

УДК: 622.02

А.Б. МАКАРОВ, *SRK Consulting (Russia), Москва, amakarov@srk.ru.com*

Э. ХОРМАЗАБАЛЬ, *SRK Consulting (Chile) Сантьяго, ehormazabal@srk.cl*

И.С. ЛИВИНСКИЙ, *SRK Consulting (Russia), Москва, ilivinsky@srk.ru.com*

В.И. СПИРИН, *Полюс, Красноярск, SpirinVI@polyusgold.com*

Н.О. СОЛУЯНОВ, *Полиметалл, Санкт-Петербург, SoluyanovNO@polymetal.ru*

МЕТОДИКА ОБРАТНЫХ РАСЧЕТОВ СЦЕПЛЕНИЯ И ТРЕНИЯ ПО ТРЕЩИНАМ ПО ФАКТАМ ВЫВАЛОВ С БОРТОВ КАРЬЕРОВ

В крепких скальных породах устойчивость обнажений в карьерных откосах, в первую очередь, определяется поверхностями ослабления массива – трещинами, контактами слоев, слабыми пропластками, тектоническими разломами. Ослабляющий эффект поверхностей ослабления всех типов определяется их ориентировками относительно обнажений и друг друга, их размерами, частотой, а также прочностными свойствами, определяющими сопротивление сдвигу по ним. Традиционным путем – лабораторными испытаниями на сдвиг определяются сцепление и угол трения по трещинам небольшой площади (порядка 20÷30 см²). При таком масштабе испытаний невозможно воспроизвести все особенности крупных трещин: их шероховатость, волнистость, ступенчатость. А ведь именно по крупным трещинам площадью в сотни и тысячи квадратных метров происходят крупные вывалы с уступов, создающие угрозу для промышленной безопасности на карьерах (рис. 1).



Рис. 1. Плоский (слева) и клиновидный (справа) вывалы блоков пород по трещинам на уступах карьеров

В Правилах... /1/ наиболее надежным способом определения сопротивления массива горных пород сдвигу признаны обратные расчеты по фактам уже происшедших (естественных или искусственных) обрушений. Данный подход основан на аксиоме: если произошло сдвижение (обрушение, деформация) борта карьера, следовательно, сдвигающие силы по поверхности скольжения (сдвижения, разрушения) сравнялись с удерживающими. В полной мере такой подход можно распространить и на анализ разного рода вывалов, которые происходят с поверхностей уступов по трещинам. Обратные расчеты позволяют извлечь практически ценную геомеханическую информацию из фактов происшедших вывалов. Такой информацией являются данные о сцеплении и угле трения по трещинам.

Обратные расчеты сил сопротивления сдвигу по трещинам представляет собой пассивный эксперимент, который за нас провела природа. В процессе горных работ мы только создаем условия для сдвижения по трещинам блоков пород, оформляя уступы и бермы. Дальнейшее испытание на сдвиг за нас проводят силы природы. Пассивный натурный эксперимент существенно отличается от лабораторных испытаний образцов горных пород следующим:

- размеры разрушений в откосах в сотни и тысячи раз превышают размеры образцов, испытываемых в лаборатории на прессах. Тем самым учитывается масштабный фактор;

- в натуральных условиях конструктивный элемент борта карьера – уступ с реальной геологической структурой испытывается совокупностью природных (гравитация, собственный вес пород) и техногенных (сейсмическое воздействие взрывных работ) сил, реально существующих в карьере; в лабораторных условиях воспроизвести реальные условия нагружения уступов в карьере невозможно. Тем самым в пассивном эксперименте учитываются все факторы, воздействующие на реальные карьерные откосы;

- уступы в карьере находятся под нагрузкой в течение лет и десятилетий; лабораторные испытания образцов длятся минуты. Тем самым в ходе пассивного эксперимента учитывается фактор времени, включающий в себя такие дополнительные обстоятельства, как сезонно повторяющиеся процессы замерзания – растепления, периодического обводнения, постоянного накопления в массиве хрупких повреждений от периодического сейсмического воздействия взрывов.

Перечисленные отличия натуральных данных, полученных обратными расчетами, делают их гораздо более весомыми и значимыми, чем лабораторные тесты. В данной работе предлагается методика определения сцепления и угла трения по трещинам методом обратного расчета по фактам происшедших плоских или клиновидных вывалов с уступов.

