

УДК 531; 550.8; 624.1

д.т.н. Литвинский Г.Г.  
(ДонГТУ, г.Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)

## СЛОИСТОСТЬ И АНИЗОТРОПИЯ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

*Рассмотрена проблема учета слоистости и анизотропии прочности скальных массивов и горных пород. Показаны пути определения диаграммы прочности горных пород при одноосном сжатии и растяжении. Изучены вопросы паспорта прочности слоистой породы. Предложен алгоритм построения эпюры прочности на породном контуре горной выработки произвольной формы с учетом слоистости горных пород.*

**Ключевые слова:** горная порода, скальный массив, анизотропия прочности, полярная диаграмма прочности, паспорт прочности, породный контур, эпюра прочности.

*Строительство в скальных породах, которое совсем недавно считалось строительным искусством и было чуть ли не прерогативой практиков, теперь становится точной наукой.*

Леопольд Мюллер, "Der Felsbau", 1971

Массивы горных пород (ГП) обладают сложным иерархичным строением и отличаются особенностями залегания и степенью нарушенности (трещиноватостью и блочностью) слагающих горных пород, а также показателями геомеханического (действующие силы, напряжения и деформации гравитационного, тектонического и техногенного происхождения) и физического (эрозионные процессы и др.) состояния.

Важнейшей особенностью массивов ГП является их неоднородность: деформации сосредотачиваются преимущественно в ослабленных элементах структуры массива (в трещинах, на контактах и др.), в меньшей мере деформируются монолитные блоки ГП, ограниченные трещинами. Разрушение пород происходит, как правило, с образованием в направлениях действия эффективных значений касательных напряжений сдвиговых поверхностей скольжения, которые по своим концам вызывают продольные трещины разрыва вдоль максимального сжимающего напряжения. Сопротивление таким сдвигам обусловлено во многом сопротивлением разрушению ГП по структурным неоднородностям [1].

В случаях близкой взаимной ориентировки сдвиговых поверхностей ослабления в скальном массиве развитие в нем деформаций и его разрушение происходит преиму-

щественно в плоскости этого ослабления. Для осадочных пород такими плоскостями ослабления часто являются контакты между слоями или преобладающая система сдвиговой или разрывной трещиноватости.

Поскольку генезис большинства месторождений полезных ископаемых связан с осадочными породами, особую важность представляет изучение присущих всем типам таких пород структурных неоднородностей в виде слоистости, под которой понимают строение горных пород в виде налегающих один на другой слоёв, различающихся различными признаками (минеральным составом, цветом, структурой, т.е. строением и распределением частиц и др.).

Согласно Л.В. Пустовалову [2], структура выражает зернистость породы и определяется ею, а текстура — та сторона строения, которая выражается расположением зерен и определяется им, т.е. это слоистое или неслоистое расположение зерен (текстура в узком смысле слова) и степень укладки, или упаковки зерен.

На рисунке 1 представлены основные типы слоистости ГП согласно [2], из которого следует, что необходимо различать четыре основных морфологических типа слоистости: горизонтальная, волнистая, косоволнистая и косая.

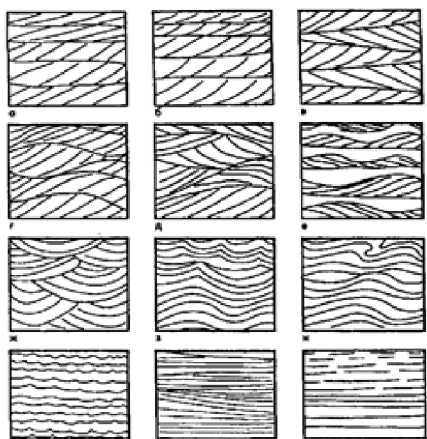


Рисунок 1 – Основные типы слоистости осадочных пород [2]

Для Донбасса к наиболее характерным типам слоистости пород можно отнести 4-й тип — горизонтально-волнистую слоистость: полого-косую (косо-горизонтальную), и строго горизонтальную (непрерывную и прерывистую).

