

УДК 622.83:550.82

КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ



М. Д. ИЛЬНИКОВ,
зав. лабораторией,
канд. техн. наук,
llinov_md@spmi.ru



В. А. КОРШУНОВ,
ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук



Г. Б. ПОСПЕХОВ,
ведущий научный сотрудник,
доцент, канд. геол.-минерал. наук



А. Н. ШОКОВ,
старший научный сотрудник,
канд. техн. наук

Научный центр геомеханики и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Геомеханические процессы, протекающие в неоднородном трещиноватом породном массиве при выполнении горно-технологических операций, отличаются исключительной сложностью. Они развиваются в разнообразных геологических и горнотехнических условиях и сопровождаются изменением физико-механических свойств в процессе эксплуатации месторождений. Это обуславливает необходимость учета при инженерных расчетах особенностей строения породного массива и многочисленных механических характеристик пород, отражающих особенности процессов [1–4].

Экспериментальной базой для получения данных о свойствах породного массива обычно служат механические испытания образцов. Для получения необходимой предварительной информации о механических свойствах горных пород, наиболее эффективной на ранних стадиях изучения месторождения, применяют отбор представительных проб из геотехнических скважин и проведение последующих механических испытаний изготовленных из них малогабаритных образцов. Традиционный подход к определению механических свойств горных

Обозначены проблемы, возникающие в процессе исследований механических свойств горных пород. Предложен единый подход к проведению исследований механических свойств пород, согласно которому при испытаниях образцов моделируют процессы, подобные процессам деформирования и разрушения породного массива. Для этого испытания образцов правильной формы рекомендовано дополнять испытаниями образцов сферическими инденторами, которые обеспечивают определение полного комплекса показателей прочности для характерных породных структур по данным каждого испытания.

В условиях, когда выполнение комплексных испытаний не представляется возможным, для определения основных показателей прочности и деформируемости пород рекомендовано применять корреляционные зависимости, основанные на простейших сведениях о функциональных характеристиках монолитных образцов.

Ключевые слова: моделирование, породный массив, монолитная порода, разрушенная порода, трещина, прочность, остаточная прочность, сферический индентор, прямой метод, косвенный метод
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02

пород предполагает преобладающее использование лабораторных методов прямых испытаний образцов-близнецов правильной формы и стандартных размеров в режимах, моделирующих реальные процессы [5, 6]. Методы испытаний образцов правильной формы отличаются сложностью и трудоемкостью изготовления образцов, но при этом не гарантируют определения истинных показателей механических свойств. На результаты испытаний образцов правильной формы оказывают влияние многочисленные факторы, учесть которые в полной мере при массовых испытаниях проблематично. К ним относится, в частности, произвольный отбор более прочных фрагментов породы, который происходит в процессе изготовления образцов из-за разрушения кусков пробы по поверхностям естественных ослаблений [7–9].

При невозможности изготовления из отобранной пробы требуемого числа образцов правильной формы данные прямых методов определения механических свойств породы дополняют данными менее представительных и надежных косвенных методов, которые используют сведения о корреляции между механическими показателями [10, 11].

Учитывая ограниченные возможности отбора из разведочных скважин достаточного объема проб, при геологическом изучении и опробовании пород нередко вынуждены определять только те механические свойства, от которых существенно зависят характер и интенсивность горно-технологических проектируемых процессов. При этом

основные требования к определению свойств горных пород удовлетворяются «в разумной мере», отвечающей сложности решаемых задач с использованием определяемых показателей свойств пород, а выбор методов механических испытаний пород осуществляют, исходя из принятых критериев оптимальной представительности, достаточной надежности, максимальной доступности и экономичности испытаний в конкретных условиях [12, 13].

В связи с этим весьма актуальным является нахождение рациональных путей определения комплекса показателей механических свойств горных пород при массовых испытаниях на ранней стадии изучения месторождения.

Проблемы экспериментальных лабораторных исследований механических свойств горных пород
Моделирование геомеханических процессов в породном массиве

Универсальным научным подходом к исследованию механических свойств породного массива и прогнозированию в нем сложных горно-технологических процессов является их геомеханическое моделирование, которое лежит в основе любого научного метода и способствует его рациональному обоснованию [14–17]. При этом необходимо иметь в виду, что модель упрощает реальный процесс и воспроизводит только его «основные» особенности, а следовательно, в определенной мере искажает его течение. Поэтому обязательным этапом процедуры моделирования является экспериментальная проверка полученных данных.

Для описания горно-технологических процессов в геомеханике применяют модели сплошных сред, использующие в качестве параметров процессов средние показатели состояния для условно выделенных поверхностей – величины механических напряжений и относительных деформаций породы. Применение упрощенных сплошных однородных моделей образцов породы при исследовании механических свойств реальных трещиноватых и неоднородных горных пород сказывается на результатах испытаний и признается одной из фундаментальных проблем механических испытаний.

Для оценки предельного напряженного состояния породного массива в качестве эмпирического критерия разрушения используют построение огибающей предельных кругов напряжений Мора (паспорта прочности). При этом сдвиговую прочность породного массива принято оценивать на основе определения свойств ненарушенных пород и интегральной оценки влияния на них различных дефектов структуры [18, 19].