При использовании в обратных расчетах критерия Кулона-Мора сопротивление сдвигу блоков пород, обнаженных на уступах карьера, по оконтуривающим их трещинам состоит из двух компонент – сил сцепления и трения. Источником сдвигающей силы является собственный вес неустойчивого блока пород. Сдвигение блоков пород (вывал, деформация) с уступов происходит в тех случаях и тогда, где и когда сдвигающая сила достигает уровня сопротивления сдвигу. Принцип обратного расчета состоит в анализе факта вывала при условии равенства сдвигающих и удерживающих сил, т.е. в предельном состоянии с коэффициентом запаса устойчивости, равном 1. Определение сцепления и угла трения по трещинам обратными расчётами осуществляется по следующему алгоритму.

По отдельным вывалам с использованием полевых замеров их геометрии (линейных размеров вывала, углов и азимутов падения трещин, по которым произошел сдвиг) выполняются обратные расчеты сцепления C' и угла трения φ' по трещинам, по которым произошло сдвигение блоков пород. Т.к. из одиночного факта вывала нельзя найти две неизвестных величины (C' и φ'), обратные расчеты для каждого вывала ведутся по вариантам, задавая одну неизвестную (например, угол трения) и определяя

вторую (сцепление) обратным расчетом из условия запаса устойчивости сдвинувшегося блока пород 1. Весьма удобным инструментом для обратных расчетов являются программы Swedge (компании Rocscience Inc., Canada) и Sblock (E. Esterhuizen, SRK Consulting, 2004). На рис. 2 показаны рабочие окна программы Swedge.

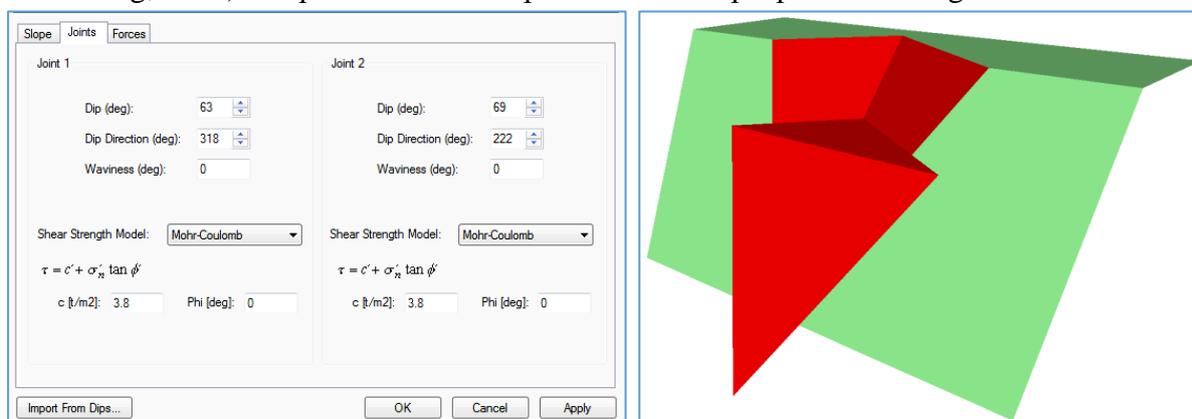


Рис. 2. Меню задания геометрии трещин (Dip, Dip Direction – угол и азимут падения), параметров сопротивления сдвигу по ним (Shear Strength Model: C' и ϕ' – сцепление и угол трения) и вид моделируемого клиновидного вывала с уступа

По результатам вариативных расчетов строятся кривые таких сочетаний сцепления и трения, которые в сумме обеспечивают предельное равновесие вывала по задокментированным трещинам. По совокупности вывалов в координатах C' и ϕ' получаем множество кривых, каждая из которых описывает множество возможных значений прочностных свойств трещин в отдельно взятом вывале. Ожидаемые значения величин сцепления и трения по совокупности вывалов можно найти по точкам пересечения отдельных кривых. На рис. 3а показан пример таких расчетов по трем вывалам на одном из карьеров Чили. Точки пересечения линий определяют наиболее вероятные значения сцепления в интервале $C' = 7,0 \div 7,5$ кПа и угла трения по трещинам $\phi' = 26 \div 31^\circ$. На рис. 3б показан другой пример результатов обратных расчетов по 7 вариантам замеров крупного клиновидного вывала на северо-восточном борту Северо-Воронцовского карьера. В данном случае все семь линий пересеклись в одной точке с координатами $C' = 0$ и $\phi' = 26,4^\circ$. Это редкий случай идеальной сходимости натуральных данных, который свидетельствует об относительно малой изменчивости прочностных свойств.

