

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОДНОГО МАССИВА, ОСЛАБЛЕННОГО ТРЕЩИНОЙ

ЛАТЫШЕВ О. Г., ФРАНЦ В. В.

Устойчивость обнажений трещиноватых породных массивов определяется, как правило, процессом сдвига горных пород по плоскости ослабления (трещине). Параметры сдвига зависят от прочностных характеристик вмещающих пород и геометрии трещины. В работе на примере реальных условий карьера месторождения Удачное рассмотрена процедура анализа устойчивости породного массива. Дается методика разделения и количественной оценки параметров шероховатости и извилистости трещин на основе фрактального анализа их траектории. Описывается процедура построения паспорта прочности при сдвиге пород по трещине. Определяется истинная длина траектории и площади поверхности трещин с учетом их кривизны и оценки их фрактальной размерности. Дается анализ устойчивости обнажений при разной величине угла падения трещины. Результаты анализа позволяют определить коэффициент устойчивости обнажений и допустимую нагрузку на уступы карьера. Обсуждаемые методики анализа могут найти применение для различных условий открытой и подземной разработки трещиноватых породных массивов.

Ключевые слова: породный массив; трещина; фрактальный анализ; устойчивость; прогноз.

В настоящее время известно более сотни методов, способов и приемов расчета устойчивости свободных откосов [1, 2]. Большинство из них основывается на представлении о массиве как о сыпучей среде и использовании закона Кулона. В контексте данной работы интерес представляют методы расчета устойчивости скальных массивов, ослабленных трещиной. В работе [3] дается классификация таких методов, основанная на различной геометрии плоскостей ослабления. Для плоской поверхности скольжения (трещины) обычно строится и исследуется методом последовательных приближений функция устойчивости в зависимости от угла наклона трещины и ее характеристик. При этом важнейшим фактором устойчивости является реальная геометрия трещины, которую нельзя рассматривать как плоскую поверхность.

В предположении сдвига пород по единичной трещине рассмотрим следующую схему. Пусть на плоскость трещины, ориентированной под углом α , действует сила F . Тогда ее нормальная (к линии трещины) составляющая $N = F \cos \alpha$, а касательная $T = F \sin \alpha$. Условие равновесия запишется в виде: $T = N \tan \varphi + CL_{и} \cdot 1$, где 1 – отражает единичную толщину модели блока с трещиной; φ – угол внутреннего трения; C – сцепление в плоскости трещины; $L_{и}$ – истинная (с учетом

Латышев Олег Георгиевич – доктор технических наук, профессор кафедры шахтного строительства. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: gtf.shs@ursmu.ru

Франц Владимир Владимирович – кандидат технических наук, ассистент кафедры шахтного строительства. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: franc_vv@mail.ru

реальной геометрии) длина трещины. Коэффициент устойчивости n_y как отношение удерживающих и сдвигающих сил для данной схемы запишется в виде:

$$n_y = \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \varphi + \frac{CL_{\text{и}}}{F \sin \alpha}. \quad (1)$$

Отсюда можно определить допустимую нагрузку на уступ карьера при заданной величине коэффициента устойчивости:

$$F = \frac{CL_{\text{и}}}{\sin \alpha (n_y - \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{tg} \varphi)}. \quad (2)$$

Таким образом, для расчета устойчивости в зависимости от угла падения трещины α требуется определить сцепление C , угол внутреннего трения φ и истинную (криволинейную) длину траектории трещины. Физические характеристики C и φ определяются паспортом прочности горной породы при сдвиге. Входящее в формулу коэффициента устойчивости (1) произведение $CL_{\text{и}}$ отражает силу сцепления $T = \tau_{\text{сдв}} L_{\text{и}} \cdot 1 = \tau_{\text{сдв}} S_{\text{и}}$, где $S_{\text{и}}$ – истинная площадь поверхности трещины.

Зависимость нормальных и сдвигающих усилий (паспорт прочности) для скальных пород с трещиной наиболее адекватно описывается уравнениями Н. Р. Бартона [4]. Им предложено описывать огибающую предельных кругов напряжений ломаной линией, участки которой соответствуют различным уровням нормальных напряжений. Причем пороговое значение напряжений σ^* зависит от геометрии (морфологии) трещин. В принятой в отечественной литературе системе обозначений это значение определится выражением [6]:

$$\sigma^* = \sigma_{\text{тр}} / 10^{(\alpha_{\text{в}}/K_{\text{ш}})},$$

где $\sigma_{\text{тр}}$ – прочность при сжатии материала стенок трещины; $\alpha_{\text{в}}$ – угол волнистости, град.; $K_{\text{ш}}$ – коэффициент шероховатости.

