

Бусаргина Екатерина Сергеевна
инженер лаборатории открытой
геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
620219, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
Тел. (343) 350-54-11, 8-906-800-70-34,
e-mail: ekaterina-busargina@yandex.ru

**ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИБОРТОВЫХ МАССИВОВ НА
УСТОЙЧИВОСТЬ УЧАСТКОВ
БОРТОВ**

Аннотация:

По результатам инженерно-геологических исследований с использованием информации о напряженно-деформированном состоянии, трещиноватости массива, поверхностях ослабления, залегании структурных элементов массива приведена оценка устойчивости участка борта карьера, которая показала, что устойчивость участка прибортового массива при наличии круто- и пологопадающих систем трещин зависит не только от физико-механических свойств данных систем трещин, но и от параметров тектонического поля напряжений.

Ключевые слова: массив горных пород, устойчивость, карьер, трещиноватость, поверхности ослабления

Busargina Ekaterina Sergeevna
Engineer of the Laboratory of surface geo-
technology, The Institute of Mining UB RAS
620219, Yekaterinburg, 58, Mamin-Sibiriyak st.
Tel. 8-906-800-70-34,
e-mail: ekaterina-busargina@yandex.ru

**THE EFFECT OF ROCK MASS
STRESSED-DEFORMED STATE ON
THE STABILITY OF PIT EDGES
AREAS**

Abstract:

According to the results of geotechnical studies using information on the rock mass stressed-deformed state and jointing, the surfaces of weakening, as well as rock mass structural elements bedding, the assessment of stability of the pit edge part is given, that has shown that the stability of near-edge rock mass part in the presence of steep and flat falling fracture systems depends not only on physical and mechanical properties of these fracture systems, but also on the parameters of the tectonic stress field.

Key words: rock mass, stability, open pit, jointing, surfaces of weakening

Одной из важных частей инженерно-геологической информации о горном объекте наряду со структурным строением является напряженное состояние породного массива месторождения, на основе которого строится деформационная модель соответствующего участка прибортового массива [1]. Информация о напряженном состоянии массива месторождения позволяет на новом научном уровне прогнозировать деформационное поведение прибортового массива и судить о возможности проявления оползневых деформаций при ведении горных работ в карьере.

Влияние тектонического поля напряжений на устойчивость прибортовых массивов на различных месторождениях и даже на различных участках бортов одного месторождения проявляется индивидуально. Рассмотрим участок прибортового массива, представляющий собой разуплотненный массив, разбитый разноориентированными трещинами на удалении 20 – 30 м от поверхности обнажения (рис. 1). Предположим наличие как пологопадающих, так и крутопадающих поверхностей ослабления с падением в сторону выработанного пространства карьера. Наличие данных поверхностей является одним из важных факторов развития оползневых деформаций данной области.

