

## ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УГЛОВ ПАДЕНИЯ ТРЕЩИН ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ

В ряде работ [4] верхняя часть геологического разреза рассматривается с геомеханических позиций как зона хрупкой деформации земной коры, которая находится в предельно напряженном состоянии. Мощность зоны хрупкой деформации составляет 300-400 м. Главная особенность зоны хрупкой деформации состоит в том, что помимо тектонических трещин, связанных со структурами разрушения (разломами), в ней развита сеть тектонических трещин предразрушения (допредельных трещин). Эти трещины не нарушают сплошность массива (не разделяют его на отдельные блоки), но образуют взаимосвязанную сеть трещин. Эти трещины предопределяют гидрогеологические и инженерно-геологические свойства массивов скальных пород. В скальных массивах палеозойского и более древнего возраста практически все трещины, обладающие эффективным раскрытием, следует рассматривать как современные тектонические трещины.

Распределение напряжений в зоне хрупкой деформации описывается линейным критерием предельно напряженного состояния (ЛК ПНС), который представляет собой преобразованный паспорт прочности горных пород (условие Кулона-Мора). Участок паспорта прочности, описывающий развитие хрупкой деформации, ограничивается пределами применимости ЛК ПНС, которые выражаются аналитическими зависимостями [5]. Нижний предел соответствует условиям одноосного сжатия. При одноосном сжатии максимальное сжимающее напряжение ( $\sigma_1$ ) обозначается как  $R_{oc}$ , а минимальное напряжение ( $\sigma_3$ ) -  $R_p$ . Верхний предел применимости ЛК ПНС наступает при  $\sigma_1 = R_n$  (рис. 1). В расчётах используется величина  $\bar{\sigma}_1 = \sigma_1/R_c$ . При использовании этого подхода удобно использовать относительную величину  $\bar{\sigma}_1 = \sigma_1/R_c$ . При использовании этого подхода появляются величины  $\bar{R}_{oc}$ ,  $\bar{R}_n$ . Значения  $\bar{R}_n$  определяются через коэффициент бокового отпора ( $\lambda$ ), который, в свою очередь связан с углом внутреннего трения ( $\phi$ ). Основные аналитические зависимости обоснованы в работах [4, 5]:

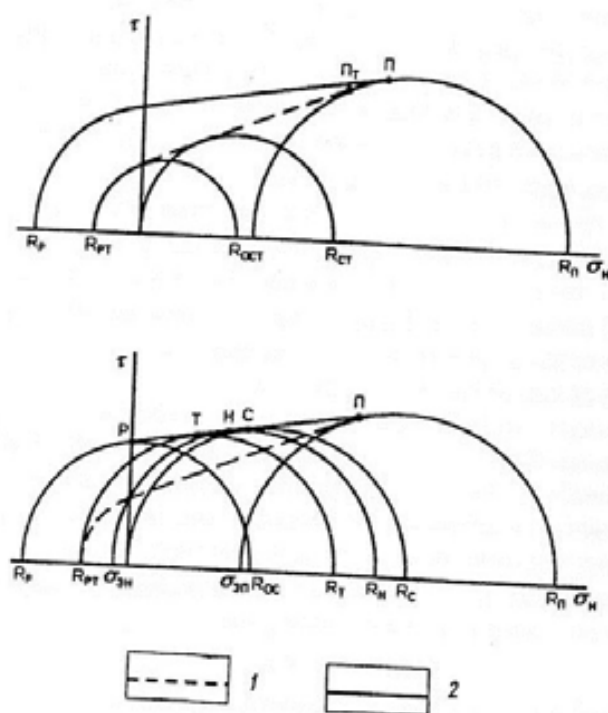


Рис. 1. Паспорт образования трещин (1) и характерные точки паспорта прочности (2)

$$R_p = -\lambda R_{oc}; \quad (1)$$

$$\lambda = \operatorname{tg}^2(\pi/4 - \varphi/2); \quad (2)$$

$$R_{oc} = R_c/2; \quad (3)$$

$$\overline{R}_n = 1/(1 - \lambda); \quad (4)$$

$$R_c/R_n = 1 - \lambda. \quad (5)$$

Паспорт прочности позволяет оценивать угол между сколовой трещиной разрушения и направлением действия максимального сжимающего напряжения. Угол скола ( $\alpha$ ) связан с углом внутреннего трения горных пород ( $\varphi$ ) и оценивается величиной  $45^\circ - \varphi/2$ .