Масштаб слоистых текстур выражается порядком их толщины: декаметровая, метровая, дециметровая, сантиметровая, миллиметровая и микрослоистость. Слоистость разных порядков присуща не только осадочным, но и магматическим и метаморфическим породам (рис. 2).

Исследованиями механических свойств слоистых пород занимались многие исследователи [3-5 и др.], которыми были установлены важные закономерности изменения деформационных и прочностных свойств пород с учетом влияния на них слоистости. Однако все же нельзя считать эти исследования исчерпывающими.



Рисунок 2 – Пример слоистости метаморфических пород

Остались недостаточно полно рассмотренными или оказались вне поля зрения исследователей ряд важных проблем изучения прочностных и деформационных показателей слоистых и трещиноватых пород. Так, недостаточно полно изучены вопросы изменения свойств слоистых ГП при разных сочетаниях параметров ослабления, не получил теоретического обоснования коэффициент структурного ослабления трещиноватых пород, нет ясного понимания, как изменяется паспорт прочности слоистой породы в области обобщенного сжатия и растяжения и, наконец, как использовать эти понятия при оценке устойчивости контура ГВ в слоистом скальном массиве и др. Особенно это важно в настоящее время, когда масштабы подземного строительства и добычи полезных ископаемых все увеличиваются, а условия ведения горных работ по мере роста глубин разработок постоянно усложняются. Поэтому исследования по изучению вопросов определения механических свойств скальных массивов, направленные на обоснование проектных и производственных решений и практических задач горной геомеханики становятся все более актуальными.

**Цель исследования** состоит в изучении влияния слоистости ГП на прочностные их показатели для оценки устойчивости горных выработок. **Объект** исследования — прочность слоистых горных пород, а **предмет** исследования — изучение влияния слоистости на прочность и построение паспорта прочности. **Задачи** исследования — обосновать необходимость учета слоистости при проектировании и строительстве горных выработок.

**Основная идея** исследования состоит в использовании паспортов прочности слоистых горных пород для учета устойчивости горных выработок.

Многочисленные экспериментальные испытания слоистых пород показали, что их прочность существенно зависит от угла  $\beta$  приложения нагрузки по отношению к направлению слоистости (рис. 3).

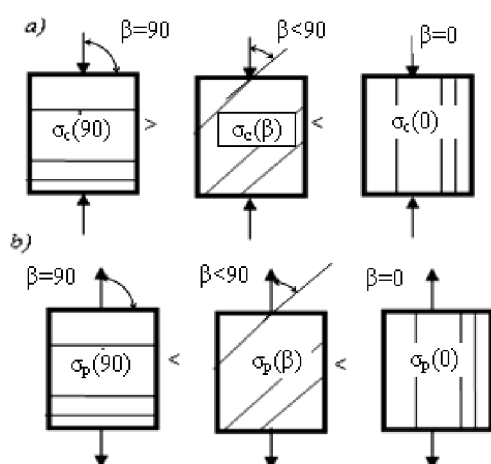


Рисунок 3 – Одноосное сжатие (а) и растяжение (б) пород под разными углами  $\beta$  к слоистости

Обозначим прочность горной породы на одноосное сжатие  $\sigma(\beta)_c$ , а на одноосное растяжение как  $\sigma(\beta)_p$ ,  $0 < \beta < 90^\circ$  – угол между плоскостью слоистости и направлением приложенного напряжения.

Если провести нагружение одной и той же слоистой породы под разными углами  $\beta$  к слоистости, то предел прочности может изменяться в несколько раз. Здесь угол  $\beta$  показывает направление приложения напряжений по отношению к слоистости образца. Поэтому при  $\beta = 0^\circ$  напряжения действуют вдоль слоистости, а при  $\beta = 90^\circ$  – перпендикулярно слоистости.