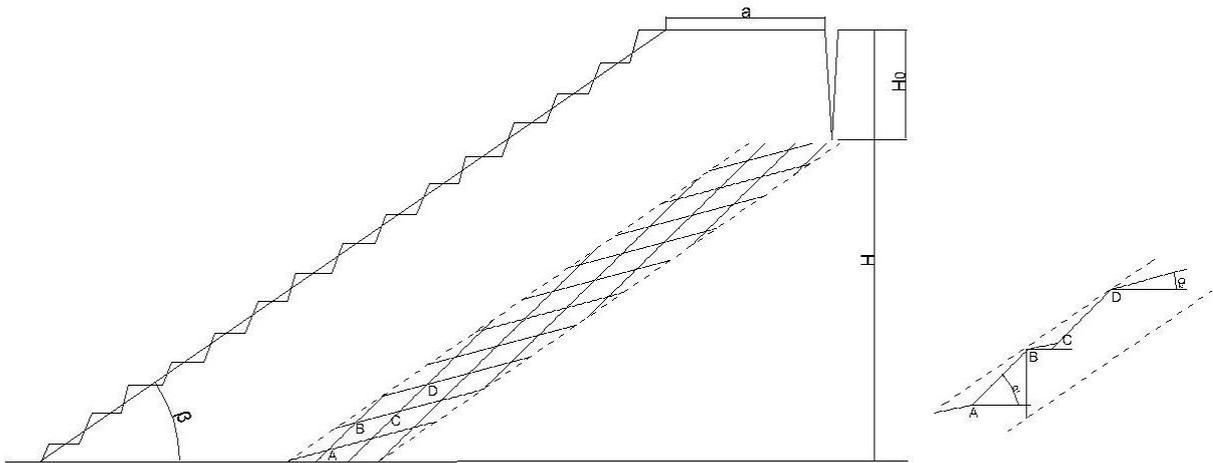


Рис. 1 – Модель поверхности скольжения в прибортовом массиве

Система уравнений, характеризующая устойчивость породной призмы, сформированной за счет наличия двух систем трещин, выражается в следующем виде[2]:

$$\begin{aligned} F_{сдв} &= (\tau_{сдв})_1 L_K + (\tau_{сдв})_2 L_{п}, \\ F_{сц} &= (\tau_{сц})_1 L_K + (\tau_{сц})_2 L_{п}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $(\tau_{сдв})_1$ и $(\tau_{сц})_1$ – удельное сдвиговое усилие и усилие сцепления на крутопадающей поверхности, МПа;

$(\tau_{сдв})_2$ и $(\tau_{сц})_2$ – удельное сдвиговое усилие и усилие сцепления на пологопадающей поверхности, МПа;

L_K и $L_{п}$ – длина круто- и пологопадающих трещин в пределах поверхности скольжения призмы, м.

Согласно этим формулам, коэффициент запаса устойчивости породной призмы по поверхности скольжения, образованной при наличии круто- и пологопадающих систем трещин

$$k_{зап} = F_{сц} / F_{сдв}. \quad (2)$$

Для определения коэффициент запаса устойчивости данного участка борта воспользуемся моделью поверхности скольжения на участке прибортового массива, представленной на рис. 1. Скольжение оползневого тела происходит по поверхности, образованной поверхностями ослабления с углами падения в выработанное пространство карьера α_1 и α_2 .

Длина поверхности скольжения оползневого тела равна

$$H_1 = H - H_0 = \sum h_1 + \sum h_2 = \sin \alpha_1 L_K + \sin \alpha_2 L_{п}, \quad (3)$$

где H – общая высота прибортового участка, м;

H_0 – глубина расположения деструктивной трещины, м;

h_1 и h_2 – высота круто- и пологопадающей частей поверхности скольжения, м;

α_1 и α_2 – углы падения круто- и пологопадающих поверхностей ослабления, град;

L_K и $L_{п}$ – длина круто- и пологопадающих трещин в пределах поверхности скольжения призмы, м.

Общая длина круто- и пологопадающих трещин

$$L_{общ} = H / \operatorname{tg} \beta + a = L_K \sin \alpha_1 + L_{п} \sin \alpha_2, \quad (4)$$

где β – угол наклона соответствующего участка борта карьера, град;

a – расстояние от верхней бровки борта до деструктивной трещины, м.

Уравнения (3) и (4) представляют собой систему:

$$\begin{cases} H_1 = L_k \sin \alpha_1 + L_n \sin \alpha_2, \\ H/\operatorname{tg}\beta + a = L_k \sin \alpha_1 + L_n \sin \alpha_2. \end{cases} \quad (5)$$

После преобразования этой системы может быть найдена протяженность круто- и пологопадающих трещин в пределах поверхности скольжения согласно следующим уравнениям:

$$L_k = \frac{H_1 \cos \alpha_2 - L_{\text{ошм}} \sin \alpha_2}{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 - \sin \alpha_2 \cos \alpha_1}, \quad (6)$$

$$L_n = \frac{L_{\text{ошм}} \sin \alpha_1 - H_1 \sin \alpha_1}{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 - \sin \alpha_2 \cos \alpha_1}. \quad (7)$$

Для определения коэффициента запаса устойчивости данного участка борта необходимо определить удельное сдвиговое усилие и усилие сцепления на крутопадающей и пологопадающей поверхности трещины согласно уравнениям

$$\tau_{\text{сдв}} = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha, \quad (8)$$

$$\tau_{\text{сш}} = (\sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha) \operatorname{tg} \varphi' + C', \quad (9)$$

где σ_1 – максимальная компонента поля напряжений, МПа;

σ_3 – минимальная компонента поля напряжений, МПа;

α – угол между σ_1 и поверхностью трещины, град;

φ' – угол трения по контакту поверхностей трещины, град;

C' – сцепление по контакту поверхностей трещины, МПа.