Международное общество ISRM рекомендует комплексный метод исследований прочностных свойств породного массива, основанный на использовании комбинации известных решений (прямых, косвенных и корреляционных методов). Для оценки прочности на сдвиг породного массива предлагается построение семейства (components) предельных огибающих кругов напряжений Мора для характерных структур

(монолитной и разрушенной породы, трещин с шероховатыми поверхностями, горной массы), при деформировании которых происходит постепенное снижение прочности до некоторых остаточных значений, характерных для конкретных породных структур. Прочность на сдвиг породного массива признана сложным явлением, для оценки которого в конкретном случае рекомендуется использовать тот или иной набор семейств предельных огибающих в заданных интервалах нормальных напряжений [20]. При этом отмечается, что одни и те же горные породы в различных напряженных состояниях могут как хрупко разрушаться, так и демонстрировать пластичное поведение. Переход от одного вида разрушения к другому при изменении напряженного состояния происходит постепенно, с определенной вероятностью его реализации. На диаграмме Мора это проявляется в том, что сдвиговая прочность породных образцов, как ненарушенных, так и разрушенных при трехосном сжатии либо ослабленных трещинами, характеризуется подобными по форме огибающими предельных кругов напряжений. На диаграмме Мора огибающие кривые прочности как ненарушенной, так и ослабленной породы имеют тенденцию к слиянию при высоком уровне напряжений [21].

Построение огибающих кругов напряжений Мора, соответствующих предельной и остаточной прочности пород, по данным лабораторных испытаний цилиндрических образцов, связано с проведением разнообразных механических испытаний на дорогостоящем оборудовании [22, 23]. Учитывая сложность и трудоемкость этого метода, широкое распространение получили расчетные методы построения огибающих предельной и остаточной прочности, основанные на эмпирических зависимостях сдвиговой прочности от нормальных напряжений с учетом особенностей конкретной горной породы [24–28]. В качестве основных параметров эмпирических зависимостей обычно используют значения показателей, характеризующих различные виды разрушения (срез и отрыв) [29–31].

Моделирование геомеханических процессов при лабораторных испытаниях

Лабораторные механические испытания образцов горных пород авторы статьи рассматривают с позиций моделирования процессов деформирования и разрушения породного массива. При этом проблемы лабораторных исследований механических свойств связаны с несоблюдением подобия процессов, протекающих в образцах и реальном породном массиве. Таким образом, основные фундаментальные проблемы лабораторных исследований механических свойств горных пород состоят в низкой представительности механических испытаний образцов в отношении вещественного состава, строения, напряженно-деформированного состояния, механизма разрушения и условий испытаний при моделировании реальных процессов. Проблемы имеют комплексный характер и накладываются одни на другие в конкретных условиях.

Отбор проб

При проведении комплексных исследований механических свойств горных пород проблема отбора представительных проб приобретает большое значение из-за недостаточного объема материала проб для последующего проведения многочисленных испытаний, необходимости увязки результатов испытаний с условиями их проведения и особенностями строения (нарушенностью образцов, рельефом поверхностей трещин, их заполнением и т. д.). Процесс осложняется совместным влиянием многочисленных факторов — недостаточного объема отобранной пробы, ее низкого качества и небольших размеров фрагментов (обломков) керна, структурных особенностей породы, ее склонности к размягчению и т. д.

Подготовка к испытаниям

Процессы, моделируемые в образцах породы при лабораторных испытаниях, весьма существенно отличаются от процессов, протекающих в реальном породном массиве. Это необходимо учитывать при следующих обстоятельствах: выборе параметров образцов (его формы и размеров с учетом строения, зернистости); выборе способа испытаний применительно к различным горнотехническим задачам; выборе схемы нагружения и режима деформирования.

При изготовлении малогабаритных цилиндрических или призматических образцов нарушается геометрическое подобие реальному породному массиву (проявляемое как «масштабный» эффект первого рода). Учитывая сложность отбора достаточного объема пробы и трудности при изготовлении «качественных» образцов со шлифованными поверхностями торцов (в этом случае проявляется «масштабный» эффект второго рода), возникает необходимость уже при подготовке испытаний определиться: какие именно показатели механических свойств в моделируемых горно-технологических процессах являются основными, и определением которых допустимо ограничиться.

Проведение механических испытаний

Для породных массивов характерны разнообразные процессы деформирования и разрушения (отрыв, срез, квазипластическое деформирование), одновременно протекающие при перераспределении напряжений в условиях сложного неоднородного напряженного состояния. При этом механические характеристики горных пород изменяются в зависимости от многих факторов (условий нагружения, температуры, влажности и др.). В связи с этим возникают проблемы, связанные с обеспечением при механических испытаниях образцов геомеханического подобия режимов деформирования и разрушения модели и натуре.