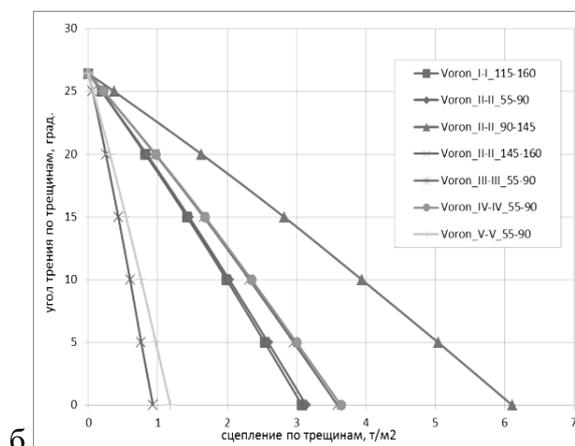
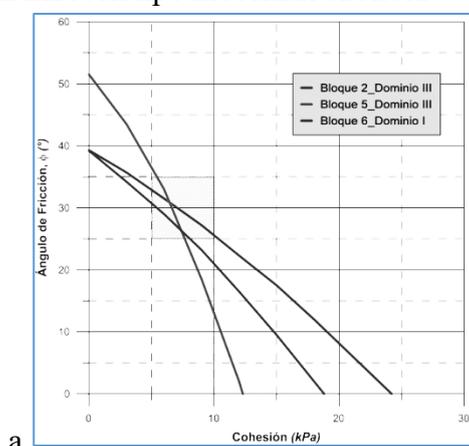


Рис. 3. Определение сцепления и угла трения по трещинам по результатам обратных расчетов по совокупности вывалов

При большом объеме данных обратных расчетов по большой совокупности вывалов точки пересечения кривых $\varphi' = f(C')$ можно найти, если полученные обратными расчетами кривые аппроксимировать регрессиями. Для этого составлена специальная компьютерная программа. На рис. 4 приведены результаты обратных расчетов по 32 клиновидным вывалам объемом от первых кубических метров до нескольких тысяч с уступов карьера Восточный Олимпиадинского ГОКа. Полевое картирование вывалов выполнено специалистами лаборатории геомеханики ЗАО Полус. С помощью компьютерной программы найдены 308 точек пересечений 32 кривых.

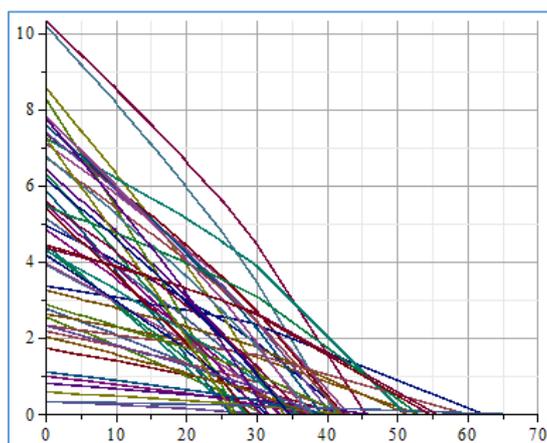


Рис. 4. Результаты обратных расчетов сцепления и угла трения трещинам по фактам по клиновидных вывалов на карьере Восточный Олимпиадинского ГОКа

Полученные данные подвергнуты статистическому анализу. В первую очередь произведена отбраковка недостоверных (сильно отличающихся от других) данных по критерию Грэмбса-Смирнова. После санации первоначальных данных по оставшейся выборке объемом из 287 значений установлены законы распределения параметров сопротивления сдвигу.

