

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

## **ГЕОМЕХАНІКА-2 МЕХАНІКА ГРУНТІВ**

### **Практикум**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за  
освітньою програмою «Геоінженерія» спеціальності 184 «Гірництво»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Геомеханіка-2. Механіка ґрунтів: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 184 «Гірництво»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.М. Стовпник, Л.В. Шайдецька, О.В. Ган. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,09 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 32 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 24. 06. 2022 р.) за поданням Вченої ради Навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту (протокол № 10 від 31. 05. 2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

## **ГЕОМЕХАНІКА-2 МЕХАНІКА ГРУНТІВ**

### **Практикум**

Укладачі: *Стовпник Станіслав Миколайович, к.т.н., доц.  
Шайдецька Любов Валентинівна, к.т.н., доц.  
Ган Олена Валеріївна, к.т.н., асистент*

Відповідальний редактор: *Вапнічна Вікторія Вікторівна, к.т.н., доц. кафедри геоінженерії*

Рецензент: *Кріль Тетяна Василівна, к.т.н., старш. наук. співр. Інституту геологічних наук НАН України*

Однією з фундаментальних частин гірничої науки як системи знань, на яких ґрунтується технологія гірничих робіт, є фізика гірських порід і процесів. Механіка гірських порід є невід'ємною частиною фізики гірських порід і процесів. Вивчення поведінки гірських порід є основою для вирішення завдань проектування будівництва. У представленому навчальному виданні викладено основні положення щодо виконання практичних робіт, містяться завдання по кожній окремій роботі, основні теоретичні відомості, порядок виконання роботи, вихідні дані для кожного індивідуального варіанту виконання практичної роботи, приклади та питання для самоперевірки.

Навчальне видання призначене для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 184 «Гірництво», освітньої програми «Геоінженерія».

## **ЗМІСТ**

<b>ВСТУП</b>	<b>4</b>
<b>Робота № 1 Побудова паспорта міцності гірської породи за методом кіл Мора</b>	<b>5</b>
<b>Робота № 2 Розрахунок дотичних і нормальних напружень на довільному майданчику. Графічний і аналітичний метод</b>	<b>9</b>
<b>Робота № 3 Побудова паспорта міцності за даними випробування гірської породи на зріз із стисненням</b>	<b>13</b>
<b>Робота № 4 Побудова паспорта міцності за даними об'ємно-напруженого випробування гірської породи</b>	<b>19</b>
<b>Робота № 5 Побудова круглоциліндричної поверхні ковзання</b>	<b>22</b>
<b>Робота № 6 Визначення коефіцієнта запасу стійкості</b>	<b>26</b>
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</b>	<b>30</b>

## ВСТУП

Дане навчальне видання призначене для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 184 «Гірництво» денної та заочної форми навчання відповідно до робочої програми кредитного модуля «Геомеханіка–2. Механіка ґрунтів».

Кафедра геоінженерії надає студентам фундаментальні теоретичні знання і достатню фахову підготовку та знайомить з теорією механічних процесів в масиві гірських порід. Під час вивчення матеріалу курсу студенту необхідно усвідомити зміст кожного викладеного питання. Вивчити матеріал доцільно за темами програми, особливо зупиняючись на тому, що здалося не зовсім зрозумілим. Потім слід уважно розібрати місця, що викликали труднощі. При завершенні вивчення теми корисно створити короткий конспект і здійснити, не заглядаючи в літературу, самоконтроль пройденого матеріалу, перевірити здатність дати відповіді на питання програми з досліджуваної теми.

Навчальне видання являє собою збірник методичних вказівок з виконання практичних робіт, кожна з яких складається з наступних частин: теоретичних відомостей, де наведені основні поняття і приклади, які необхідні для виконання роботи; порядку виконання роботи; списку контрольних питань і завдань.

Для успішного виконання практичної роботи студент повинен ознайомитися з теоретичними відомостями, прикладами і умовами виконання завдань, а потім приступити до виконання.

По завершенню роботи студент повинен оформити звіт про її виконання та захистити практичну роботу. Текст звіту друкується на одній стороні листа А4. Звіти по кожній практичній роботі оформлюються студентами індивідуально.