Для современных методов испытаний образцов пород, как правило, характерно применение «искусственных» упрощенных схем нагружения и режимов деформирования. При этом упрощенным «искусственным» испытаниям, как правило,

присуща низкая информативность. Поэтому для обеспечения требуемой надежности результатов определения механических свойств неоднородных горных пород ГОСТами предусматриваются многочисленные испытания образцов. В случае невозможности изготовления и испытания требуемого числа образцов сокращают число определяемых показателей.

Проведение комплексных исследований

Проведение комплексных исследований механических свойств горных пород позволяет дополнить прямые методы механических испытаний доступными косвенными методами и информативными расчетными методами. Однако из-за необходимости проведения разнообразных прямых механических испытаний возникают проблемы с отбором и изготовлением многочисленных образцов. Кроме того, возникают трудности, связанные с установлением обобщающих зависимостей при объединении экспериментальных данных, полученных методами испытаний с различным уровнем надежности, а также с оценкой совместного влияния на механические свойства нескольких факторов (например, влажности, температуры и ориентации поверхностей ослабления в образцах) при незначительном числе экспериментальных данных.

Обработка результатов испытаний

В основном проблемы здесь связаны с определением обобщающих параметров паспорта прочности. Известны многочисленные эмпирические зависимости, описывающие математически огибающую предельной прочности. При этом в качестве основных параметров паспорта прочности используют показатели механических свойств, определяемые технически простыми способами. Обычно — это пределы прочности при одноосном сжатии σ_c и растяжении σ_p . Недостатком подобных эмпирических критериев разрушения обычно является ограниченность их области применения особенностями конкретных пород, видом разрушения или диапазоном напряжений [22, 26].

При решении конкретных задач для ограниченного интервала нормальных напряжений удобно использовать прямую аппроксимацию экспериментальных точек. Однако в этом случае параметры паспорта прочности для выбранного ограниченного интервала могут не совпадать с параметрами реальной огибающей кривой.

Определение деформационных характеристик

Проблемы прямых испытаний на деформируемость в основном связаны с трудоемкостью подготовки торцовых поверхностей образцов к испытаниям.

Предлагаемые пути решения проблем

Учитывая проблемы с недостаточным объемом проб, для рационального использования отобранного породного материала изготовление образцов правильной, полуправильной

и неправильной формы следует осуществлять в оптимальном сочетании для последующего проведения комплекса механических испытаний прямыми и косвенными методами. Кроме этого, предлагается вносить изменения в методики испытаний образцов правильной формы, направленные на повышение информативности прямых методов определения показателей прочности и деформируемости горных пород. В частности, рекомендуются: совмещение различных видов испытаний в ходе испытания одного образца, например первоначально в образце определяют деформационные характеристики, а затем его испытывают на прочность; проведение испытаний образцов в режиме регулируемой деформации для определения «запредельных» характеристик; применение режимов ступенчатого приложения нагрузок, например при объемных испытаниях образцов или при испытаниях на сдвиг со сжатием вдоль поверхностей ослабления.

Для повышения представительности лабораторных исследований механических свойств горных пород в отношении напряженно-деформированного состояния, механизма разрушения и условий испытаний, характерных для реального породного массива, предлагается единый подход к исследованиям механических свойств пород, согласно которому при испытаниях образцов моделируют процессы, подобные процессам деформирования и разрушения породного массива. В частности, в образце рекомендуется моделировать режим перераспределения напряжений в условиях сложного неоднородного напряженного состояния, при котором реализуются несколько видов разрушения (отрыв, срез и квазипластическое деформирование при высоком давлении).

В Санкт-Петербургском горном университете разработан метод испытаний образца неправильной формы нагружением сферическими инденторами, при котором реализуются разнообразные процессы разрушения горной породы в условиях сложного неоднородного напряженного состояния (рис. 1) [32–34]. На его основе разработан экспресс-метод построения паспортов предельной и остаточной прочности монолитной горной породы и паспорта остаточной прочности на сдвиг по сомкнутым шероховатым трещинам [35]. При расчете параметров паспорта прочности в качестве функциональных характеристик, определяющих разрушение горной породы, приняты растягивающая σ_c и сжимающая p составляющие напряжений при локальном разрушении монолитного образца срезом. На диаграмме Мора огибающая предельных кругов напряжений породы аппроксимируется набором связанных отрезков – прямолинейными отрезками, соответствующими устойчивым видам разрушения (отрыв, срез и квазипластическое деформирование), и дугами окружностей предельных кругов напряжений Мора, для которых вид разрушения носит вероятностный характер (рис. 2, линия 1). Для каждого из интервалов нормальных напряжений, соответствующих различным видам разрушения, предложен критерий прочности, выраженный через функциональные характеристики породы. Этот подход применим также и для

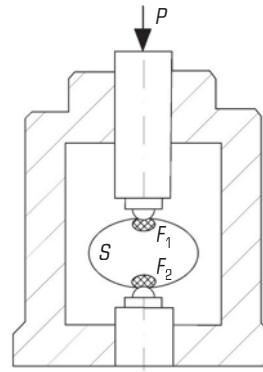


Рис. 1. Схема испытания образца сферическими инденторами:

P – нагрузка; S – площадь поверхности отрыва; F_1 и F_2 – площадь поверхностей зон разрушенной срезом породы

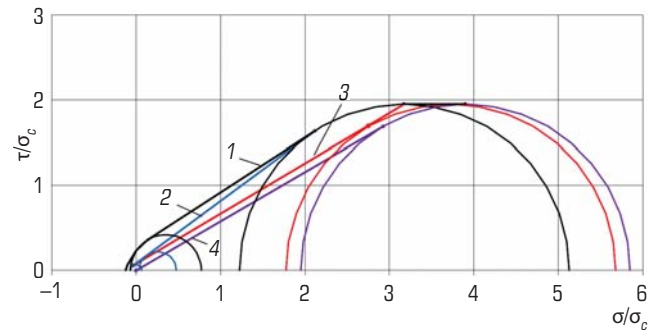


Рис. 2. Построение огибающих предельной (1) и остаточной (2) прочности монолитной породы и остаточной сдвиговой прочности по неровным (3) и ровным (4) трещинам в мраморе

τ/σ_c – относительное касательное напряжение;
 σ/σ_c – относительное нормальное напряжение;
 (в долях от предела прочности при одноосном сжатии)

упрощенной оценки остаточной прочности разрушенных пород (см. рис. 2, линия 2) и сдвиговой прочности по сомкнутым шероховатым трещинам (см. рис. 2, линии 3 и 4). Получены эмпирические зависимости, связывающие параметры остаточной прочности при сдвиге с характеристиками ненарушенной породы σ_c и p с учетом уровня нормальных напряжений и особенно шероховатости поверхностей трещин.

Учитывая проблемы с недостаточным объемом проб, предлагается усовершенствовать рекомендованный Международным обществом ISRM комплексный метод исследования прочностных свойств породного массива, заключающийся в построении семейства паспортов прочности для характерных структур (монолитной и разрушенной породы, трещин с шероховатыми поверхностями, горной массы) по экспериментальным данным комбинации прямых, косвенных и корреляционных методов определения свойств образцов. Рекомендуется при проведении экспериментальных исследований механических свойств горных пород исходить из первоочередной необходимости установления интервалов нормальных напряжений, соответствующих определенным видам разрушения (отрыву,

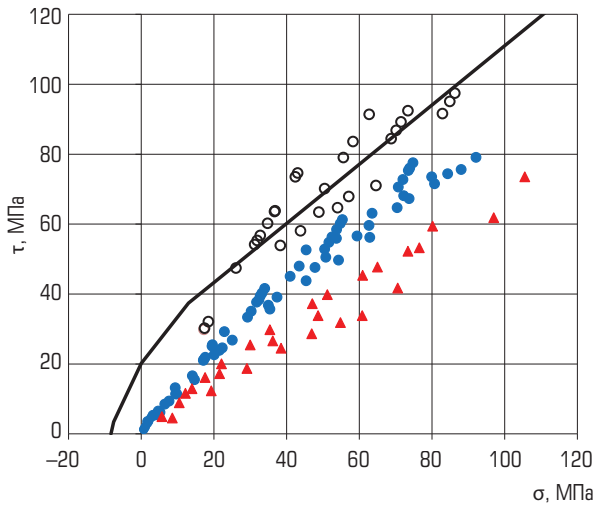


Рис. 3. Экспериментальные данные сопоставительных испытаний образцов мрамора:

белые и синие кружки – предельная и остаточная прочность при стабиллометрических испытаниях; красные треугольники – остаточная прочность при срезе со сжатием по трещинам; черная линия – огибающая предельной прочности по данным испытаний сферическими инденторами.

τ – касательное напряжение; σ – нормальное напряжение

сдвигу, квазипластическому деформированию) и надежного определения параметров паспорта прочности для этих интервалов нормальных напряжений. Для этого предлагается испытания образцов прямыми и косвенными методами дополнить весьма информативными доступными и эффективными испытаниями образцов неправильной формы сферическими инденторами (рис. 3). Кроме этого, предлагается изменить приоритеты в отношении используемых методов. В первую очередь рекомендуется проводить испытания образцов сферическими инденторами, обеспечивающими представительность испытаний в отношении сложных режимов деформирования и характера разрушения и надежность определения параметров прочности для характерных породных структур породного массива. Затем, с учетом данных, полученных по результатам испытаний инденторами, выполняют объемные испытания образцов правильной формы, которые фактически используют для проверки и экспериментального обоснования данных испытаний инденторами (рис. 4).

