

*д.т.н. Бабиюк Г.В.,
Пунтус В.Ф.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ПРОЯВЛЕНИЕ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наведені результати дослідження міцності матеріалу, еквівалентного гірській породі, на зразках різного розміру.

***Ключові слова:** випробування, модель, гірська порода, масив, міцність, масштабний ефект.*

Приведены результаты исследования прочности материала, эквивалентного горной породе, на образцах различного размера.

***Ключевые слова:** испытания, модель, горная порода, массив, прочность, масштабный эффект.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Изучение геомеханических процессов на физических моделях ограниченных размеров с целью последующего переноса установленных закономерностей деформирования пород, в том числе при их взаимодействии с крепью, на породный массив неограниченных размеров основывается на законе подобия деформирования твердых тел [1], согласно которому у моделей различных размеров, изготовленных и испытанных в одинаковых условиях, прочность материала не должна зависеть от геометрических размеров образцов, так как она определяется величиной нагрузки, отнесенной к единице площади. С соблюдением закона подобия при нагружении геометрически подобных тел различных абсолютных размеров обычно рассчитывают на прочность строительные конструкции, в том числе крепи выработок, по удельным механическим характеристикам с использованием теории упругости.

Однако испытания различных материалов (металлов, горных пород, угля, бетона и др.) показали, что на практике часто имеют место отклонения от этого закона. Поскольку они проявляются во влиянии масштабов или размеров моделей на прочность материалов, то причины, обуславливающие эти отклонения, обычно называют масштабным фактором, а само явление – масштабным эффектом. Истолкование этого явления представляет собой фундаментальную проблему [1], актуальную, в том числе, и при рассмотрении геомеханических процессов, про-

исходящих в породном массиве при сооружении горных выработок.

Анализ публикаций. В последнее время для количественной оценки влияния масштабного фактора на прочность горных пород предложены кардинальным образом отличающиеся методики, основанные на аналитическом [2] и вероятностно-статистическом [3] подходах.

Аналитически проф. Г.Г. Литвинский определяет масштабный фактор прочности как отношение предельных сдвигающих напряжений в неразрушенной и нарушенной ослаблениями горной породе, полученных из решения дифференциальных уравнений [2]:

$$M_f(x) = \frac{\tau'_{nt}}{\tau_{nt}} = \psi(x) \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0 \psi(x)} + 1 \right)^{\alpha \psi(x)} \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0} + 1 \right)^{-\alpha}, \quad (1)$$

где τ_{nt} и τ'_{nt} – касательные напряжения на площадке сдвига соответственно для однородной породы (образца) и породного массива, нарушенного ослаблениями в виде открытых трещин;

$\psi(x)$ – сплошность породы, зависящая от размера x образца и определяемая как функция поврежденности: $\psi(x) = 1 - \omega(x)$; $0 \leq \psi \leq 1$, при $\psi=0$ – полное разрушение, а при $\psi=1$ – порода бездефектна;

σ_n – нормальные напряжения на площадке сдвига;

σ_0 – когезия разрыва, которая для горных пород с $\alpha \leq 0,5$ может быть принята равной прочности породы на одноосное растяжение σ_p ;

α – параметр хрупкости, изменяющийся в диапазоне $0 \leq \alpha \leq 1$ и показывающий на какой части площадки сдвига происходит сухое трение; при $\alpha = 1$ паспорт прочности породы представляет собой прямолинейную огибающую с постоянным углом внутреннего трения; при $\alpha=0$ он соответствует идеально пластической породе.

По своей сути параметр $M_f(x)$ есть коэффициент структурного ослабления, показывающий во сколько раз прочность массива меньше прочности породы в образце. Он является сложной степенной функцией, зависящей от напряженного состояния σ_n , прочностных показателей σ_0 , строения массива ψ и параметра хрупкости α , определяющего вид паспорта прочности породы, причем при $\alpha=0$ параметр $M_f(x) = \psi(x)$. Уравнение (1) раскрывает многие закономерности поведения трещиноватого породного массива под нагрузкой, однако оно не дает в явном виде интересующую нас зависимость прочности от размера образца. Кроме того, нерешенным остается определение численных значений переменных $\psi(x)$ и α для конкретной породы, а в нашем случае для исследуемого материала, у которого отсутствуют открытые трещины, но имеются дефекты в виде пор.