Многочисленными экспериментами установлено [2], что в условиях испытаний вблизи верхней границы применимости ЛК ПНС трещины предразрушения возникают при нагрузках близких к разрушающим, и тяготеют к зоне развивающегося разлома. Материалы испытаний при соотношениях  $\overline{\sigma}_1 = \overline{R}_{oc} \div \overline{R}_n$  показывают, что напряжения образования трещин ( $\sigma_T$ ) варьируются в пределах 0,5-1,0 от разрушающих нагрузок. Важно отметить, что данные лабораторных испытаний на деформацию образцов горных пород позволяют считать, что при одноосном сжатии трещины предразрушения начинают возникать, когда напряжения достигают половины от разрушающих. Таким образом, в качестве расчётной модели принимается [4]  $R_{pt} = 0,5 \cdot R_p$ . Опираясь на данное условие, можно построить зависимость  $\tau_T$  от  $\sigma_{HT}$ , т. е. определить связь касательных ( $\tau_T$ ) и нормальных ( $\sigma_H$ ) напряжений, при превышении которых начинается образование трещин. Иначе эту зависимость можно называть паспортом образования трещин. Данный паспорт удобно строить, опираясь на два основных параметра –  $R_{pt}$  и  $R_n$ , которые являются пределами паспорта образования трещин (см. рис. 1).

Паспорт образования трещин можно рассматривать как касательную к двум кругам напряжений. Левая часть паспорта образования трещин описывается кругом напряжений  $\sigma_1 = R_{oc}$  и  $\sigma_3 = R_{pt}$  (часть круга от  $\sigma_H = R_{pt}$  до  $\sigma_H = 0$ ). Центральная часть подчиняется линейному закону (собственно касательная):

$$\tau_T = \sigma_{HT} \cdot \operatorname{tg}\varphi_T + C_T, \quad (6)$$

Правая часть от точки касания прямой с предельным кругом напряжений (точка "Пт") до верхнего предела (точка "П") описывается участком предельного круга напряжений.

Опираясь на паспорт образования трещин, можно оценить параметры допредельных трещин. Смещение круга напряжений из правого предельного состояния в левое можно охарактеризовать последовательными этапами развития несквозных (допредельных) трещин. Этапы развития несквозных трещин следует разделять положениями круга напряжений, которые определяются точками касания паспорта прочности и при дальнейшем изложении будут называться характерными точками (см. рис. 1). Крайняя правая точка будет называться "точка П" (предельная). Следующая (слева) точка отражает положение круга напряжений при  $\sigma_1 = R_c$  и  $\sigma_3 = 0$  и характеризует момент перехода от сжатия к растяжению по оси  $\sigma_3$ . Эта точка будет обозначаться как "С".

Следующее характерное положение круга напряжений отражает условия, когда круг напряжений пересекает ось касательных напряжений в точке  $\tau = C_T$ . В этой точке  $\sigma_H = 0$ . Данный случай будет называться точкой "Н". Дальнейшее смещение круга напряжений приводит к положению, где  $\sigma_3 = R_{pt}$ . С этой точки начинается интенсивное развитие массовых трещин, включая самостоятельные трещины отрыва. Эта точка будет называться "Т". Достижение предела прочности на разрыв будет обозначаться как точка "Р" (см. рис. 1).