## Робота № 1

### Побудова паспорта міцності гірської породи за методом кіл Мора

**Мета роботи:** вивчити методику побудови паспорта міцності гірської породи за методом кіл Мора.

#### Порядок виконання

За даними варіанту (табл. 1.1) побудуйте графік паспорта міцності гірської породи (рис.1.1) і по ньому визначте значення її зчеплення і кута внутрішнього тертя. Розрахуйте значення кута внутрішнього тертя (1.1) і зчеплення породи (1.2) за аналітичними формулами:

$$\rho = \arcsin\left(\frac{\sigma_{ст}-\sigma_p}{\sigma_{ст}+\sigma_p}\right), \text{ град,} \quad (1.1)$$

$$K = \frac{\sigma_p}{2} \cdot \left(\frac{\sin\rho+1}{\cos\rho}\right), \text{ МПа,} \quad (1.2)$$

де  $\sigma_{ст}$  – межа міцності на одноосьове стиснення, МПа;  $\sigma_p$  – межа міцності на розтягування, МПа.

Уявіть паспорт міцності гірської породи у вигляді рівняння:

$$\tau = K + \sigma \cdot \operatorname{tg}\rho \quad (1.3)$$

Підготуйте відповіді на контрольні питання.

#### Приклад

Початкові умови:

- межа міцності на стиснення  $\sigma_{ст}=120$  МПа;
- межа міцності на розтягування  $\sigma_p=40$  МПа.

#### Рішення

1. В декартовій системі координат (рис. 1.1) від нуля вправо відкладаємо відрізок рівний  $\sigma_{ст}=120$  МПа, а від нуля вліво –  $\sigma_p=40$  МПа. Встановлюючи

циркуль в середину цих відрізків будуємо кола Мора. До цих кілець проводимо дотичну лінію  $MM'$ . Перетин цієї лінії з вертикальною віссю визначає величину зчеплення зразка гірської породи  $K=34,6$  МПа, а кут нахилу до осі  $\sigma$  – кут внутрішнього тертя  $\rho=30^\circ$ .

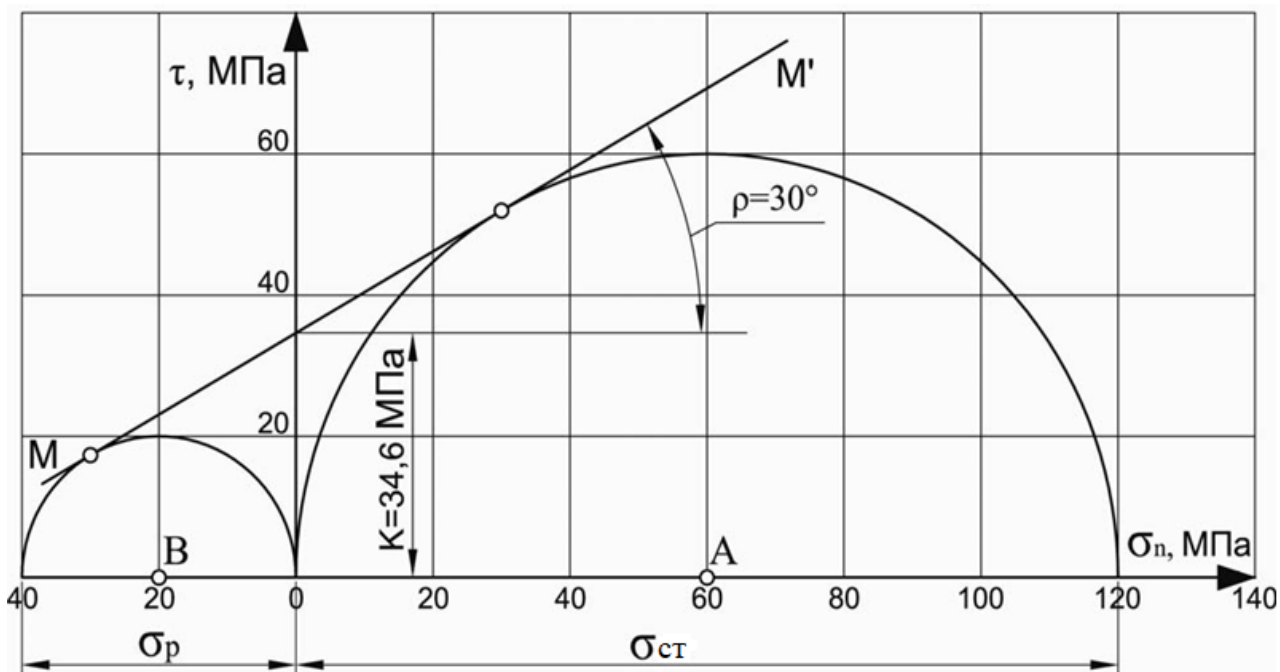
Знаходимо значення кута внутрішнього тертя і зчеплення за формулами 1.1 та 1.2:

$$\rho = \arcsin\left(\frac{120-40}{120+40}\right) = 30 \text{ град}, \quad (1.4)$$

$$K = \frac{40}{2} \cdot \left(\frac{\sin 30^\circ + 1}{\cos 30^\circ}\right) = 34,6 \text{ МПа} \quad (1.5)$$