Авторы работы [3] отличие прочности породного массива R_M от

математического ожидания прочности слагающих массив структурных элементов $M(R)$ также оценивают коэффициентом структурного ослабления, равным

$$k_c = R_m / M(R). \quad (2)$$

Конкретный вид выражения (2) зависит от выбора функции распределения случайной величины прочности образцов (R), что предполагает проведение представительных экспериментальных исследований с целью установления закона распределения и относительной вариации прочности структурных элементов, которые также меняются по мере изменения размеров образцов.

Следовательно, основой для теоретических построений должны быть экспериментальные исследования прочности горных пород и эквивалентных им материалов на образцах различного размера, которые не столь многочисленны, так как требуют огромных затрат труда и средств на проведение лабораторных и шахтных экспериментов.

По результатам лабораторных и шахтных исследований образцов горных пород на сжатие и растяжение развернутый анализ влияния масштабного эффекта на их прочность дан в работе [4], где отмечается противоречивость полученных результатов различными авторами, так как с увеличением размеров образцов прочность может не только уменьшаться, но и возрастать, либо оставаться без изменений. При этом масштабный эффект при сжатии и растяжении проявляется по-разному.

К числу исследований, отмечающих рост прочности на сжатие при увеличении линейных размеров кубических образцов известняка, мрамора, гипса и цемента, относится работа Л.И. Барона [5]. Однако при этом автор отмечает, что с ростом размеров образцов, несмотря на увеличение сопротивления раздавливанию, градиент разрушающего напряжения на единицу вновь образованной поверхности продуктов разрушения, изученных путем ситового анализа, снижается.

Как уменьшение, так и увеличение прочности горных пород с ростом размеров образцов отмечается в работах М.И. Койфмана [6]. Для объяснения этого факта он предложил различать масштабные эффекты первого и второго рода. Масштабный эффект первого рода, или объемный, связан со структурной неоднородностью испытываемого материала и наличием случайно распределенных по объему дефектов, а второго рода, или поверхностный, обусловлен качеством обработки образцов и степенью разрушения поверхностного слоя.

В работе [7] на основании анализа результатов испытаний образцов горных пород (угля) различных размеров сделан вывод о том, что основными причинами разницы свойств пород, изученных на лабораторных образцах малого размера и в массиве, является не только нарушение условия подобия между образцами и массивом в результате на-

личия трещиноватости, т.е. проявление масштабного эффекта, но и различие напряженного состояния лабораторных образцов и породного массива, воздействие напряжений (нагрузок) за несопоставимые временные периоды, изменения свойств образцов в процессе отбора и обработки из-за дегазации, высыхания, механических повреждений и др. Для определения прочности горных пород с учетом влияния масштабного эффекта авторами предложены уравнения, основанные на получении прочностных показателей на двух сериях испытаний образцов различных размеров:

$$\sigma_p = \frac{\sigma'_p}{(F/F')^n} \quad \text{и} \quad \sigma_c = \frac{\sigma'_c}{(F/F')^n}, \quad (3)$$

где σ_p и σ'_p , σ_c и σ'_c – соответственно прочность породы (угля) на разрыв и сжатие на образцах с площадью сечения F и F' ;

n – показатель масштабного эффекта, определяемый из выражений

$$n = \frac{\lg \sigma_{p_1} - \lg \sigma_{p_2}}{\lg F_2 - \lg F_1} \quad \text{и} \quad n = \frac{\lg \sigma_{c_1} - \lg \sigma_{c_2}}{\lg F_2 - \lg F_1}, \quad (4)$$

где индексы 1 и 2 означают показатели для образцов соответственно меньшего и большего размеров.