При этом, как правило, выполняются неравенства (рис. 3):

а) для сжатия

$$\sigma_c(90) > \sigma_c(0) > \sigma_c(\beta < 90);$$

б) для растяжения

$$\sigma_p(90) < \sigma_p(0) < \sigma_p(\beta < 90).$$

Эти соотношения позволяют судить о сопротивлении пород разрушению, если их нагружение производят под разными углами  $0 < \beta < 90$  к слоистости.

Если производить испытания пород, постепенно меняя угол наклона нагрузки к слоистости, то можно получить зависимость прочности от угла  $\beta$  наклона напряжений к слоистости. Эти зависимости удобно представлять в виде полярной диаграммы прочности ГП (рис. 4).

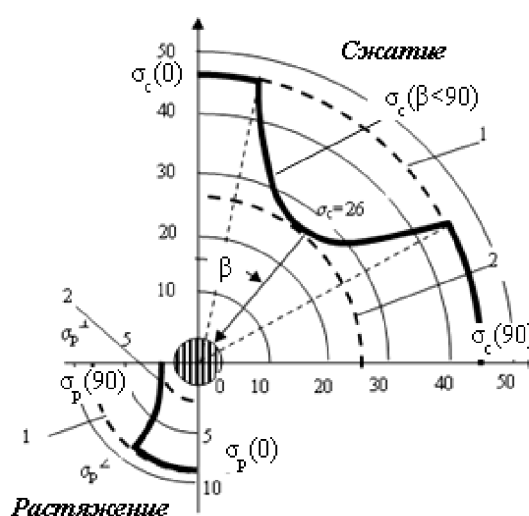


Рисунок 4 – Полярная диаграмма прочности на одноосное сжатие и растяжение слоистого аргиллита

Чтобы получить полярную диаграмму прочности слоистой породы следует провести достаточно трудоемкие лабораторные испытания. Для этого партию образцов испытываемой породы изготавливают так, чтобы получить наборы образцов (не менее, чем по 6-8 шт.), у которых были заданы определённые углы приложения нагрузки  $\beta$  к направлению их слоистости (например,  $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ) и подвергают их одноосному сжатию или растяжению.

После проведения испытаний на полярной диаграмме откладывают под углом  $\beta$  полученное значение прочности породы (рис. 4). Затем производят построение на полярной диаграмме с координатами  $\sigma_c - \beta$  и  $\sigma_p - \beta$  семейство точек, соответствующих прочности под разными углами к слоистости, и проводят по этим точкам кривую, которая и будет полярной диаграммой прочности горной породы.

Внимательнее изучим эту диаграмму. Координатная сетка здесь выглядит в виде концентрических дуг (прочности) и радиусов под углом  $\beta$ . В I-м квадранте представлена полярная диаграмма прочности на одноосное сжатие  $\sigma_c(0 < \beta < 90)$ , а в III-м квадранте – диаграмма прочности на одноосное растяжение  $\sigma_p(0 < \beta < 90)$ .

Если бы порода была однородной (без слоистости), то её прочность не зависела бы от полярного угла  $\beta$  и её анизотропия прочности отсутствует, т.е. порода идеально изотропна. Полярная диаграмма вырождается в обычные круговые дуги 1, показанные штриховыми линиями в I-м и III-м квадрантах.

Второй предельный случай – если порода равномерно по всем направлениям покрыта однородными системами трещин, тогда реализуется еще один случай изотропии прочности: по всем направлениям образца прочность равна прочности ослабления. Диаграмма вырождается к кругу минимальной равномерной прочностью на одноосное сжатие и растяжение в виде дуг 2, также показанные штриховыми линиями в I-м и III-м квадрантах.

Таким образом, прочность реальной породы с линейными плоскостями ослабления изменяется от максимальных 1 до минимальных 2 значений на диаграмме. Отметим, что масштабы для напряжений в I-м и III-м квадрантах диаграммы могут быть приняты для удобства пользования разными, например, для прочности на одноосное растяжение – значительно больше (в 5...10 раз), поскольку эта прочность для горных пород, как правило, в 10-20 раз меньше прочности на сжатие.