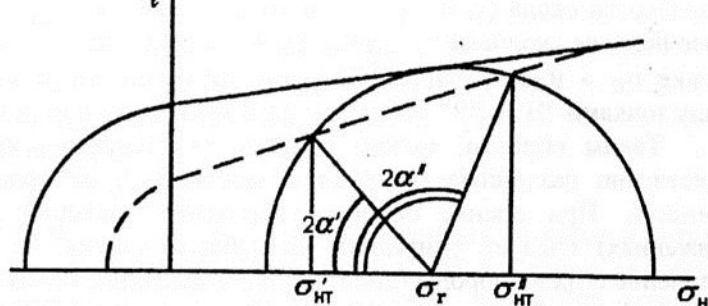
Необходимо учитывать, что паспорт образования трещин, кроме предельных состояний, пересекается кругом напряжений в двух точках, которые можно условно называть нижней и верхней (рис. 2, а). Для расчета необходимых характеристик следует вывести зависимости, позволяющие определять координаты точек пересечения паспорта образования трещин кругом напряжений.

Паспорт образования трещин состоит из трех участков (см. рис. 1). Центральная часть имеет форму прямой линии и в пределах  $\sigma_{HT} = 0$  до точки "Пт" описывается выражением (6).

Круги напряжений описываются уравнением вида

$$(\sigma_{HT} - \sigma_r)^2 + \tau_T^2 = r^2,$$

где  $r$  – радиус круга напряжений;  $\sigma_r$  – координаты центра круга на оси  $\sigma_H$ .



6

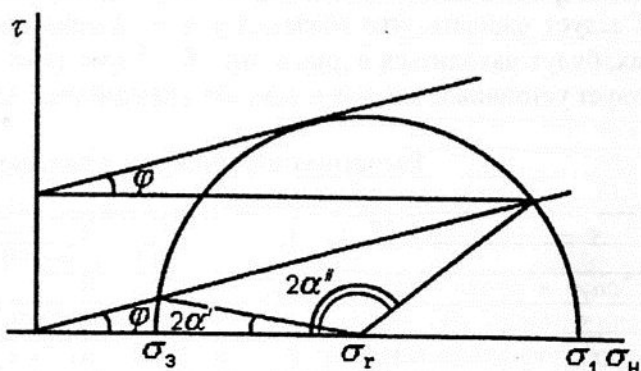


Рис. 2. Определение расчетных углов скола трещин:  
а – однородные породы; б – ослабленные зоны

В свою очередь,

$$r = (\sigma_1 - \sigma_3)/2, \quad (8)$$

$$\sigma_r = (\sigma_1 + \sigma_3)/2. \quad (9)$$

Совместное решение уравнений, описывающих указанные участки паспорта образования трещин, позволило получить следующее выражение:

$$\sigma_{HT} = [(2\sigma_r - 2\text{tg}\varphi_T C_T) \pm \sqrt{(2\sigma_r - 2\text{tg}\varphi_T C_T)^2 - 4(1 + \text{tg}^2\varphi_T)(\sigma_r^2 + C_T^2 - r^2)}] / 2(1 + \text{tg}^2\varphi_T). \quad (10)$$

Необходимо отметить, что в нижней точке  $\sigma_{HT}$  ( $\bar{\sigma}'_{HT}$ ) определяется при знаке “-” перед корнем, а верхняя ( $\bar{\sigma}''_{HT}$ ) – при знаке “+” (см. рис. 2, а). Из рисунка следует:

$$\cos 2\alpha = (\sigma_r - \sigma_{HT}) / r. \quad (11)$$

Данные, полученные в результате расчетов (табл. 1), позволяют проследить основные закономерности образования и развития трещин в зависимости от положения круга напряжений на паспорте прочности. Для состояния “П”, при котором начинаются образование трещин, диапазон расчетных углов скалывания относительно невелик. При положении круга напряжений в состоянии “С” и “Н” диапазон расчетных (возможных) углов падения трещин достаточно широк. Например, при  $\varphi = 30^\circ$  угол  $\alpha$  может изменяться от  $13$  до  $38^\circ$  (состояние “С”), или от  $11$  до  $39^\circ$  (состояние “Н”). Следует отметить, что средний угол скалывания в этих случаях равен  $\pi/4 - \varphi_T/2$ . При состоянии “Т” средний угол скалывания становится значительно круче за счет увеличения как минимальных, так и максимальных углов скалывания. Максимальных значений углы скалывания достигают к состоянию “Р”. Здесь минимальный угол скалывания увеличивается до значения  $\pi/4 - \varphi/2$ , а максимальный угол достигает наибольшего значения.

Следует отметить особенности образования сколовых трещин между точками “Н” и “Р”. В точке “Н” круг напряжений пересекает паспорт образования трещин при  $\sigma'_H = 0$ . Трещины скола как поверхности трения могут формироваться только при наличии нормальных сжимающих напряжений

на плоскости скола (т. е. должно быть  $\sigma_H > 0$ ). Следовательно, в точке "Н" могут формироваться самые пологие сколовые трещины. При смещении круга напряжений влево, т. е. к точкам "Т" и "Р", условие  $\sigma_H > 0$  сохраняется. Поэтому диапазон напряжений, формирующих сколовые трещины между точками "Н" и "Р", сокращается, а значения углов скола значительно увеличиваются.

Таким образом, можно считать, что теоретические расчетные углы скалывания имеют существенно различные значения в зависимости от положения круга напряжений на паспорте прочности. При оценке наиболее вероятных значений углов скола в натуральных условиях (в обнажениях) следует учитывать два обстоятельства. За счёт образования трещин происходит увеличение объёма породы (дилатансия). Увеличение объёма происходит путём расширения массива вверх (на свободное пространство выше поверхности земли). Наиболее оптимально, с геомеханических позиций, дилатансия происходит по наиболее крутым трещинам. Поэтому активно развиваются более крутые трещины. В скальных массивах наиболее часто встречается значение угла внутреннего трения в диапазоне от 30 (известняки) до 40° (кислые разности изверженных пород). Вблизи поверхности земли реализуются условия, близкие к состоянию одноосного сжатия (состояние "Р"). Следует ожидать, что значения углов падения трещин, которые развиваются в однородных породах, будут находиться в диапазоне 38-47° (см. табл. 1). Указанные значения объясняют, почему существует устойчивое мнение о том, что средний угол падения трещин составляет примерно 45°.

Таблица 1

Расчетные значения углов падения допредельных трещин

$\varphi$	20	25	30	35	40
Состояние "П"					
$\alpha_T$	31,1	28,1	25,2	22,5	20,0
Состояние "С"					
$\alpha'_T$	13,8	13,4	12,9	12,5	11,8
$\alpha''_T$	48,4	42,8	37,5	32,6	28,2
$\alpha^{CP}_T$	31,1	28,1	25,2	22,5	20,0
Состояние "Н"					
$\alpha'_T$	13,5	12,2	11,2	10,8	9,6
$\alpha''_T$	49,8	44,5	39,3	34,5	30,4
$\alpha^{CP}_T$	31,1	28,4	25,2	22,7	20,0
Состояние "Т"					
$\alpha'_T$	22,0	20,2	18,5	16,8	15,0
$\alpha''_T$	52,2	46,8	41,9	37,1	32,8
$\alpha^{CP}_T$	37,1	33,5	30,2	26,9	23,9
Состояние "Р"					
$\alpha'_T$	35	32,5	30	27,5	25
$\alpha''_T$	56,3	51,7	46,9	42,4	38,1
$\alpha^{CP}_T$	45,6	42,1	38,4	34,9	31,5

В массивах горных пород обычно наблюдается высокая степень неоднородности прочностных свойств. Большинство исследователей считает, что чаще всего для ослабленных зон и участков массива характерно существенное снижение значений параметра сцепления, а величина угла внутреннего трения меняется в относительно небольших пределах. Для оценки значений углов скола допредельных трещин в ослабленных зонах можно принять, что  $C = 0$  (рис. 2, б).