Решим задачу по определению коэффициента запаса устойчивости оползневой призмы с поверхностью скольжения, сформированной полого- и крутопадающими системами трещин со следующими параметрами: высота участка борта $H=100$ м, длина поверхности скольжения $H_1=90$ м, угол наклона борта 35° , расстояние от верхней бровки до деструктивной трещины 15 м. Параметры системы трещин в этой зоне: крутопадающая система имеет неровную слабошероховатую поверхность, угол трения по контакту 20° , сцепление 0,5 МПа, угол наклона 45° , пологопадающая система имеет шероховатую поверхность трещин, угол трения по контакту 15° , сцепление 0,3 МПа, угол наклона 12° .

Протяженность круто- и пологопадающих трещин в пределах поверхности скольжения согласно уравнениям (6) и (7) и заданным параметрам составила $L_k=92,18$ м и $L_n=95,88$ м.

Для расчета сдвиговых усилий и усилий сцепления по поверхности трещины были составлены таблицы 1 – 3, рассчитанные согласно уравнениям (8) и (9) для трещин различного генезиса и при различных значениях максимальной и минимальной компонент поля напряжений.

Таблица 1

Значения сдвигового усилия и усилия сцепления по поверхности трещин различного генезиса при значениях максимальной и минимальной компоненты поля напряжений $\sigma_1=14,5$ МПа и $\sigma_3=5,8$ МПа

α , град	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Шероховатый контакт $\varphi'=20^\circ$, $C'=0,5$ МПа																	
$\tau_{\text{сш}}$	2,71	2,82	2,98	3,17	3,4	3,65	3,92	4,19	4,47	4,73	4,98	5,21	5,4	5,56	5,68	5,75	5,77
$\tau_{\text{сдв}}$	1,49	2,17	2,79	3,33	3,77	4,09	4,28	4,35	4,28	4,09	3,77	3,34	2,8	2,18	1,49	0,76	0,01
Слабошероховатый контакт $\varphi'=15^\circ$, $C'=0,3$ МПа																	
$\tau_{\text{сш}}$	1,92	2,01	2,13	2,27	2,44	2,62	2,82	3,02	3,22	3,42	3,6	3,77	3,91	4,03	4,11	4,17	4,18
$\tau_{\text{сдв}}$	1,49	2,17	2,79	3,33	3,77	4,09	4,28	4,35	4,28	4,09	3,77	3,34	2,8	2,18	1,49	0,76	0,01

Таблица 2

Значения сдвигового усилия и усилия сцепления по поверхности трещин различного генезиса при значениях максимальной и минимальной компоненты поля напряжений $\sigma_1=20$ МПа и $\sigma_3=7,5$ МПа

α , град	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Шероховатый контакт $\phi'=20^\circ$, $C'=0,5$ МПа																	
$\tau_{сц}$	3,37	3,53	3,76	4,04	4,36	4,72	5,11	5,5	5,89	6,28	6,64	6,96	7,24	7,47	7,64	7,74	7,78
$\tau_{сдв}$	2,14	3,12	4,02	4,79	5,41	5,87	6,15	6,25	6,16	5,88	5,42	4,79	4,02	3,13	2,15	1,09	0,01
Слабшероховатый контакт $\phi'=15^\circ$, $C'=0,3$ МПа																	
$\tau_{сц}$	2,41	2,53	2,7	2,91	3,14	3,41	3,69	3,98	4,27	4,55	4,82	5,06	5,26	5,43	5,55	5,63	5,66
$\tau_{сдв}$	2,14	3,12	4,02	4,79	5,41	5,87	6,15	6,25	6,16	5,88	5,42	4,79	4,02	3,13	2,15	1,09	0,01