Зависимость прочности от слоистости можно графически отобразить и в обычной декартовой системе координат  $\beta - \sigma_c(\beta)$  и  $\beta - \sigma_p(\beta)$ , которая хотя и не столь наглядна, как полярная диаграмма, зато с ней удобнее работать (рис. 5).

Значительно сложнее решить задачу определения паспорта прочности слоистой ГП при произвольном напряженном состоянии, что требует многократно более трудных лабораторных испытаний с применением стабилометров и другого сложного оборудования. Возникает вопрос: неужели необходимо проводить многочисленные трудоемкие испытания большого числа образцов под разными углами к напластованию, чтобы построить диаграмму прочности? Ведь это длительная и затратная высококвалифицированная работа в сертифицированных лабораториях с дефицитным оборудованием.

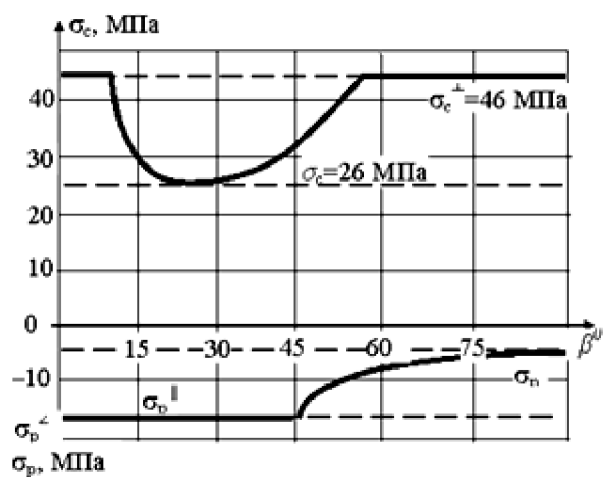


Рисунок 5 – Диаграмма прочности того же аргиллита в декартовых координатах

Оказывается, есть и более удобный способ определения прочности слоистой породы, который состоит в построении паспорта прочности диаграммы Мора для слоистой породы путем использования изотропных паспортов прочности ослабленного контакта и ненарушенной породы. Покажем, как следует для этого поступить путем достаточно простых последовательных графических построений.

Пусть нам известны паспорта прочности для изотропной породы без слоистости 1 и для породы, у которой прочность соответствует прочности поверхностей контакта 2. На диаграмме О. Мора они будут выглядеть как бы «вложенными» друг в друга паспортами прочности (рис. 6). Именно здесь заключена вся информация о поведении породы с плоскостями ослабления в виде слоистости при любых испытаниях. Для этого следует воспользоваться графическими свойствами диаграммы О. Мора, обходясь без громоздких аналитических расчётов.

Рассмотрим, как построить диаграмму прочности породы с поверхностями ослабления для заданного минимального напряжения  $\sigma_3$ . Это напряжение  $\sigma_3$  наносим на диаграмму Мора и строим предельный круг напряжений 3, который касается паспорта прочности 1 изотропной породы и пересекает паспорт прочности 2 с прочностными параметрами контакта.