Сцепление по трещинам C' распределяется по обратному экспоненциальному закону (рис. 5а):

$$p(C') = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot C')$$

где λ - параметр экспоненциального распределения, равный 2,30 для трещин Олимпиадинского месторождения. Экспоненциальный закон распределения – однопараметрический, в котором величина $1/\lambda$ является и средним значением и стандартным отклонением случайной величины. Следовательно, по статистическим данным среднее сцепление по трещинам равно $C' = 1 / 2,30 = 0,43 \text{ т/м}^2 = 4,3 \text{ кПа}$. Экспоненциальный закон распределения означает, что процесс потери сил сцепления при сдвиге по трещинам развивается лавинообразно, по концепции наислабейшего звена. В пределе мода (наиболее вероятное значение) параметра, распределенного по экспоненциальному закону, стремится к нулю.

Распределение углов трения по трещинам φ' подчиняется нормальному закону (рис. 5б) со средним значением $30,6^\circ$ и стандартным отклонением $7,3^\circ$ (коэффициент

вариации 24%). Физической основой нормального закона распределения является развитие процесса потери сил трения при сдвиге по трещинам по концепции классического пучка, т.е. определяется большим числом случайных событий, распределение которых может быть любым. Бивариантная гистограмма, отображающая экспоненциальное распределение сцепления C' и нормальное распределение угла трения φ' приведена на рис. 6.

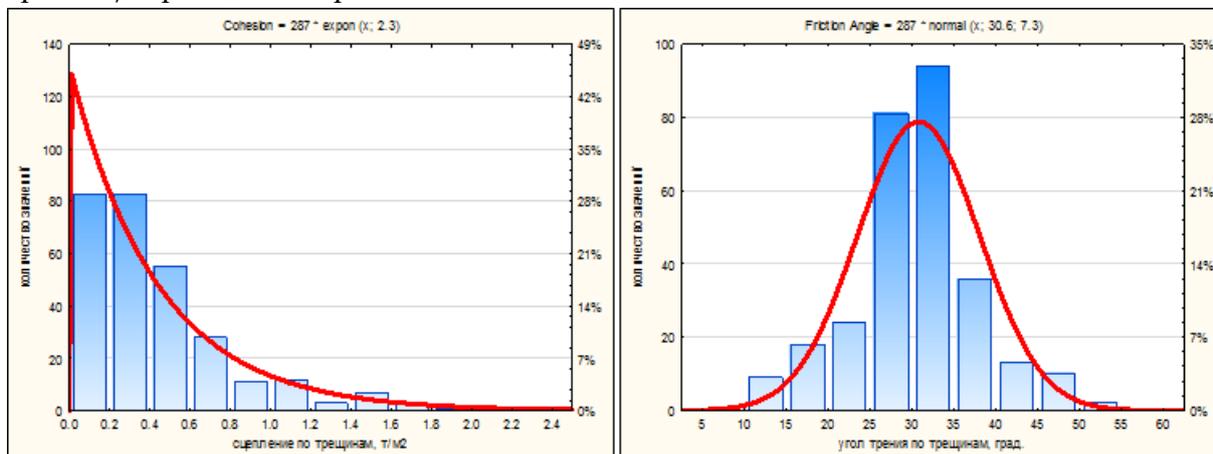


Рис. 5. Распределения сцепления и угла трения по трещинам во всей совокупности расчетных данных