Предлагаемый подход способствует повышению надежности и представительности результатов определения параметров паспортов предельной и остаточной прочности пород различной структуры (монолитной, блочной, трещиноватой). При этом практически решены проблемы, связанные с отбором представительных проб при массовых испытаниях, так как в качестве образцов допускается использование многочисленных некондиционных обломков керна и отходов от изготовления образцов. Подход также может быть использован

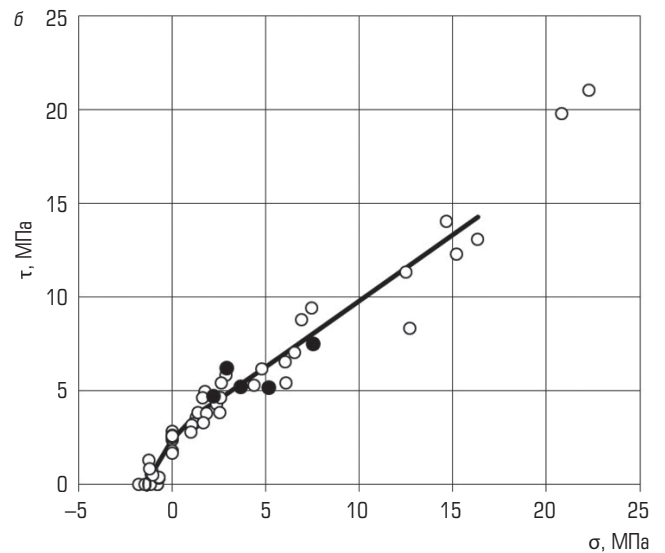
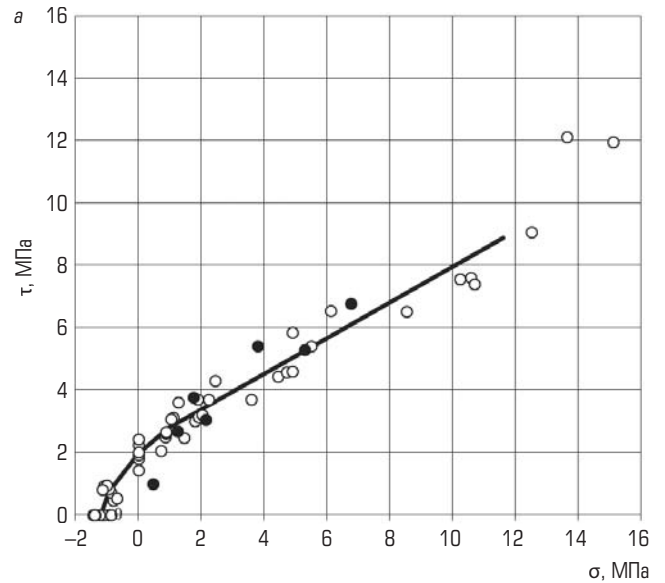


Рис. 4. Экспериментальные данные сопоставительных испытаний образцов алеврита (а) и песчаника (б):

черные кружки – данные испытаний на срез со сжатием; белые кружки и непрерывная линия – расчетные данные и огибающая предельной прочности при испытаниях сферическими инденторами;

τ , σ – то же, что на рис. 3

при оценке влияния на механические свойства сопутствующих факторов (влажности и характера ослабления образцов, степени заморозки).

В условиях, когда проведение комплексных испытаний не представляется возможным, для определения основных показателей прочности и деформируемости горных пород предлагается применять корреляционные зависимости, основанные на простейших сведениях о функциональных характеристиках монолитных образцов.

Необходимо отметить, что действующие в настоящее время государственные стандарты РФ по механическим испытаниям горных пород разработаны в 1975–1991 гг. Впоследствии получены новые сведения о процессах деформирования и разрушения пород, которые позволили уточнить параметры процессов испытаний и скорректировать формулы для расчета показателей механических свойств. При изучении методов определения прочности горных пород были проведены сопоставительные испытания, результаты которых свидетельствуют о необходимости внесения в ГОСТы изменений. Были предложены изменения, направленные на повышение точности определения механических характеристик путем исправления расчетных формул; в частности при определении пределов прочности при одноосном растяжении и сжатии по ГОСТ 21153.3–85 и ГОСТ 24941–81; на расширение возможностей стандартных методов, в частности путем дополнения ГОСТ 24941–81 методами определения коэффициента Пуассона и модуля общей деформации. В результате предлагается некоторые разделы представить в новой редакции.

Зависимость прочности на растяжение от хрупкости породы иллюстрирует график, представленный на рис. 5. Пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении вычисляются по формулам:

$$\sigma_{сж} = p + \sqrt{\sigma_t p}, \text{ где } \sigma_t = \frac{P}{F} \text{ и } p = \frac{P}{S};$$

$$\sigma_p = 2\sigma_t \frac{K}{K+1}, \text{ где } K = \frac{p}{\sigma_t}.$$

В случае невозможности (либо практической нецелесообразности) определения площади поверхностей зон разрушенной породы F предел прочности $\sigma_{сж}$ предлагается вычислять по исправленным корреляционным зависимостям, приведенным ниже, или по установленным испытаниями на конкретных породах корреляционным зависимостям. В этом случае для вычисления предела прочности при одноосном сжатии предварительно вычисляют предел прочности при одноосном растяжении по формуле $\sigma_p = 1,8\sigma_t$.