На первом этапе сдвига (при $\sigma < \sigma^*$) паспорт прочности опишется уравнением:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} [\varphi_{\text{ост}} + K_{\text{ш}} \lg (\sigma_{\text{тр}} / \sigma)] + C.$$

На втором этапе (при $\sigma > \sigma^*$):

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} [\varphi_{\text{ост}} + \alpha_{\text{в}}] + C.$$

В работе [6] авторами показано, что природные трещины являются фрактальными объектами, геометрию которых можно оценить их фрактальной размерностью. Параметры сдвига горной породы по трещине определяются множеством случайных независимых факторов, и в этом качестве их следует оценивать с вероятностных позиций. С учетом этого разработана статистическая (имитационная) модель сдвига, основанная на методе Монте-Карло [7]. Рассмотрим процедуру оценки устойчивости на примере карьера месторождения Удачное. Поверхностью ослабления уступа карьера является трещина длиной $L = 12,75$ м (рис. 1).

Вмещающая трещину порода (доломиты) имеет следующие характеристики: прочность при растяжении $\sigma_{\text{р}} = 5,1$ МПа; прочность при сжатии $\sigma_{\text{сж}} = 31$ МПа; сцепление $\tau_{\text{с}} = 10,8$ МПа; угол внутреннего трения $\varphi = 28,9^\circ$; модуль упругости $E = 0,5$ ГПа; объемный вес $\gamma = 2,6$ г/см³.

С помощью комплекта компьютерных программ обработки электронных фотографий определены координаты трещины. Путем фрактального анализа выполнена оценка ее геометрических характеристик. На первом этапе по методике, изложенной в работе [6], произведено разделение характеристик шероховатости и извилистости трещины. Первая оценивается коэффициентом шероховатости и учитывает те неровности (зубцы) трещины, которые при данном усилии прижатия срезаются в ходе процесса сдвига. Извилистость определяет траекторию трещины, которая остается после среза зубцов шероховатости и определяет дилатансию (раздвижку берегов трещины при подъеме по ее линии извилистости).



Рис. 1. Фотография траектории трещины

Анализ большого числа природных трещин показывает, что их траекторию нельзя достаточно точно описать ни одной из простейших алгебраических функций. Наилучшее приближение дает аппроксимация линии извилистости кусочно-линейными функциями. На графике (рис. 2) показана процедура аппроксимации рассматриваемой трещины уравнениями линейных функций.

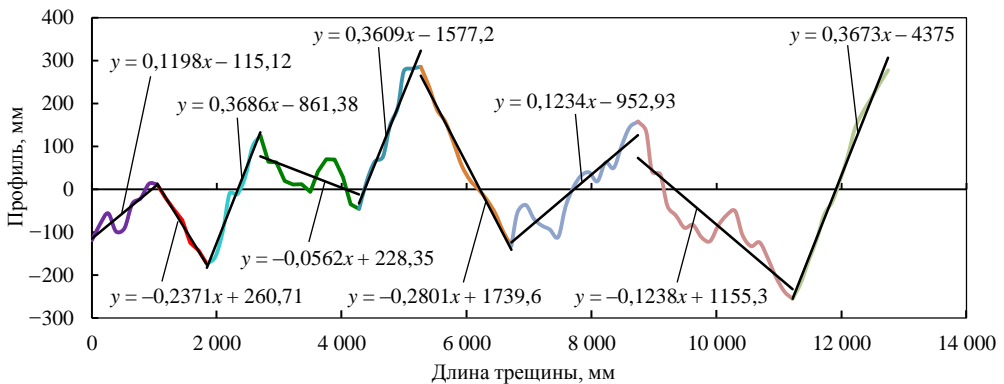


Рис. 2. Определение параметров извилистости трещины

Средний угол извилистости составляет $\alpha_b = 12,98^\circ$. После исключения линии извилистости получены отклонения траектории трещины, характеризующие ее шероховатость (рис. 3).

Количественной характеристикой шероховатости (неровностей) трещины является ее фрактальная размерность [6]:

$$K_{ш} = 0,5d_f^{5,2}. \quad (3)$$

Фрактальная размерность траектории трещины d_f определяется по специальной компьютерной программе, основанной на оценке параметров уравнения Ричардсона, связывающего размер объекта $L(\delta)$ с шагом его измерения δ [8]:

$L(\delta) \sim \delta^\beta$, где $\beta = 1 - d_f$. Для рассматриваемой трещины фрактальная размерность $d_f = 1,851$, что согласно уравнению (3) соответствует коэффициенту шероховатости $K_{ш} = 12,3$.