Большой объем испытаний на одноосное сжатие моделей массива, собранных из равнопрочных (разнопрочных) блоков с нормальносекущей (кососекущей) трещиноватостью выполнен во ВНИМИ. Коэффициент структурного ослабления такого массива рекомендуется определять с помощью зависимости вида [8]:

$$k_c = \frac{1}{1 + a \ln(H/l)}, \quad (5)$$

где H и l – размеры призмы и блока соответственно;

a – коэффициент, зависящий от прочности пород и изменяющийся от 1 до 7 с увеличением прочности пород от 1 до 100 МПа.

Из вышеизложенного следует, что вопрос о влиянии размеров образцов (моделей) на величину их механической прочности до сих пор окончательно не выяснен и требует дальнейших обстоятельных экспериментальных исследований на образцах (моделях) с широким диапазоном значений размеров и представительным числом испытаний для учета вариации показателей.

Формулировка цели (постановка задачи исследования). Основная задача настоящей работы состояла в исследовании показателей прочности модельных материалов, используемых при физическом моделировании геомеханических процессов, происходящих в породном массиве при его взаимодействии с анкерной крепью, в зависимости от размера (объема, площади раскола) моделей.

Представление основного материала исследования. Для осуществления поставленной задачи были изготовлены цилиндрические, кубические и призматические образцы различных размеров из модельного материала со следующим процентным соотношением компонентов (по объему) $ГП:П:Г:Ц:В=34:8:25:7:26$ и $ГП:П:Г:Ц:В=30:19:22:6:23$, где приняты следующие обозначения: ГП – мелкодробленая горелая порода с максимальным размером зерна 1,5 мм; П – мелкозернистый кварцевый песок (0,5 мм); Г – гипс; Ц – портландцемент марки 500; В – вода. Материал предназначался для изготовления моделей однородного массива, прототипом для которого являлась твердая осадочная порода сложного петрографического состава. Материал, с одной стороны, должен обладать свойствами хрупких горных пород и одновременно малой прочностью, которая давала бы возможность промоделировать процесс деформирования породного массива в режиме контролируемого разрушения за пределом прочности на обычном прессе с соблюдением критериев подобия. С другой стороны, он должен иметь стабильные свойства, т.е. неменяющиеся во времени в зависимости от влажности. Образцы испытывались в сухом состоянии через большой промежуток времени после их изготовления, причем влажность материала контролировалась путем взвешивания образцов.

Образование такого модельного материала протекает в две стадии. В течение первой происходит формирование каркаса структуры с возникновением контактов срастания между образующимися кристаллами. В течении второй стадии новые контакты не возникают, а происходит как рост прочности структуры, так и уменьшение её за счет возникновения внутренних дефектов в результате действия внутренних растягивающих напряжений, образующихся в результате направленного роста кристаллов и усыхания материала. Поэтому прочность образцов, с одной стороны зависит от соотношения между размерами образующихся кристаллов и площадью контактов между ними, а с другой стороны определяется связями в местах сплетения вытянутых кристалликов в ссостке, которые называются «условно-коагуляционными». Эти связи значительно прочнее, чем коагуляционные. Однако во влажной среде прочность образцов снижается до уровня прочности коагуляционных контактов и может восстанавливаться при полном высыхании.

Призматические образцы готовили в стандартных формах в виде балочек размером 40x40x160 мм, а испытывали их путем раскалывания клиньями на четыре необработанных кубика и последующего их раздавливания зубчатыми накладками с помощью прессы БП-3 с ручным гидравлическим приводом.

Кубические образцы делали в стандартных формах размером 100x100x100 мм. Большие кубики раскалывали клиньями вначале на призмы различных размеров, из которых получали восемь маленьких

кубиков, испытанных также на сжатие на прессе БП-3 с использованием зубчатых накладок.