Разновидности горных пород	Корреляционные зависимости
Осадочные породы при $\sigma_p \leq 1$ МПа	$\sigma_{сж} = 5\sigma_p$
Аргиллиты, мергели	$\sigma_{сж} = 7\sigma_p$
Песчаники глинистые	$\sigma_{сж} = 7,5\sigma_p$
Алевриты, известняки	$\sigma_{сж} = 8\sigma_p$
Осадочные породы при $\sigma_p > 1$ МПа	$\sigma_{сж} = 8\sigma_p$
Песчаники карбонатные	$\sigma_{сж} = 8,5\sigma_p$
Песчаники кварцевые	$\sigma_{сж} = 10\sigma_p$
Изверженные и метаморфические породы	$\sigma_{сж} = 10\sigma_p$

Предлагается дополнить ГОСТ 24941–81 расчетным методом определения коэффициента Пуассона. Формулы для вычисления коэффициента Пуассона имеют вид:

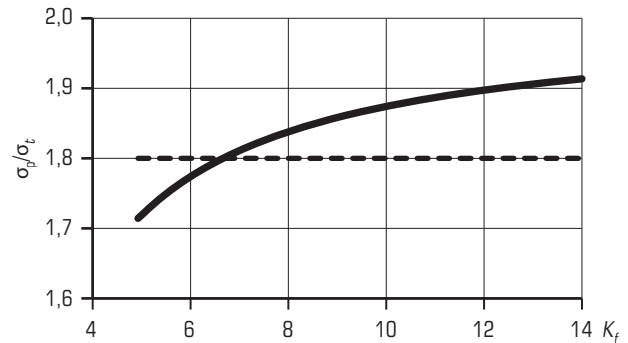


Рис. 5. Зависимость относительной прочности при растяжении σ_p/σ_t от хрупкости горных пород

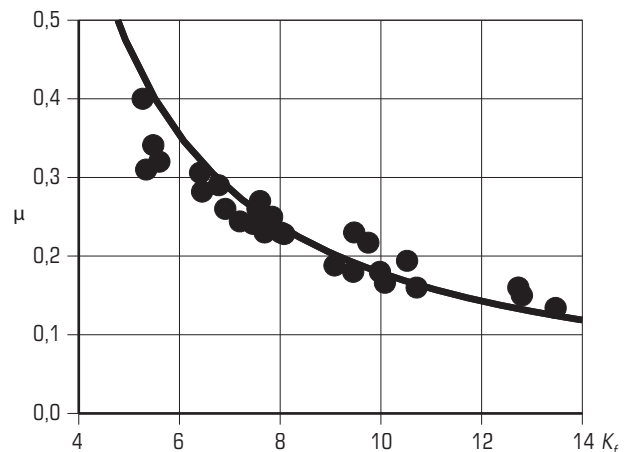


Рис. 6. Зависимость коэффициента Пуассона от хрупкости горных пород:

непрерывная линия – расчетные данные; точки – экспериментальные данные

$$\mu_k = \frac{2F}{\frac{\pi}{4}S - \frac{1}{2}F} \text{ или } \mu_k = \frac{1,4}{K_f - 2,05},$$

где $K_f = \sigma_{сж}/\sigma_p$ – коэффициент хрупкости породы (рис. 6).

Предлагается также дополнить ГОСТ 24941–81 определением модуля общей деформации D . Для этого используют данные измерения суммарной деформации вдавливания инденторов при сжатии до величины P_2 , которые подставляют в формулу для расчета величины модуля упругости, без учета параметров испытания при разгрузке.

Заключение

1. Выполнен анализ методов определения механических свойств горных пород в плане обоснованности результатов моделирования процессов деформирования и разрушения породного массива при лабораторных испытаниях образцов.

Установлены основные проблемы при традиционном подходе к определению механических свойств горных пород путем прямых и косвенных испытаний образцов правильной формы. Они связаны с ограниченными возможностями отбора проб и невысоким качеством образцов; с низкой представительностью данных по реальным процессам в отношении моделируемых состава, строения, напряженно-деформированного состояния, механизма разрушения и условий испытаний, а также с малой информативностью современных методик определения показателей механических свойств.

2. Предлагается единый подход к исследованию механических свойств пород, согласно которому при испытаниях образцов моделируют процессы, подобные процессам деформирования и разрушения породного массива. В частности, в образце рекомендуется моделировать режим перераспределения напряжений в условиях сложного неоднородного напряженного состояния, при котором реализуются несколько видов разрушения (отрыв, срез и квазипластическое деформирование при высоком давлении).


3. Рекомендуется усовершенствовать разработанный Международным обществом ISRM комплексный метод исследований прочностных свойств породного массива. С целью повышения представительности испытаний в отношении сложных режимов деформирования и характера разрушения, а также надежности определения параметров прочности для

характерных породных структур массива предлагается испытание образцов прямыми и косвенными методами дополнить испытаниями образцов неправильной формы сферическими инденторами. При этом объемные испытания образцов правильной формы используют для проверки и экспериментального обоснования данных испытаний инденторами.

4. В условиях, когда проведение комплексных испытаний не представляется возможным, для определения основных показателей прочности и деформируемости горных пород (пределов прочности при одноосном растяжении и сжатии, модулей упругости и общей деформации, коэффициента Пуассона) предлагается применять корреляционные зависимости, основанные на простейших сведениях о функциональных характеристиках монолитных образцов.