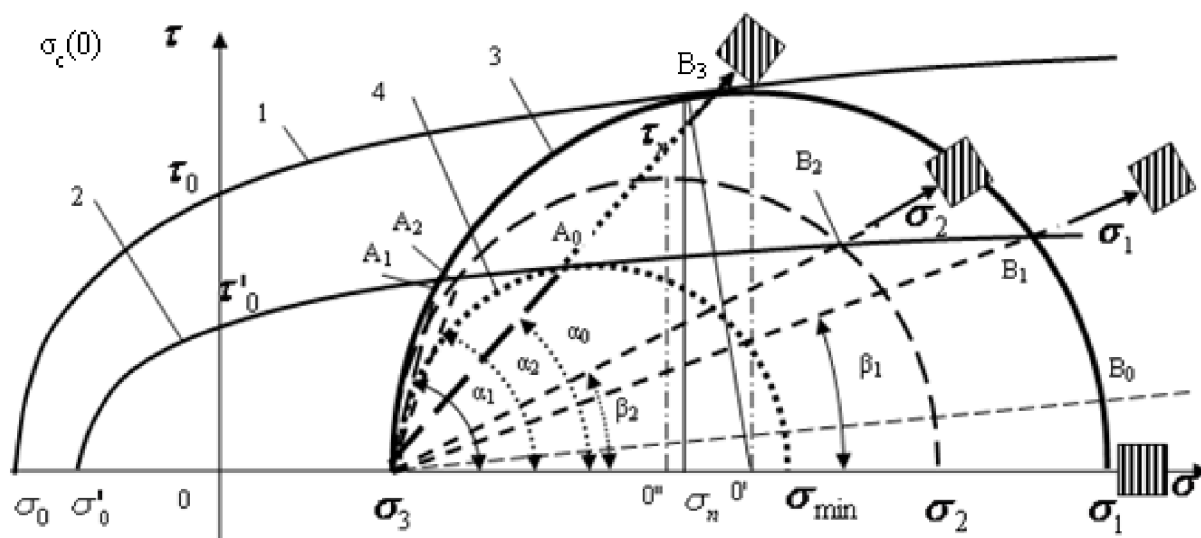


Рисунок 6 – Диаграмма паспорта прочности слоистой породы без (1) и со слоистостью (2) при заданном минимальном напряжении  $\sigma_3$

Сразу получаем важную информацию о влиянии слоистости на особенности разрушения породы. Для этого из точки  $\sigma_3$  как из полюса проведём характерные лучи до пересечения с кругом 3. Наиболее характерными лучами будут:

- луч под углом  $\beta_1$  в точку  $B_1$  пересечения круга  $\sigma_1$  и паспорта прочности 2 слоистости;
- луч под углом  $\beta_3$  в точку  $B_3$  пересечения круга  $\sigma_1$  и паспорта прочности 1 породы.

Луч под углом  $\beta < \beta_1$  показывает, что если приложить напряжение под углом  $\beta_1$  к нормали напластования, то точка  $B_0$  пересечения предельного круга 3 окажется под паспортом прочности 2, т.е. разрушения породы по плоскости ослабления невозможны. Но, поскольку точка  $B_0$  находится на предельном круге 3, разрушение будет происходить вне плоскости ослабления, т.е. как у изотропной (однородной) породы.

Начнём постепенно увеличивать угол  $\beta$ , это значит, что напряжение  $\sigma_1$  станет все более отклоняться от нормали к слоистости. Когда угол  $\beta$  станет равным  $\beta = \beta_1$  в точке  $B_1$  диаграммы, предельное состояние будет создано не только на предельном круге 3, но и на поверхности ослабления 2. Сразу заметим, что и с другой стороны предельного круга 1 мы видим точку

его пересечения  $A_1$  с лучом, которому соответствует угол  $\alpha_1$ , отсчитываемый от оси  $\sigma$  в том же направлении. Следовательно, при углах  $\alpha > \alpha_1$  прочность будет представлена предельным кругом 1 без учёта ослаблений, а при  $\alpha < \alpha_1$  прочность будет предопределяться паспортом слоистости 2.

Следовательно, мы получили из паспортов прочности, что в диапазоне углов приложения нагрузки  $\alpha > \alpha_1$  и  $\beta < \beta_1$  слоистость на прочность не влияет. Вне этого диапазона углов прочность предопределяется только слоистостью. Рассмотрим, как это можно учесть.

Для этого построим паспорт прочности для произвольной точки  $\beta > \beta_1$ , т.е. на участке влияния слоистости на прочность, например, при  $\beta = \beta_2 > \beta_1$ . Проведём луч под углом  $\beta_2$  до пересечения с предельной кривой слоистости 2 в точке  $B_2$  и построим предельный круг прочности, который проходит через точки  $B_2$ ,  $A_2$ ,  $\sigma_3$  и центр которого лежит в точке  $O''$  (показан пунктиром). Следовательно, когда максимальное напряжение действует под углом  $\beta_2$  к слоистости, прочность равна  $\sigma_2$ , т.е. значению напряжения, в котором предельный круг пересекает ось  $\sigma$ .