Цилиндрические образцы изготавливали в специальных формах диаметром 35 мм, 83,5 мм, 87,1 мм, 101,8 мм. Цилиндры малого диаметра вначале раскалывали клиньями с цилиндрической выточкой перпендикулярно оси образца на малые цилиндрики длиной $l \geq 0,7d$, которые затем испытывали на сжатие зубчатыми инденторами по боковой поверхности образца с помощью полевого пресса для экспресс-испытаний (ППЭИ) горных пород [9]. Все вышеописанные образцы испытывали по обычной методике, т.е. образцы доводились до разрушения с одного нагружения.

Цилиндры большого диаметра выполняли различной высоты, но с приблизительно равным соотношением высоты (h) и диаметра (d), составлявшим 1,24 – 1,31, что соответствует интервалу стандартного отношения $h/d = 1-2$. Торцы образцов тщательно обрабатывались для получения параллельных поверхностей. Отклонения по высоте допускались в пределах 0,1-0,5%.

Испытывали большие цилиндры на одноосное сжатие путем раздавливания плоскими плитами с эластичными прокладками в виде четырех слоев полиэтиленовой пленки на гидравлическом прессе МС-1000 с регистрацией продольных и поперечных деформаций в режиме многократного нагружения и разгрузки и с полуавтоматизированным управлением с помощью персонального компьютера по разработанной программе. Программа регистрирует время начала и окончания каждого опыта, задает скорость загрузки образца, визуализирует ход эксперимента с помощью пяти диаграмм, демонстрирующих изменение нагрузки и перемещений во времени для каждого датчика. Полученные с датчиков данные сохраняются в компьютере в табличном текстовом файле, обработка которого производится при помощи программы Microsoft Office Excel.

На гидравлических прессах БП-3 и ППЭИ, не имеющих автоматики, скорость деформирования образца регулировалась вручную и приблизительно составляла 0,1–0,3 мм/мин, а на прессе МС-1000 регулирование скорости загрузки образца обеспечивалось программно с панели управления компьютера, при этом средняя скорость деформирования образца была равна 0,01–0,02 мм/мин.

При оценке прочности в расчет принимались максимальные усилия, затрачиваемые на разрушение образцов, которые относились к площади раскола (при растяжении) или площади нагружаемой поверхности (при сжатии). Образцы при сжатии разрушались путем образования продольных столбиков, характерных для хрупких однородных пород при отсутствии трения по торцевым поверхностям образцов, что достигалось за счет применения зубчатых накладок и эластичных прокладок.

Данные испытаний наносились на графики для получения зависимостей сопротивления модельного материала раздавливанию σ_c от объема образцов (V , см³) и сопротивления расколу σ_p от площади образцов (F , см²). В качестве примера зависимости для модельного материала состава ГП:П:Г:Ц:В=30:19:22:6:23 (менее прочного) приведены на рисунке 1, а для прочности образцов на сжатие σ_c и на рисунке 1, б для прочности образцов на растяжение σ_p . Несмотря на различие методик испытания на полученных зависимостях отчетливо зафиксирована тенденция уменьшения прочности образца с увеличением его размеров, причем в начальный момент (при малых размерах образцов) прочность материала снижается более активно, а начиная с площади раскола 12 см² (для растяжения) и объема 64 см³ (для сжатия) кривые выполаживаются. В среднем прочность материала на сжатие в 8 раз превышает прочность на растяжение, причем по мере роста размеров образцов это отношение увеличивается.