Для определения углов скола необходимо решить систему уравнений:

$$(\sigma_H - \sigma_r)^2 + \tau = r^2; \quad (12)$$

$$\tau = \sigma_H \operatorname{tg} \varphi. \quad (13)$$

Учитывая, что

$$\sigma_r = (\sigma_1 + \sigma_3)/2;$$

$$r = (\sigma_1 - \sigma_3)/2,$$

Далее расчеты выполняются в следующей последовательности:

$$\begin{aligned} \tau &= \sigma_H \cdot \operatorname{tg} \varphi; \\ \sin 2\alpha &= 2\tau / (\sigma_1 - \sigma_3). \end{aligned} \quad (15)$$

Опыт расчетов показал, что значения угла  $\alpha'$  имеют низкие значения, которые в природных условиях встречаются относительно редко. Поэтому основной интерес представляет определение угла  $\alpha''$ . Расчеты удобнее всего выполнить для характерных точек "П", "С" и "Р". Результаты расчетов угла  $\alpha''$  помещены в табл. 2.

Расчетные значения угла скола в ослабленных зонах

Таблица 2

φ, град	α, град	α'', град		
		$\bar{R}_П$	$\bar{R}_С$	$\bar{R}_{ос}$
20	35	62,9	70	76,6
25	32,5	59,4	65	72,4
30	30	55,7	60	67,7
35	27,5	51,7	55	62,9
40	25	47,5	50	57,8

Результаты расчетов показывают, что максимальные значения углов скола в ослабленных зонах значительно превышают значения углов скола в однородных породах. Это превышение может составить двойное значение обычных углов скола. Учитывая, что трещины скола формируются за счет соединения микротрещин отрыва и скольжения, следует ожидать, что в условиях всестороннего сжатия образование микротрещин скольжения будет превалировать, и поэтому вероятность образования трещин с относительно высокими значениями углов падения трещин весьма велика. Вблизи поверхности земли реализуются условия, близкие к состоянию одноосного сжатия ( $R_{ос}$ ). Следует ожидать, что значения углов падения трещин, которые развиваются по ослабленным зонам в скальных породах, будут находиться в диапазоне 58-68° (см. табл. 2).

Анализ паспорта образования трещин позволяет считать, что на диаграммах трещиноватости могут выявляться две системы трещин по углу падения. Одна система трещин образуется в относительно однородных блоках горных пород. Для этой системы характерны средние углы падения трещин 40-45°. Другая система трещин образуется в ослабленных блоках или по ослабленным поверхностям, которые могут быть связаны с залеченными трещинами различного генезиса. Для этой системы характерны средние углы падения трещин 55 - 65°. Эти результаты объясняют, почему редко встречаются системы трещин, имеющие угол падения, близкий к теоретическому значению угла скола (45-φ/2).

Результаты теоретических исследований хорошо согласуются с данными полевых работ. Изучение трещиноватости в карбонатных массивах [6] показало, что наклонные системы трещин имеют средние углы падения 40° и 60°. Массивы изверженных пород характеризуются близкими углами падения тектонических трещин [3].

Необходимо отметить, что выводы, основанные на значении угла внутреннего трения в диапазоне 30-40°, относятся к современным тектоническим (открытым) трещинам. При анализе залеченных, рудных трещин и жил следует учитывать, что при прогреве массива угол внутреннего трения снижается (массив становится более пластичным). Анализ расчётных данных (см. табл. 1, 2), позволяет считать, что в этих условиях значения углов скола имеют существенно более высокие значения. Углы падения трещин, которые развиваются в однородных породах, могут достигать величины 56° (φ = 20°). Значения углов падения трещин, которые развиваются по ослабленным зонам, могут достигать значения 77°. Указанные углы падения рудных трещин и жил отмечаются при анализе структурных условий размещения оруденения [1].