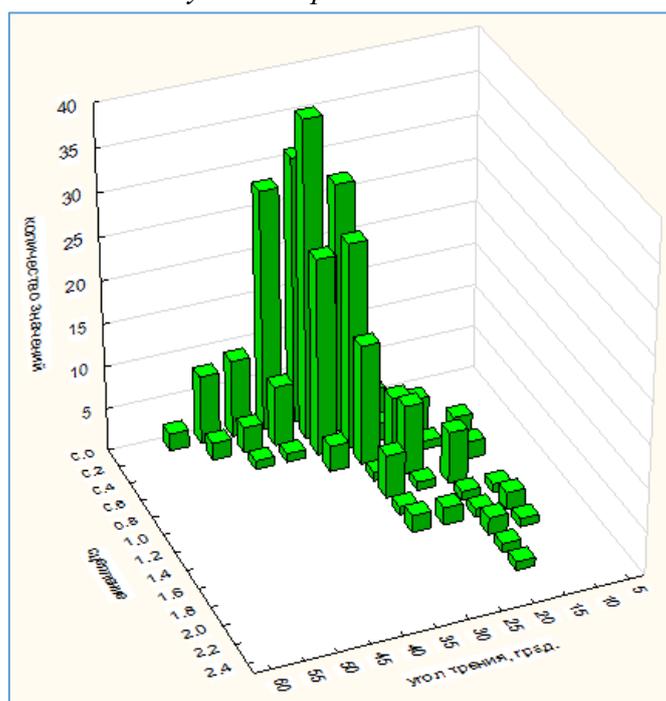


Рис. 6. Двумерное распределение сцепления и трения по трещинам в генеральной совокупности данных обратных расчетов

Чтобы понизить изменчивость прочностных параметров трещин, целесообразно расчленить генеральную совокупность данных на группы по каким-то геологическим признакам (литологический тип пород, глубина залегания, учитывающая выветривание, степень динамического метаморфизма). Попытка разделить генеральную совокупность на три выборки по основным литотипам пород

оказалась неудачной: различия между показателями сопротивления сдвигу по трещинам в разных типах метаморфических пород Олимпиадинского месторождения оказались в пределах их статистической изменчивости.

Для оценки масштабного фактора сопоставлены параметры сопротивления сдвигу по трещинам по данным обратных расчетов и лабораторных испытаний, которые проведены в лаборатории геомеханики ЗАО Полюс (см. таблицу).

Сопоставление параметров сопротивления сдвигу по трещинам Олимпиадинского месторождения по данным лабораторных испытаний и обратных расчетов

	лабораторные испытания	обратные расчеты	лабораторные испытания	обратные расчеты
	угол трения, град.		сцепление, т/м ²	
закон распределения	нормальный	нормальный	логнормальный	экспоненциальный
среднее значение	30,2	30,6	5,70	0,43
стандартное отклонение	8,5	7,3	5,16	0,43
коэффициент вариации	28%	24%	90%	100%
количество значений	88	287	85	287

Оказалось, что значения угла трения по трещинам в лабораторных и натуральных масштабах одинаковы. Различие в их средних значениях статистически незначимо. Это позволяет объединить выборки лабораторных и натуральных результатов в одну генеральную совокупность объемом в 375 значений со средним значением 30,6° и среднеквадратичным отклонением 7,6° (коэффициент вариации 25%). Близкие значения среднего значения, медианы (30,8°) и моды (30,0°) подтверждают нормальный закон распределения угла трения по трещинам. Физически это означает, что лабораторный масштаб определения сил трения на площади 20÷30 см² вполне достаточен для соблюдения центральной предельной теоремы А.М. Ляпунова и может быть распространен на масштаб натуральных условий без какой-либо корректировки. Данный вывод, полученный для метаморфических пород Олимпиадинского месторождения (карбонат-кварцевые породы, углеродистые катаклазиты, сланцы и динамосланцы, кварц-сланцевые сланцы), оказался неожиданным для авторов. Ожидалось, что угол трения по трещинам большой протяженности в натуральных условиях за счет их неровности, волнистости окажется больше (на угол волнистости), чем в лабораторном масштабе. Возможно, этот факт (равенство углов трения) имеет отношение только к метаморфическим породам со сланцеватой текстурой с небольшими (в пределах статистической изменчивости) углами волнистости.

Другая ситуация со сцеплением. В натуральных условиях по данным обратных расчетов сцепление по трещинам на порядок (в 13 раз) ниже, чем в лабораторном масштабе. Примечательно, что также изменяется закон распределения: в лабораторном масштабе величины сцепления по трещинам распределены по логнормальному закону, а по данным обратных расчетов – по более резкому экспоненциальному закону. Это

означает, что увеличение масштаба испытаний от лабораторного до натурального (в сотни и тысячи квадратных метров) сопряжено с проявлением масштабного эффекта снижения сцепления и приближением его к предельной – нулевой величине.