Как и следовало ожидать, масштабный эффект при расколе образцов проявляется сильнее, чем при сжатии, что можно объяснить следующим образом. Независимо от размера, образец содержит структурные элементы в виде частичек горелой породы, песчинок, скрепленных в единый конгломерат сложным связующим на основе гипса и цемента. Между структурными элементами остаются поры и при высыхании материала образуются трещины, которые являются структурными дефектами, случайным образом распределенными по всему объему образца. Поэтому при расколе сопротивляется не вся геометрическая площадь сечения раскола, а только некоторая ее часть, зависящая от соотношения попадающих в сечение дефектов и структурных элементов. При этом, чем меньше размер образца, тем большей будет площадь, приходящаяся на структурные элементы, так как их размер постоянен. При раздавливании образцов в начальный момент некоторая часть дефектов закрывается, что ведет к росту общего сопротивления материала сжатию, а, следовательно, и к увеличению средних значений напряжений по сравнению с расколом. После закрытия пор и трещин материал некоторое время работает упруго, а при дальнейшем увеличении напряжений он переходит на стадию микрорастрескивания, характеризующуюся накоплением и взаимодействием дефектов, концу которой отвечает предельная прочность материала на сжатие. С дальнейшим развитием процесса разрушения образцов происходит полный разрыв внутренних связей, что вызывает образование структурных столбиков с раскрытием магистральных трещин в продольном направлении и последующую общую потерю устойчивости образца. Все вышеотмеченные стадии деформирования образца модельного материала полностью соответствуют поведению полиминеральных осадочных пород.