Обратим внимание на то, что наш предельный круг пересекает паспорт прочности слоистости ещё в одной точке –  $A_2$ . Этому пересечению соответствует угол приложения максимального напряжения под углом  $\alpha_2$  к слоистости. Таким образом, мы определили ещё одну точку на полярной диаграмме, где прочность будет равна  $\sigma_2$ . Так, последовательно изменяя угол наклона  $\beta$ , мы определяем ему соответствующую прочность, задаваемую паспортом слоистости, одновременно находя для этой прочности и соответствующий угол  $\alpha$ , характеризующий наклон главного напряжения относительно направления слоистости.

Сразу можно на основе таких построений найти и критический угол  $\alpha_m = \beta_m$ , соответствующий касанию предельного круга 4 в точке  $A_0$  и показывающий минимальную прочность  $\sigma_{min}$ , вызванную наличием плоскостей ослабления.

Для случая растяжения слоистой породы нами впервые построена диаграмма паспорта прочности с позиций аналитической теории прочности с учетом его нелинейного поведения, вызванного появлением на сдвиговых площадках разрушения участков жидкостного трения, ответственных за пластические свойства породы при ее нагружении. На рисунке 7 показаны основные элементы построения такой диаграммы для одноосного растяжения.

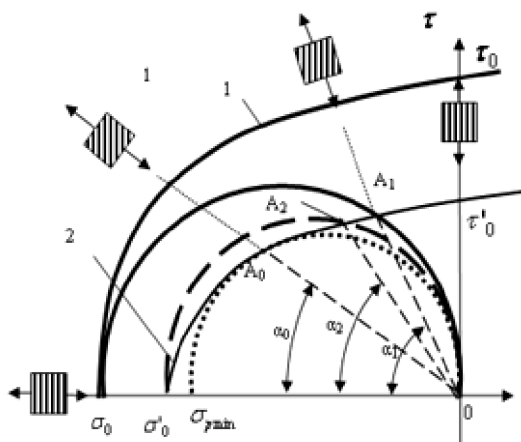


Рисунок 7 – Диаграмма паспорта прочности слоистой породы при растяжении с заданным максимальным напряжением  $\sigma_1 = 0$

Обратим внимание на особенности такого построения. Как видно из рисунка 7, предельный круг для одноосного растяжения касается паспорта прочности породы 1 и пересекает паспорт прочности слоистости 2 в единственной точке  $A_1$ , находящейся под углом  $\alpha_1$  к нормали слоистости. Поэтому в диапазоне от  $90^\circ$  до  $\alpha_1$  прочность на растяжение не зависит от слоистости и равна  $\sigma_0$  (в данном конкретном случае).

Когда угол  $\alpha < \alpha_1$ , начинается область, где прочность на растяжение предопределяется слоистостью. После того, как угол  $\alpha < \alpha_0$ , прочность достигает своего минимума, равного прочности на отрыв перпендикулярно плоскости слоистости.

Таким образом, мы получили особенности изменения прочности слоистого материала в зависимости от наклона главных площадок относительно слоистости. Безусловно, вместо графического метода можно было привести соответствующие аналитические выражения, однако они достаточно громоздки и менее наглядны.

Важным преимуществом предложенного подхода является отсутствие ограничений на вид паспортов прочности материала и параметров прочности на поверхности слоистости. И если ранее подобные диаграммы строились лишь для одноосного нагружения и линейных паспортов прочности, сейчас появилась возможность оценить несущую способность слоистой среды даже в условиях объёмного произвольного нагружения и для реальных нелинейных паспортов ГП, которые впервые описаны в [1].

Не представляет особого труда определить прочность не только слоистого материала, но и содержащего иные неоднородности, вызывающие ослабления прочности по произвольным поверхностям внутри материала.