В международной практике проектирования уступов и берм /2/ рекомендуется принимать сцепление по трещинам равным нулю, т.е. использовать консервативный подход с предельно низким (нулевым) значением сцепления, распределенным по экспоненциальному закону. Как правило, такой подход используется на стадии проектирования карьера (Green Field). На стадии эксплуатации месторождения (Brown Field, Operating Mine), когда уже появились практические данные о поведении массива данного месторождения и имеются возможности для обратных расчетов по фактам наблюдающихся на практике вывалов, право выбрать реальное значение сцепления по трещинам оставляется за исследователем (консультантом) и расчетчиком. Данный более оптимистичный подход ориентирован на достижение более агрессивных и, соответственно, более рискованных, но экономически более привлекательных параметров бортов карьеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенная методика обратных расчетов сцепления и трения по трещинам на основе вариативного анализа совокупности вывалов опробована на нескольких карьерах и показала свою работоспособность.

2. По данным лабораторных испытаний и обратных расчетов сцепление по трещинам распределяется по экспоненциальному закону, а угол трения – по нормальному закону, что связано с различными механизмами потери сопротивления сдвигу силами сцепления и трения.

3. В метаморфических породах Олимпиадинского месторождения со сланцеватой текстурой различие угла трения по трещинам в лабораторных и натуральных масштабах статистически незначимо, т.е. силы трения оказались не подверженными влиянию масштаба процесса из-за того, что углы волнистости трещин оказались в пределах статистической изменчивости углов трения по ним.

4. В натуральных условиях сцепление по трещинам по данным обратных расчетов на порядок меньше, чем при лабораторных испытаниях. Этот факт отражает чувствительность сил сцепления, распределенных по экспоненциальному закону, к масштабу процесса: чем больше площадь трещины, тем вероятнее нахождение на ней участка (фрагмента, элемента) с нулевым или весьма низким сцеплением, с которого инициируется процесс сдвига по ней.

5. При проектировании параметров уступов и берм определение угла трения по трещинам может основываться на результатах лабораторных испытаний. Выбор величины сцепления по трещинам зависит от стратегии проекта (консервативный, пессимистический или агрессивный, оптимистический) и приемлемого уровня риска. В консервативном варианте, наиболее предпочтительном на начальных стадиях освоения месторождения, сцепление по трещинам может быть принято предельно низким, т.е. нулевым. На стадии доработки месторождения при корректировке проектных решений

(например, по углубке карьера) при необходимости оптимизации экономической модели проекта может быть реализован оптимистический вариант оценки сил сцепления по трещинам на основе результатов обратных расчетов по фактам происшедших вывалов.

Литература:

1. *Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах.* - ВНИМИ, 1999. -
2. *Guidelines for open pit slope design / Editors John Read, Peter Stacey.* - CRC Press/Balkema, 2009. – 509 p.

**А.Б. МАКАРОВ, Э. ХОРМАЗАБАЛЬ, И.С. ЛИВИНСКИЙ, В.И. СПИРИН,
Н.О. СОЛУЯНОВ**

***МЕТОДИКА ОБРАТНЫХ РАСЧЕТОВ СЦЕПЛЕНИЯ И ТРЕНИЯ ПО
ТРЕЩИНАМ ПО ФАКТАМ ВЫВАЛОВ С БОРТОВ КАРЬЕРОВ***

Предложена методика вариативных обратных расчетов свойств трещин по фактам произошедших клиновидных вывалов с уступов карьеров на основе полевых замеров геометрии вывалов. Установлено, что углы трения по трещинам по результатам обратных расчетов и лабораторных испытаний на сдвиг различаются незначительно, а сцепление по данным обратных расчетов меньше лабораторных значений на порядок. Таким образом проявляется масштабный эффект, т.к. размеры поверхностей сдвига в лабораторных и производственных условиях различаются на несколько порядков.

A.B. MAKAROV, E. HORMAZABAL, I.S. LIVINSKY, V.I. SPIRIN, N.O. SOLUYANOV

***BACK ANALYSIS OF SHEAR STRENGTH OF JOINTS BASED
ON BENCH WEDGE FAILURES***

A technique for variable back analysis of joint properties is proposed based on actual wedge failures from pit walls and field measurements of failure geometries. It was established that friction angles on joints obtained through back analysis and laboratory shear tests are not materially different, whereas cohesion estimated by the back-analysis method is lower than the laboratory values by an order of magnitude. This is a function of the scale effect taking place, as dimensions of shear surfaces in the laboratory and at the mine differ by a few orders of magnitude.