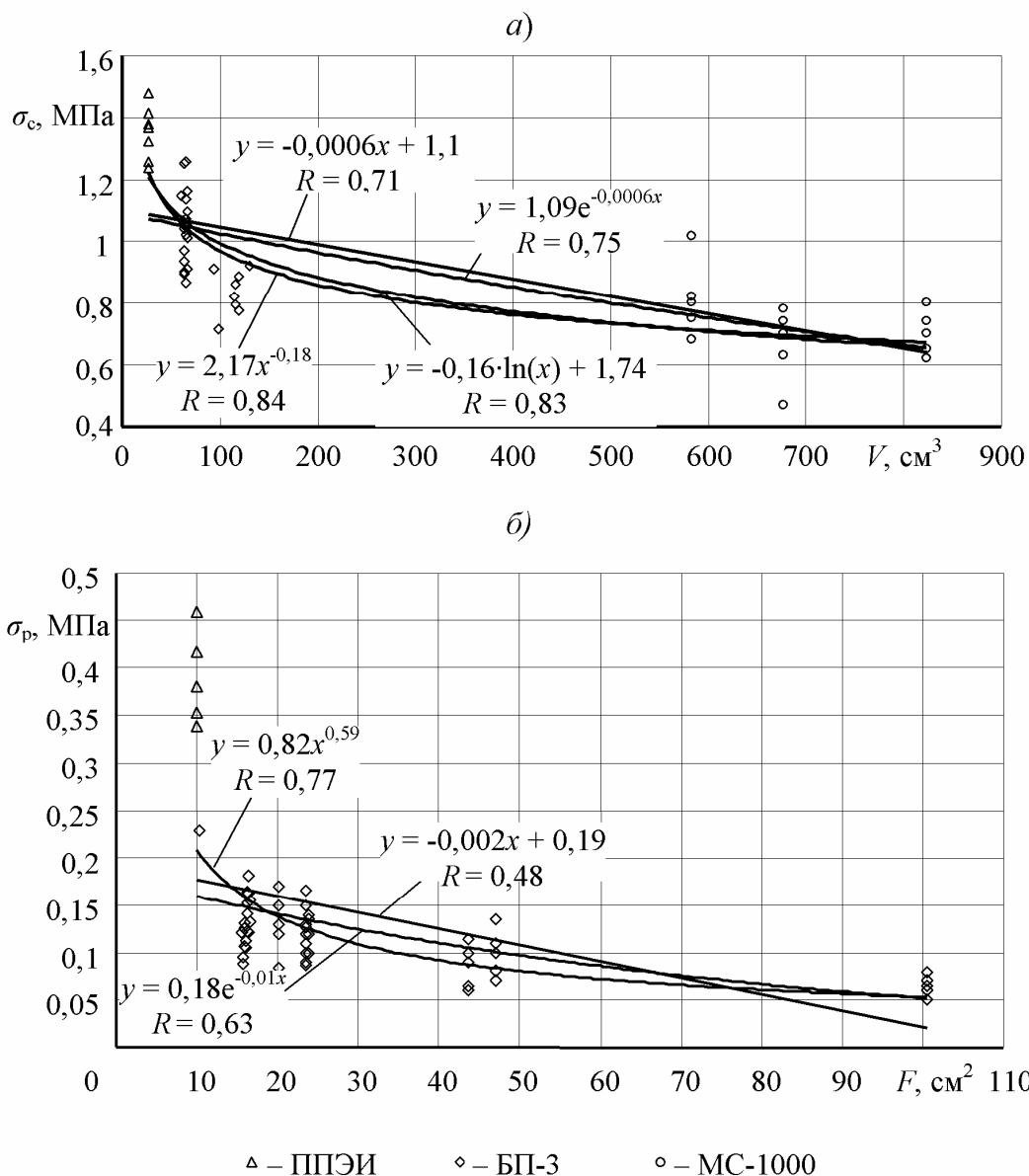


Рисунок 1 – Прочность на сжатие (а) и растяжение (б) модельного материала ГП:П:Г:Ц:В=30:19:22:6:23

По мере увеличения размеров образцов относительная площадь (объем) структурных дефектов увеличивается, а относительная площадь (объем) образца без дефектов уменьшается, поэтому средняя прочность материала при увеличении размеров снижается. В то же время для образцов малых размеров характерен больший разброс показателей, чем для крупных, менее прочных образцов. Однако прочность материала при увеличении размеров снижается не беспредельно. Кривая, характеризующая изменение прочности от размеров образца, асимптотически приближается к минимальному значению, которое можно принять за величину прочности породного массива.

Исходя из полученных результатов, можно отметить, что прочность конгломерата зависит от соотношения размеров слагающих его элементов (дефектов) и изучаемого фрагмента массива. Если массив однороден, т.е. число структурных элементов велико, то в данном диапазоне масштабный эффект невелик и им можно пренебречь, так как влияние размеров приблизительно соответствует вариации показателей, обусловленной неоднородностью пород. Если порода содержит несколько систем дефектов различного уровня (поры, трещины), то каждому уровню будет соответствовать своя кривая уменьшения прочности, значимая в определенном диапазоне изменения размеров, а общая зависимость будет иметь ступенчатый вид. При наложении областей взаимного влияния отдельных дефектов с увеличением размеров образцов прочность пород будет существенно снижаться.

Для исследования формы зависимостей экспериментальные данные обработаны методом наименьших квадратов [10]. Проведенное статистическое сравнение с помощью корреляционного отношения R показало, что для линейной, степенной, логарифмической и показательной зависимостей коэффициент имеет малую величину, что указывает на плохую коррелированность прочности от размеров образца. Кроме того, отмеченные выше функции пересекают ось ординат, т.е. при нулевых размерах образцов материал обладает прочностью, а при больших размерах некоторые функции стремятся к нулю, что не согласуется с физическим смыслом явления масштабного эффекта, так как прочность массива не может быть равна нулю. Лучше всего связь между показателями описывается смещенной гиперболой, особенно для прочности на растяжение σ_p , для которой корреляционное отношение близко к единице.

Для исследования гиперболической зависимости и уяснения физического смысла, входящих в нее величин, экспериментальные данные для обоих составов материала для объединенной выборки представлены в безразмерном виде на рисунке 2. Для этого на оси абсцисс отложены относительное значение объема (при сжатии) и площади (при растяжении) испытываемых образцов, причем нормировка размеров произведена по отношению к кубику с размерами 40x40x40 мм, а по оси ординат – относительные напряжения, т.е. отношение текущего значения прочности к прочности образцов с сечением 16 см² и объемом 64 см³. На основании анализа зависимостей можно заметить, что безразмерные кривые для различных составов могут быть объединены в общую зависимость, причем при сжатии кривая более пологая, а прочность снижается в 1,5 раза, а при растяжении кривая идет значительно круче, а прочность снижается более чем в 5 раз. Можно предположить, что для неоднородной и трещиноватой породы зависимость также будет более крутой, чем для малотрещиноватой и однородной породы. Следовательно, масштаб-

ный эффект связан с дефектами структуры и проявляется в большей степени в трещиноватых и неоднородных породах.