Особенно важен случай, когда в породе имеются неоднородности в виде одной или нескольких систем трещин. Тогда следует учесть каждую систему трещин в терминах структурной геомеханики, т.е. определить сплошность (повреждённость), которая характеризует эту систему, а затем можно

оценить, как изменяется прочность по разным направлениям нагружения относительно плоскости трещин.

В качестве практического примера использования анизотропии прочности рассмотрим прочность породного контура прямоугольной горной выработки (эпюру прочности), пройденной в слоистом массиве с углом падения  $25^0$  (рис. 8).

Породы на контуре горной выработки находятся в плосконапряженном (напряжение, нормальное к контуру  $\sigma_3=0$ ) и плоско деформированном (деформация вдоль оси выработки  $\varepsilon_3=0$ ) напряженном состоянии. Главное нормальное напряжение, параллельное контуру незакреплённой выработки  $\sigma_\theta=\sigma_1$ , предопределяет устойчивость контура. Это позволяет определить угол наклона главных площадок по отношению слоистости. Для заданного угла падения  $25^0$  слоистость в боках наклонена к главным площадкам под углом  $65^0$ , а в кровле и почве под углом  $25^0$ .

По полярной диаграмме анизотропии на рисунке 6 определяем в боках выработки прочность на сжатие  $\sigma_c(65^0) = 40$  МПа и на растяжение  $\sigma_p(65^0) = 3$  МПа, соответственно в кровле и почве получим  $\sigma_c(25^0) = 28$  МПа и  $\sigma_p(25^0) = 8$  МПа.

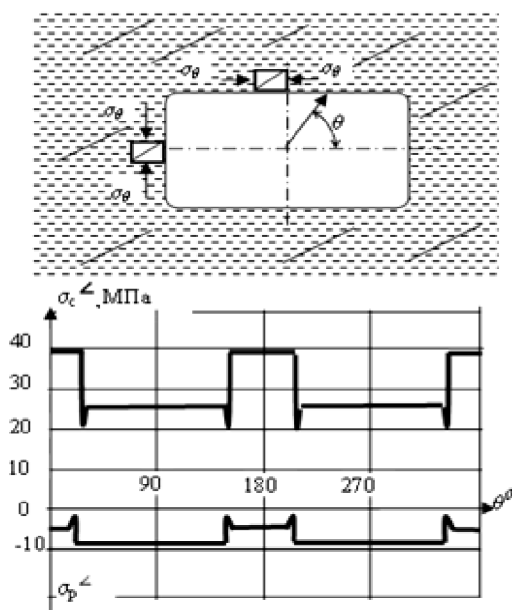


Рисунок 8 – Эпюра прочности слоистой породы на контуре выработки

Поскольку на каждой из сторон выработки угол между напряжениями и слоистостью не меняется, эпюра прочности имеет кусочно-прямолинейный вид. При этом на контуре прямоугольной формы имеются 4 сингулярных точки, где прочность породы является неопределенной, поскольку здесь площадки главных напряжений не имеют заданной ориентации.

Поэтому в углах выработки происходит быстрое изменение направления главных площадок на  $90^0$ , возникает вопрос: и какое значение прочности взять? Ясно, что самым опасным будет случай минимальной прочности, которую и следует принимать в расчётах. На эпюре прочности в углах заметны пиковые минимальные значения прочности на одноосные сжатие и растяжение, что делает эти участки контура самыми потенциально опасными по разрушению.

Следовательно, несмотря на то, что выработка расположена в одной и той же однородной породе (например, в песчанике, аргиллите и т.д.), но если эта порода слоистая, то на разных участках контура прочность этой породы может существенно различаться. Соответственно это приводит к значительному изменению устойчивости пород на контуре, на что зачастую на практике не обращают внимание и не могут объяснить непонятное с первого взгляда поведение пород [6].

