Москва (1965).
7. Г.С. Ходаков, Физика измельчения, Наука, Москва (1972).

*G.P. Starikov, T.N. Melnik, D.A. Neskreba*

## EVALUATION OF THE STRENGTH OF DISPERSED ROCK MATERIALS

The results of the experiments on uniaxial compressing of powders produced by the fracture of bulk samples of rock materials (clay argillite) are reported. The analysis of the processes that occur in the course uniaxial compression of fractions of dispersed materials of different particle size is presented. The results are interpreted as a substantiation of an experimental method of estimation of strength characteristics of dispersed materials, in particular, natural rocks.

**Keywords:** strength, uniaxial compression, natural rocks, fracture

**Fig. 1.** Scheme of uniaxial compression installation employed by the experiment on strength evaluation: 1 – plunger, 2 – chamber rod, 3 – chamber, 4 – maintaining plate, 5 – clock-type indicator, 6 – sample

**Fig. 2.** Loading-strain curves for the fractions of different size: *a* – experimental data for the fractions, mm: 0.4–0.5 (■), 2–2.5 (▲), 5 (●); *b* – exponential approximation

**Fig. 3.** Strain difference under the same loading for the subsamples of the granules of different size, mm: *a* – 2.5 and 0.5; *b* – 5 and 0.5; *c* – 2.5 and 5