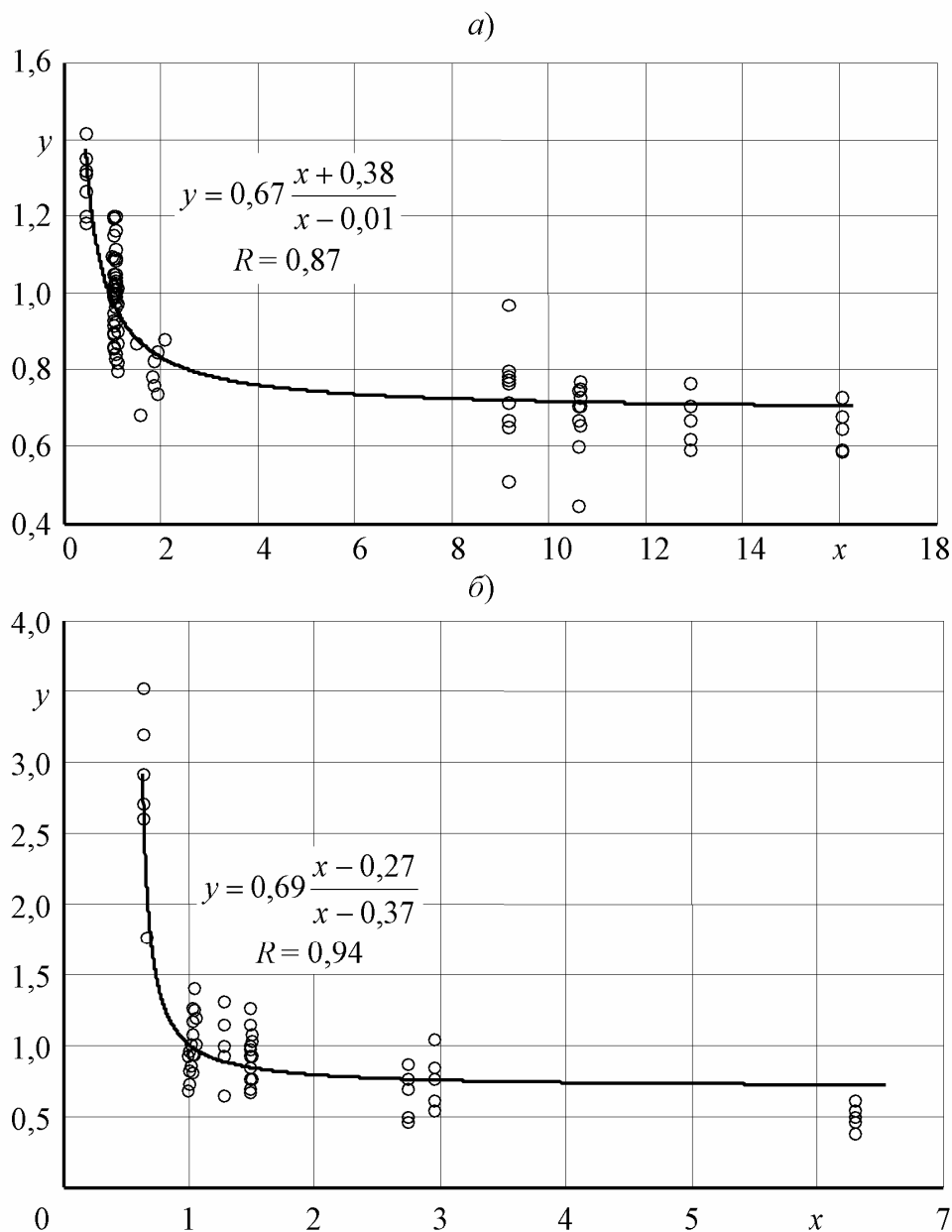


Рисунок 2 – Безразмерные зависимости масштабного эффекта для прочности модельного материала на сжатие (а) и растяжение (б)