Таким образом, анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- Анализ паспорта образования трещин даёт возможность рассчитывать диапазон значений углов скола трещин предразрушения при различных положениях круга напряжений.

• Диапазон вероятных углов скола допредельных трещин довольно широк даже в условно однородных породах. При наличии неоднородности горных пород по прочностным свойствам диапазон значений вероятных углов скола существенно возрастает.

- При анализе диаграмм трещиноватости необходимо учитывать, что можно фиксировать системы трещин с одинаковым азимутом падения, но разным углом падения трещин.
- Наиболее часто в верхней части земной коры должны встречаться трещины с углом падения более  $40^\circ$ , так как при развитии процесса дилатансии трещины с крутыми углами падения являются более выгодными с геомеханических позиций.
- При анализе элементов залегания рудных трещин и жил следует учитывать, что при прогреве массива угол внутреннего трения снижается (массив становится более пластичным). В этих условиях значения углов скола имеют существенно более высокие значения, чем современные тектонические трещины.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабенко В.В.** Структурные условия размещения и зональность оруденения Берёзовского месторождения (Урал) // Изв. АН СССР. Сер.: Геологическая. 1978. № 10. С. 114–126.
2. **Гудман Р.** Механика скальных пород. М.: Стройиздат, 1987. 232 с.
3. **Ново-Шемурское медноколчеданное месторождение:** Отчет о результатах геологоразведочных работ с 1975 по 1986 гг. с подсчетом запасов по состоянию на 01.09.86 / Мингео СССР, Уральское ПГО, Северная геологоразведочная экспедиция. Ивдель, 1986. 320 с.
4. **Тагильцев С.Н.** Основы гидрогеомеханики скальных массивов: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГГА. 88 с.
5. **Тагильцев С.Н.** Пределы линеаризации закона Кулона-Мора при расчётах НДС массивов горных пород. // Мат-лы коорд. сов. по пробл. геодинам. безопасности. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1997. С. 213-217.
6. **Тагильцев С.Н., Зевахин А.И., Кибанова Т.Н.** Гидрогеомеханический анализ тектоники и рельефа карбонатного массива // Изв. УГГГА. Вып. 15. Серия: Геология и геофизика. 2002. С. 232-236.

УДК (553.62 + 622.02 + 624.131) : 006.354

**А.Ф. Алексеев, В.Г. Василенко**

## КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР НЕКОТОРЫХ СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД И ПРИМЕНЯЕМОЙ ТЕРМИНОЛОГИИ

За последнее десятилетие резко снизились объемы геологоразведочных работ и их финансирование. Последствия в виде реорганизации геологических структур, продолжающиеся сокращения штатов геологов сказались и на лабораторной службе. На территории Российской Федерации и стран СНГ прекратил свое существование целый ряд хорошо оснащенных лабораторий, занимавшихся технологическими исследованиями минерального сырья и горных пород. Примером служит закрытие в 2001 г. Лаборатории технологии неметаллов (с 1995 г. – Геотехнологической лаборатории), начало деятельности которой датируется 1932 годом.

Опыт подобных лабораторий широко использовался ведущими институтами страны в апробации новых методов испытаний, учитывался при разработке СУСН и СН на лабораторные работы. Потеря такого взаимодействия и сотрудничества в последние годы является, на наш взгляд, одной из причин того, что переиздание некоторых ГОСТов сопровождается рядом упущений и ошибок, изменениями, ведущими к необоснованному удорожанию лабораторных работ. До сих пор на территории одной страны (РФ) применительно к одним и тем же показателям свойств горных пород используются различные термины, в зависимости от того, какие НИИ участвуют в разработке ГОСТов.

Государственный стандарт на методы испытаний является директивным документом, указаниям которого неукоснительно должен следовать исполнитель при выполнении той или иной методики определения. К сожалению, приходится констатировать, что встречаются положения.