В настоящее время в качестве исходных данных для проектирования строительства горных объектов в скальных породах используют данные лабораторных испытаний горных пород, полученных при бурении разведочных скважин. При этом ограничиваются определением лишь прочности на одноосные сжатие и растяжение породы перпендикулярно слоистости. Как следует из вышеизложенного, такая практика является совершенно недопустимой и может привести к появлению ошибок проектирования первого (когда устойчивость породного контура завышена) и второго (когда она недооценена) рода. И если ошибки первого рода приводят к непрогнозируемому разрушению подземных объектов, то ошибки второго рода, хотя

и остаются незамеченными, создавая иллюзию удовлетворительного состояния пород, однако скрывают в себе неоправданно завышенные запасы прочности конструкций, что ведет к излишним расходам трудовых и материальных ресурсов.

Вышеизложенное заставляет настоятельно рекомендовать изменить нормативные документы проектирования подземных объектов и учитывать реальные деформационно-прочностные показатели горных пород с учетом важных параметров анизотропии их свойств.

Таким образом, полученные результаты позволяют горному инженеру в проектных и производственных организациях:

- 1) определять деформационно-прочностные параметры слоистых горных пород;
- 2) использовать диаграмму паспортов прочности для оценки и учета влияния слоистости и поверхностей ослаблений, снизить трудоемкость испытаний слоистых пород;
- 3) с помощью предложенной методики учитывать влияние на прочность пород произвольных систем трещин в скальных массивах;
- 4) строить эпюру прочности породного контура вокруг выработки произвольной формы;
- 5) повысить надежность и эффективность проектирования подземного строительства.

#### Библиографический список

1. Литвинский Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов : монография / Г. Г. Литвинский. — Донецк : Норд-Пресс, 2008. — 207 с.
2. Пустовалов Л. В. Петрография осадочных пород : учебное пособие / Л. В. Пустовалов. — М. : Гостоптехиздат, 1940. — Ч. II. — 420 с.
3. Глушихин Ф. П. Моделирование в геомеханике / Ф. П. Глушихин, Г. Н. Кузнецов, М. Ф. Шклярский, В. Н. Павлов, М. С. Золотников. — М. : Недра, 1991. — 240 с.
4. Мюллер Л. Инженерная геология. Механика скальных массивов / Л. Мюллер. — М. : Мир, 1971. — 236 с.
5. Рац М. В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород / М. В. Рац, С. Н. Чернышев. — Москва : Недра, 1970. — 164 с.
6. Шкурский Е. Ф. Шахтная геология : учебное пособие / Е. Ф. Шкурский. — Алчевск : ДонГТУ, 2007. — 145 с.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонНТУ Борщевским С.В.,  
к.т.н., доц. ДонГТУ Мележиком А.И.**

Статья поступила в редакцию 25.11.15.

**д.т.н. Литвинський Г. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, ligag@ya.ru)**

#### ШАРУВАТИСТЬ І АНІЗОТРОПІЯ МІЦНОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Розглянута проблема урахування шаруватості і анізотропії міцності скельних масивів і гірських порід. Показано шляхи визначення діаграми міцності гірських порід при одновісному стисненні і розтягуванні. Вивчено питання паспорта міцності шаруватої породи. Запропоновано алгоритм побудови епюри міцності на породному контурі гірничої виробки довільної форми з урахуванням шаруватості гірських порід.

**Ключові слова:** гірська порода, скельний масив, анізотропія міцності, полярна діаграма міцності, паспорт міцності, породний контур, епюра міцності.

**Ph.D. Litvinsky G.G. (DonSTU, Alchevsk, LPR, ligag@ya.ru)**

#### STRATIFICATION AND ANISOTROPY STRENGTH OF ROCK

The problem of the stratification and anisotropy of the rock strength is studied. The ways of determining the strength of rock under uniaxial compression and tension are showed. The issue of certificate of layered rock has been studied. An algorithm for constructing a strength diagram basing the rock contour of free shape working considering rock stratification.

**Key words:** rock, rock massif, anisotropy of strength, layered rock, polar diagram of strength, certificate of rock strength, rock contour, strength diagram.