Полученные в результате изложенного анализа величины явились основой статистической модели сдвига [7]. Усреднение ее множественной реализации (100 итераций) позволило получить паспорт прочности при сдвиге рассматриваемых пород по трещине (рис. 4). При моделировании получено: $C = 45$ кПа; $\varphi = 28,9^\circ$.



Рис. 3. Линия шероховатости трещины

Для оценки коэффициента устойчивости и допустимой нагрузки на уступ карьера (формулы (1), (2)) необходимо определить истинную длину и площадь трещины. В работе [9] истинную длину трещины $L_{и}$ предлагают определять следующим образом. Принимается, что трещина состоит из I участков с некоторыми усредненными параметрами изгиба: f — превышение траектории трещины на участке длиной a . Отношение $f/a = K_{к}$ названо коэффициентом кривизны трещины. Из условия, что каждый участок изгиба имеет круглоцилиндрическую форму, длина трещины на этом участке $L_{и} = 2\Delta\delta a / \sin\Delta\delta$, где $a = L_{пр}/I$; $L_{пр}$ — линейная длина трещины; $\Delta\delta$ — отклонение изгиба от угла наклона поверхности трещины α : $\Delta\delta = \arctg 2f/a = \arctg 2K_{к}$.

Понятно, что столь упрощенный подход, который затем используется в расчете устойчивости карьерных откосов, крайне неточен и не отражает истинную геометрию плоскостей ослабления (трещин). Исследованиями авторов показано [6], что наиболее адекватно истинная длина трещины определяется ее фрактальной размерностью d_f : $L_{и} = aL_0^{d_f}$, где a — коэффициент приведения, определяемый требуемой точностью оценки. Для решения инженерных задач целесообразно принимать $a = 0,3$. Тогда истинная длина трещины $L_{и} = 34,2$ м.

Для рассматриваемых условий нормальное давление на плоскость трещины (пригрузка) определится весом вышележащих пород $\sigma_t = \gamma H$ и при глубине зале-

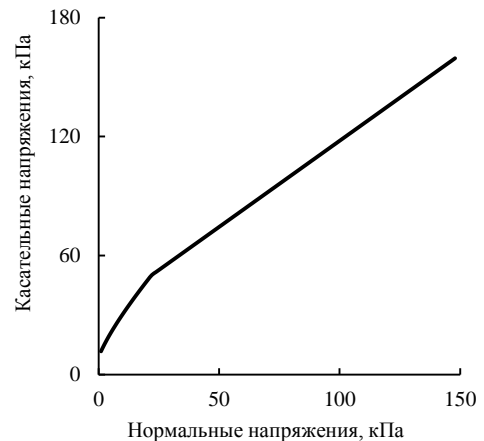


Рис. 4. Паспорт прочности при сдвиге горной породы по трещине

гания ее средней части $H = 5,5$ м составит $\sigma_T = 143$ кПа. Принимая площадь трещины как L_n^2 , получим нормальное сдвигающее усилие $F = \sigma_T L_n^2 = 22\ 800$ кН. Угол падения трещины в массиве $\alpha = 30^\circ$. Тогда по формуле (1) коэффициент устойчивости $n_y = 1,1$.

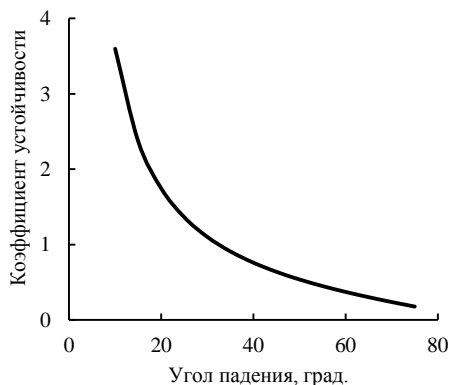


Рис. 5. Коэффициент устойчивости в зависимости от угла падения трещины

Описанная расчетная схема позволяет оценивать устойчивость пород при разной величине угла залегания трещины. На рис. 5 представлена зависимость коэффициента устойчивости от угла падения трещины.

Как видно из графика, уже при величине угла падения 32° коэффициент устойчивости становится меньше единицы. Если принять допустимую при проектировании открытых горных работ величину коэффициента устойчивости $n_y = 2,0$, то безопасными следует считать трещины, угол падения которых меньше 17° .