Таблица 3

Значения сдвигового усилия и усилия сцепления по поверхности трещин различного генезиса при значениях максимальной и минимальной компоненты поля напряжений $\sigma_1=5$ МПа и $\sigma_3=1,5$ МПа

α , град	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Шероховатый контакт $\phi'=20^\circ$, $C'=0,5$ МПа																	
$\tau_{сц}$	1,08	1,13	1,19	1,27	1,36	1,46	1,57	1,68	1,79	1,9	2	2,09	2,17	2,23	2,28	2,31	2,32
$\tau_{сдв}$	0,6	0,87	1,12	1,34	1,52	1,64	1,72	1,75	1,72	1,65	1,52	1,34	1,13	0,88	0,6	0,31	0,01
Слабшероховатый контакт $\phi'=15^\circ$, $C'=0,3$ МПа																	
$\tau_{сц}$	0,73	0,76	0,81	0,87	0,94	1,01	1,09	1,17	1,25	1,33	1,4	1,47	1,53	1,58	1,61	1,63	1,64
$\tau_{сдв}$	0,6	0,87	1,12	1,34	1,52	1,64	1,72	1,75	1,72	1,65	1,52	1,34	1,13	0,88	0,6	0,31	0,01

Таблица 4

Значения коэффициента запаса устойчивости, сил сцепления и сдвига породной призмы по поверхности скольжения, образованной круто- и пологопадающей системами трещин

α , град	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
При $\sigma_1=14,5$ МПа и $\sigma_3=5,8$ МПа																	
$F_{сц}$	433,91	452,68	478,94	509,88	547,38	587,68	631,75	675,82	720,81	763,95	804,25	841,76	872,70	898,95	917,68	929,89	932,69
$F_{сдв}$	280,22	408,11	524,71	626,26	709,01	769,19	804,93	818,09	804,93	769,19	709,01	628,14	526,59	409,99	280,22	142,93	1,88
k	1,55	1,11	0,91	0,81	0,77	0,76	0,78	0,83	0,90	0,99	1,13	1,34	1,66	2,19	3,27	6,51	495,94
При $\sigma_1=20$ МПа и $\sigma_3=7,5$ МПа																	
$F_{сц}$	24,28	25,46	27,14	29,19	31,50	34,15	36,96	39,82	42,67	45,49	48,13	50,48	52,50	54,18	55,40	56,15	56,45
$F_{сдв}$	17,91	26,11	33,65	40,09	45,28	49,13	51,48	52,31	51,56	49,22	45,37	40,09	33,65	26,20	18,00	9,12	0,08
k	1,36	0,97	0,81	0,73	0,70	0,70	0,72	0,76	0,83	0,92	1,06	1,26	1,56	2,07	3,08	6,15	674,41
При $\sigma_1=5$ МПа и $\sigma_3=1,5$ МПа																	
$F_{сц}$	10,95	11,43	12,09	12,94	13,90	14,93	16,08	17,23	18,38	19,52	20,55	21,52	22,36	23,03	23,51	23,81	23,93
$F_{сдв}$	7,22	10,47	13,48	16,13	18,30	19,75	20,71	21,07	20,71	19,87	18,30	16,13	13,61	10,60	7,22	3,73	0,06
k	1,52	1,09	0,90	0,80	0,76	0,76	0,78	0,82	0,89	0,98	1,12	1,33	1,64	2,17	3,25	6,38	407,05

Расчет коэффициента запаса устойчивости, сил сцепления и сдвигающих сил, действующих на участке массива при наличии круто- и пологопадающих систем трещин при различных значениях максимальной и минимальной компоненты поля напряжений и при различном угле между σ_1 и поверхностью трещины, был произведен

с применением значений параметров $(\tau_{сдв})_1$, $(\tau_{сц})_1$, $(\tau_{сдв})_2$ и $(\tau_{сц})_2$, взятых из таблиц 1 – 3. Получены значения коэффициента запаса устойчивости, отраженные в таблице 4, а также построен график зависимости коэффициента запаса устойчивости от угла между максимальной компонентой поля напряжений и поверхностью трещины (рис. 2).