5. Предлагаемые подходы к исследованию механических свойств горных пород позволяют практически решить проблемы, связанные с отбором представительных проб на ранней стадии изучения месторождения при массовых испытаниях и обеспечением достаточно надежных исходных данных инженерных расчетов о свойствах пород.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 5, pp. 11–18
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02

Integrated experimental research of mechanical properties of rocks: Problems and solutions

Information about authors

M. D. Ilinov¹, Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, Ilinov_md@spmi.ru

V. A. Korshunov¹, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences

G. B. Pospekhov¹, Leading Researcher, Associate Professor, Candidate of Geological and Mineralogical Scientists

A. N. Shokov¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

From the standpoint of modeling of real-life rock mass processes, the main problems of mechanical rock testing are connected with the limitation of sampling and low quality of samples; with weak representativity of actual data to model rock mass structure, stresses strains, rock failure mechanism and testing conditions, as well as with the deficient information content of modern determination procedures. The authors put forward an integrated approach to the analysis of mechanical properties of rocks, within which the tests are accompanied by the models of deformation and failure processes running in a real-life rock mass. In particular, it is recommended to model stress redistribution in a sample similar to the complex nonuniform stress state of rock mass, when a number of types of failure materialize (tension, shear and quasi-plastic deformation under high pressure). It is necessary to modify the approach to the rock mass strength assessment by plotting a family of failure envelopes for representative rock mass structures using the pooled data of integrated direct, indirect and correlation methods of sample properties determination. To this effect, the tests of the regular shape samples should

be supplemented by the tests of the irregular shape samples using spherical indenters, to provide a complete set of strength characteristics of representative rock structures. When it is impossible to carry out the integrated testing, it is recommended to find basic characteristics of strength and deformability of rocks from correlation dependences based on the elementary information on functional characteristics of monolith samples.

Keywords: modeling, rock mass, monolith rock, fractured rock, fracture, strength, residual strength, spherical indenter, direct testing, indirect testing.

References

- Muller L. Rock mass behavior—Determination and application in engineering practice. *Advances in rock mechanics : Proceedings of the Third Congress of the International Society for Rock Mechanics*. Denver, 1974. pp. 205–215.
- Kyznetsov G. N. Mechanical properties of rocks. Ground control : Problems and methods. Moscow : Ugletekhizdat, 1947. 180 p.
- Goncharov I. G. Strength of stone materials in different stress state. Leningrad—Moscow : Gosstroyizdat, 1960. 124 p.
- Yagodkin G. I., Mokhnachev M. P., Kuntyshev M. F. Strength and deformability of rocks in loading. Moscow : Nauka, 1971. 148 p.
- Kartashov Yu. M., Matveev B. V., Mikheev G. V., Fadeev A. B. Durability and deformability of rocks. Moscow : Nedra, 1979. 269 p.
- Stavrogin A. N., Protosenya A. G. Rock deformation and fracture mechanics. Moscow : Nedra, 1992. 224 p.
- Protodyakonov M. M., Voblikov V. S., Ilitskaya E. I. Strength testing procedure for irregular shape rock samples. Moscow : IGD im. A. A. Skochinskogo, 1961. 8 p.
- Tien Tai Nguyen, Ngoc Anh Do, Karasev M. A., Dang Van Kien, Dias D. Influence of tunnel shape on tunnel lining behavior. *Geotechnical Engineering*. 2021. Vol. 174, Iss. 4. pp. 355–371.
- Gospodarikov A. P., Trofimov A. V., Kirkin A. P. Evaluation of deformation characteristics of brittle rocks beyond the limit of strength in the mode of uniaxial servohydraulic loading. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 539–548.

10. Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013. Vol. 5, Iss. 4. pp. 249–261.
11. Sulukcu S., Ulusay R. Evaluation of the block punch index test with particular reference to the size effect, failure mechanism and its effectiveness in predicting rock strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2001. Vol. 38, Iss. 8. pp. 1091–1111.
12. Bieniawski Z. T. Estimating the strength of rock materials. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1974. Vol. 74, No. 8. pp. 312–320.
13. Singh H. K., Basu A. Evaluation of existing criteria in estimating shear strength of natural rock discontinuities. *Engineering Geology*. 2018. Vol. 232. pp. 171–181.
14. Glushikhin F. P., Kuznetsov G. N., Shklyarskiy M. F., Pavlov V. N., Zolotnikov M. S. Modeling in geomechanics. Moscow : Nedra, 1991. 240 p.
15. Karasev M. A., Nguyen T. T. Method for predicting the stress state of the lining of underground structures of quasi-rectangular and arched forms. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 807–821.
16. Zuev B. Yu., Zubov V. P., Fedorov A. S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. *Eurasian Mining*. 2019. No. 1. pp. 8–12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02
17. Ignatyev S. A., Sudarikov A. E., Imashev A. Z. Modern Mathematical Forecast Methods of Maintenance and Support Conditions for Mining Tunnel. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 238. pp. 371–375.
18. Fisenko G. L. Methods of quantitative evaluation of structural weakening in rocks in the rock stability analysis. *Current Problems of Rock Mechanics : The Fourth All-Russian Conference on Rock Mechanics*. Leningrad : Nauka, 1972. pp. 21–29.
19. Labuz J. F., Arno Zang. Mohr–Coulomb Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012. Vol. 45, Iss. 6. pp. 975–979.
20. Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013. Vol. 5, No. 4. pp. 249–261.
21. Tarasov B. G. Deformation and failure patterns in rocks in high pressure : Thesis of Dissertation ... of Doctor of Engineering Sciences. Saint-Petersburg. 46 p.
22. Pankov I. L., Morozov I. A. Salt Rock Deformation under Bulk Multiple-Stage Loading. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239. pp. 510–519.
23. Protosenya A. G., Iovlev G. A. Prediction of spatial stress–strain behavior of physically nonlinear soil mass in tunnel face area. *GIAB*. 2020. No. 5. pp. 128–139.
24. Ladanyi B., Archambault G. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. *Rock Mechanics: Theory and Practice : Proceedings of the 11th Symposium on Rock Mechanics*. Berkeley, 1969. pp. 105–125.
25. Eberhardt E. The Hoek–Brown Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012. Vol. 45, Iss. 6. pp. 981–988.
26. Protodyakonov M. M. Generalized equation of the Mohr envelopes. *Analysis of Physical and Mechanical Properties of Rocks in the Context of Ground Control : Collected Works*. Moscow : Izdatelstvo Akademii nauk SSSR, 1962. pp. 82–89.
27. Thanh Nguyen Chi, Gospodarikov A. Hyperstatic reaction method for calculations of tunnels with horseshoe-shaped cross-section under the impact of earthquakes. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2020. Vol. 19, No. 1. pp. 179–188.
28. Korchak P. A. Geomechanical prediction of growth of brittle fracture zones in the vicinity of underground excavations in over-stress rock mass. *GIAB*. 2021. No. 5. pp. 85–98.
29. Patton F. D. Multiple modes of shear failure in rock. *Proceedings of the 1st Congress of the International Society of Rock Mechanics*. Lisbon, 1966. Vol. 1. pp. 509–513.
30. Chirkov S. E. Influence of size effect on coal strength. Moscow : Nauka, 1969. 114 p.
31. Alekseev A. V., Iovlev G. A. Adjustment of hardening soil model to engineering geological conditions of Saint-Petersburg. *GIAB*. 2019. No. 4. pp. 75–87.
32. Mikheev G. V. Solid Rock Strength and Deformability. Analysis and Express-Method : Theses of Dissertation of Candidate of Engineering Sciences. Leningrad, 1972. 22 p.
33. Franklin J. A. Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1985. Vol. 22, Iss. 2. pp. 51–60.
34. Yakubovskiy M. M., Mikhailova E. A., Bazhukov A. A. Reasons of efficiency of surface miners in selective coal cutting under low temperatures. *GIAB*. 2021. No. 10. pp. 42–57.
35. Pavlovich A. A., Korshunov V. A., Bazhukov A. A., Melnikov N. Ya. Estimation of Rock Mass Strength in Open-Pit Mining. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239. pp. 502–509.

Сибирская угольная энергетическая компания – российская топливно-энергетическая компания, крупнейшая в стране и одна из ведущих в мире производителей и поставщиков угля, добывает более 110 млн т угля в год на 8 шахтах и 19 разрезах, расположенных в Сибири и на Дальнем Востоке. Географическое положение месторождений, разрабатываемых предприятиями компании, предопределяет разнообразие горно-геологических условий их разработки. Основным принцип успешного функционирования угледобывающего производства – широкое внедрение современных научных исследований в горном деле, базирующийся на использовании собственного инженерно-технического потенциала и привлечении ведущих ученых горного профиля институтов и университетов России, в частности Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета.

В прошедшие десятилетия специалистами Научного центра и компании выполнялись оригинальные исследования по научному сопровождению ведения горных работ в целях обеспечения эффективной и безопасной отработки запасов шахтных полей, а также разработка комплексного методического сопровождения оптимизации технологических схем проведения и крепления горных выработок с целью увеличения темпов проходки. Перспективными являются исследования по обоснованию безопасности гидроотвалов, попадающих в зону подработки, а также подземных горных работ под обводненными намывными техногенными массивами. Кроме того, в свете решения проблемы закрытия нерентабельных шахт заслуживает внимания изучение деформаций поверхности и массива при затоплении горных выработок. При выполнении научных исследований использовалась современная методология, базирующаяся на оригинальных методах геодинамического анализа и прогнозирования, включая 3D-численное моделирование.

Мы планируем продолжить в 2023–2024 гг. сотрудничество с Санкт-Петербургским горным университетом по направлению «Геодинамические исследования» для решения различных геомеханических и газодинамических задач подземной разработки угля на шахтах компании. Для изучения деформационных процессов на подрабатываемых поверхностях шахт планируется использовать методы космической геодезии и численного моделирования.

А. А. Мешков,
технический директор
Сибирской угольной энергетической компании