Таким образом, использование результатов теоретических и модельных исследований позволяет осуществлять прогноз устойчивости обнажений пород, имеющих плоскости ослабления (трещины). Полученные результаты дают возможность оценить допустимые нагрузки на уступ карьера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Певзнер М. Е. Деформации горных пород на карьерах. М.: Недра, 1992. 235 с.
2. Попов И. И., Шпаков П. С., Поклад Г. Г. Устойчивость породных отвалов. Алма-Ата: Наука, 1987. 224 с.
3. Фисенко Г. Л., Ревазов М. А., Галустьян Э. Л. Укрепление откосов на карьерах. М.: Недра, 1974. 208 с.
4. Barton N. R., Bandis S. C. Effect of block size on the shear behavior of jointed rock // 23rd U.S. Symp. on Rock Mechanics. Berkeley, 1982. P. 739–760.
5. Речицкий В. И., Эрлихман С. А. Современные методы определения прочности на сдвиг по трещине // Геоэкология. 1997. № 5. С. 102–114.
6. Латышев О. Г., Франц В. В., Корнилов М. В., Соколов В. В. Определение геометрических характеристик трещин для построения паспорта прочности горных пород // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. № 1. С. 58–65.
7. Латышев О. Г., Франц В. В., Прищеп Д. В. Моделирование и прогноз прочности при сдвиге горных пород по трещине // Изв. вузов. Горный журнал. 2017. № 2. С. 50–56.
8. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы: пер. с нем. М.: ИКИ, 2002. 656 с.
9. Попов И. И., Окатов Р. П., Низаметдинов Ф. К. Механика скальных массивов и устойчивость карьерных откосов. Алма-Ата: Наука, 1986. 256 с.

Поступила в редакцию 8 декабря 2017 года

STABILITY ESTIMATION OF ROCK MASS WEAKENED BY FISSURE

Latyshov O. G., Frants V. V. – The Ural State Mining University, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: gtf.shs@ursmu.ru

Stability of jointed rock mass outcroppings is determined, as a rule, by a process of rock shift along the surface of weakness (fissure). Shift parameters depend on the strength characteristics of enclosing rock and fissure geometry. The present article considers the procedure of analysis of rock mass stability by the example of the real conditions of an open pit at the deposit Udachnoye. The methods of division and quantitative estimation of roughness parameters and tortuosity of fissures are introduced on the basis of their trajectory fractal analysis. The procedure of building up the certificate of strength at the rock shift along the fissure is described. The real trajectory length is determined and the surface area of fissures with the account of their tortuosity and fractal dimension estimation. The analysis of stability of outcroppings is introduced under various value of the angle of fissure incidence. The results of the analysis make it possible to determine

the coefficient of stability of the outcroppings, together with the allowable load on the benches of an open pit. The discussed methods of analysis can be applied for various conditions of opencast and underground development of jointed rock mass.

Key words: rock mass; fissure; fractal analysis; stability; forecast.

REFERENCES

1. Pevzner M. E. *Deformatsii gornykh porod na kar'erakh* [Deformation of rock at open pits]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 235 p.
 2. Popov I. I., Shpakov P. S., Poklad G. G. *Ustoichivost' porodnykh otvalov* [Stability of waste dumps]. Alma-Ata, 1987. 224 p.
 3. Fisenko G. L., Revazov M. A., Galust'ian E. L. *Ukreplenie otkosov na kar'erakh* [Strengthening the slopes at open pits]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 208 p.
 4. Barton N. R., Bandis S. C. Effect of block size on the shear behavior of jointed rock. 23rd U.S. Symp. on Rock Mechanics, Berkeley. 1982, pp. 739–760.
 5. Rechitskii V. I., Erlikhman S. A. [Modern methods to determine shift strength along a fissure]. *Geokologiya – Geoecology*, 1997, no. 5, pp. 102–114. (In Russ.)
 6. Latyshev O. G., Frants V. V., Kornilkov M. V., Sokolov V. V. [The determination of fissure geometry to build up a certificate of rock strength]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2016, no. 1, pp. 58–65. (In Russ.)
 7. Latyshev O. G., Frants V. V., Prishchepa D. V. [Modeling and the forecast of rock strength at the shift of rocks along the fissure]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 2, pp. 50–56. (In Russ.)
 8. Mandel'brot B. *Fraktal'naia geometriia prirody* [Fractal geometry of nature]. Moscow, IKI Publ., 2002. 656 p.
 9. Popov I. I., Okatov R. P., Nizametdinov F. K. *Mekhanika skal'nykh massivov i ustoichivost' kar'ernykh otkosov* [Hard rock mass mechanics and open pit slopes stability]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1986. 256 p.
-