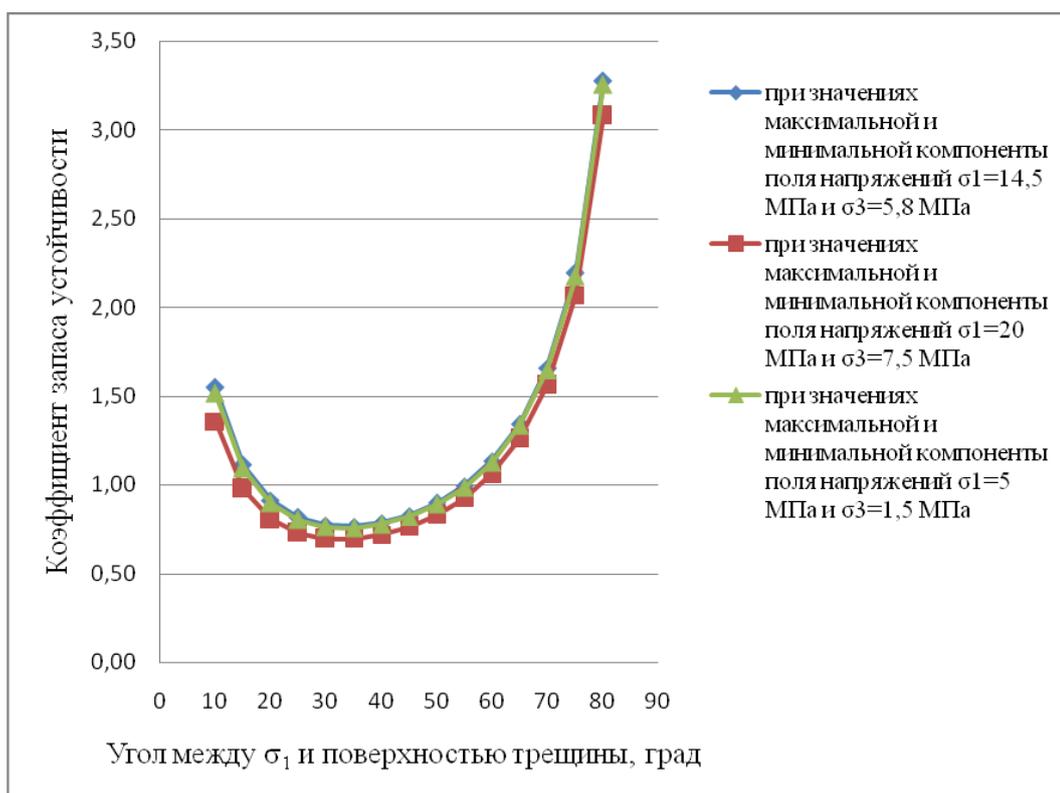


Рис. 2 – График зависимости коэффициента запаса устойчивости участка прибортового массива от угла между максимальной компонентой поля напряжений σ_1 и поверхностью трещины

По полученным результатам можно судить, что устойчивость участка прибортового массива при наличии круто- и пологопадающих систем трещин зависит не только от физико-механических свойств данных систем трещин, но и от параметров тектонического поля напряжений. Очень важными для устойчивости прибортового массива становятся нарушения, которые составляют с вектором действия максимальной компоненты тензора напряжений σ_1 углы в пределах 15 – 55°. Этот диапазон углов отклонения нарушения от вектора σ_1 позволяет реализоваться движению породной призмы по трещинам и нарушениям, если сцепление по контакту нарушения составляет 0,3 – 0,5 МПа. При углах отклонения нарушения от вектора действия максимальной компоненты σ_1 0 – 15° и 55 – 90° тектоническое поле напряжений за счет действия продольной по отношению к борту компоненты поля напряжений оказывает благоприятное влияние на устойчивость участков прибортовых массивов.

Литература

1. Яковлев А. В. Методика изучения прибортовых массивов для прогнозирования устойчивости бортов карьеров / А. В. Яковлев, Н. И. Ермаков. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2008. – 78 с.
2. Яковлев А. В. Устойчивость бортов рудных карьеров при действии тектонических напряжений в массиве / А. В. Яковлев, Н. И. Ермаков. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2006. – 231 с.