Таким образом, статистическая обработка экспериментальных данных показала, что для математического описания масштабного эффекта может быть использована зависимость, впервые предложенная для описания масштабного эффекта в работе [7] М.М. Протодыяковым (младшим). Однако для придания входящим в зависимость величинам более четкого физического смысла она должна быть трансформирована к виду:

$$\sigma(x) = \sigma_M \frac{x - mz}{x - z}, \quad (6)$$

где σ_M – прочность трещиноватого массива или образца с относительным размером (x), стремящимся в бесконечность;

m – коэффициент, характеризующий кривизну функции и зависящий от вида напряженного состояния (сжатие, растяжение) и соотношения размеров структурных элементов и фрагмента массива;

x – относительный размер образца, имеющего прочность $\sigma(x)$;

z – параметр, имеющий смысл размера образца, при котором прочность стремится в бесконечность.

Следует заметить, что зависимость (6) имеет смысл при $x \geq z$. Дробь $(x-mz)/(x-z)$ является безразмерным коэффициентом, показывающим во сколько раз прочность образца размером x больше прочности массива σ_M , т.е. величина обратная коэффициенту структурного ослабления:

$$k_c = \frac{\sigma_M}{\sigma(x)} = \frac{x - z}{x - mz}. \quad (7)$$

При $x \rightarrow \infty$ вторыми членами в числителе и знаменателе уравнения (6) можно пренебречь, тогда $\sigma(x) = \sigma_M$, т.е. прочность крупных образцов асимптотически стремится к прочности массива.

Смысл параметра z легко понять, если приравнять $x=z$ и подставить в уравнение (6), откуда получим $\sigma(x) \rightarrow \infty$. Следовательно, z есть размер образца, при котором прочность стремится в бесконечность, т.е. параметр z является координатой вертикальной асимптоты.

Поскольку в уравнении (6) имеются три неизвестных параметра: σ_M , m и z , то для их определения достаточно иметь три точки, полученные опытным путем на образцах различных размеров. Испытав в лаборатории образцы трех размеров x_1 , x_2 и x_3 и получив их прочности σ_1 , σ_2 и σ_3 , можно без особого труда из системы трех уравнений вычислить параметры, характеризующие влияние масштабного эффекта на прочность массива.

Выводы. Экспериментальными исследованиями изучена прочность модельного материала на сжатие и растяжение и обоснована эмпирическая гиперболическая зависимость, позволяющая перейти от прочностных показателей, полученных путем моделирования, к прочности массива с учетом масштабного эффекта.

Библиографический список

1. Сухонос С.И. Масштабная гармония Вселенной / С.И. Сухонос. – М.: София, 2000. – 253 с.
2. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов: монография / Г.Г. Литвинский. - ДонГТУ. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.
3. Шашенко А.Н. Масштабный эффект в горных породах: монография / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.В. Кужель. - НГУ. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2004. – 132 с.
4. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин, М.Ф. Кунтыш; под ред. М.М. Протодьяконова. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
5. Барон Л.И. К вопросу о влиянии масштабного фактора при испытаниях горных пород на раздавливание // Л.И. Барон, В.М. Курбатов / Научные исследования при разработке угольных и рудных месторождений: ИГД АН СССР. – М.: Госгортехиздат, 1959. – С. 163-169.
6. Койфман М.И. Главный масштабный эффект в горных породах и углях // Проблемы механизации горных работ. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 39-56.
7. Протодьяконов М.М. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве: монография / М.М. Протодьяконов, С.Е. Чирков. - ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: Наука, 1964. – 67 с.
8. Фисенко Г.Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
9. Временная инструкция и методические указания по определению прочностных и деформационных свойств горных пород / Коммунарский горно-металлургический институт. – Коммунарск: Ком. гор. типография, 1981. – 41 с.
10. Румишский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство / Л.З. Румишский. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971. – 192 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Клишиным Н.К.