Рівняння паспорту міцності для породи матиме вигляд:

$$\tau = 34,6 + \sigma \cdot \operatorname{tg}30^\circ \quad (1.6)$$



**Рисунок 1.1 – Паспорт міцності гірської породи**

**Таблиця 1.1 – Вихідні дані**

Номер варіанту	Межа міцності порід, МПа:		Об'ємна вага породи, МН/м <sup>3</sup>	Середній розмір структурного блоку, м	Висота відкосу, м	Кут відкосу, град
	на стиск	на розтяг				
1	70	25	0,035	0,3	200	50
2	100	35	0,04	1,1	250	65
3	150	30	0,02	0,8	300	60
4	120	25	0,03	0,6	250	50
5	140	38	0,03	0,4	200	45
6	60	20	0,03	0,2	250	45
7	80	30	0,03	0,4	180	50
8	110	20	0,03	0,4	260	60
9	110	35	0,04	1,1	280	65
10	90	25	0,03	0,6	200	50
11	200	45	0,03	1,2	300	60
12	160	36	0,03	0,9	160	60
13	100	12,5	0,027	0,7	220	55
14	140	12	0,03	1	260	50
15	160	18	0,033	1,2	300	60
16	200	16	0,035	1,4	340	45
17	190	20	0,03	0,8	180	50
18	180	14	0,03	1,1	300	40
19	120	20	0,04	1,3	250	50
20	150	25	0,03	0,6	200	60
21	85	14	0,03	0,6	140	45
22	100	20	0,035	0,8	200	50
23	120	14	0,027	1,0	120	40
24	140	20	0,03	1,3	180	50
25	110	12	0,03	0,5	120	60
26	150	25	0,03	0,6	200	60

27	85	14	0,03	0,6	140	45
28	100	20	0,035	0,8	200	50
29	120	14	0,027	1,0	120	40
30	140	20	0,03	1,3	180	50
31	110	12	0,03	0,5	120	60
32	100	20	0,035	0,8	200	50
33	120	14	0,027	1,0	120	40
34	140	20	0,03	1,3	180	50
35	110	12	0,03	0,5	120	60
36	150	25	0,03	0,6	200	60
37	85	14	0,03	0,6	140	45
38	100	20	0,035	0,8	200	50
39	120	14	0,027	1,0	120	40
40	140	20	0,03	1,3	180	50

**Контрольні питання:**

1. Перелічіть на чому базується теорія руйнування Мора?
2. Визначте поняття паспорта міцності гірської породи і порядок його побудови.
3. Обрисуйте методику визначення зчеплення і кута внутрішнього тертя гірських порід.
4. Поясніть чому зі зменшенням міцності кут внутрішнього тертя гірських порід зменшується?
5. Класифікуйте види деформацій і наведіть їх визначення.



## Робота № 2

### Розрахунок дотичних і нормальних напружень на довільному майданчику.

#### Графічний і аналітичний метод

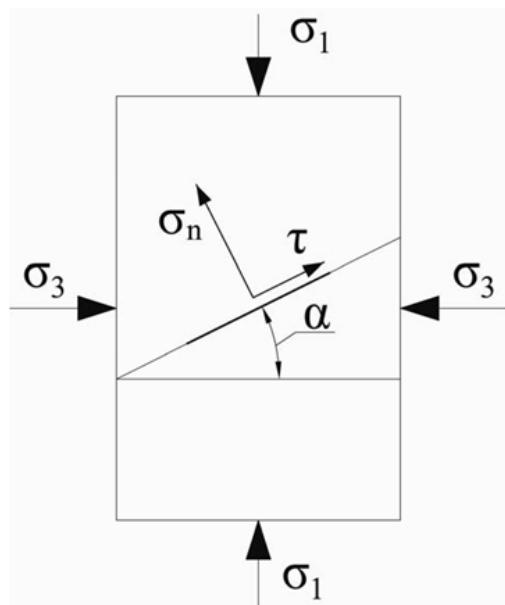
**Мета роботи:** вивчити методику визначення дотичних і нормальних напружень графічним і аналітичним методом.

#### Теоретичні відомості

Гірські породи в природному стані (в масиві) знаходяться в об'ємному напруженому стані, тобто в умовах всебічного стиснення, тому стискаючі напруження вважаються позитивними.

При будь-якому випадковому навантаженні тіла в ньому може бути безліч площин, в яких виникають спільно діючі нормальні і дотичні напруження, вони взаємопов'язані і можуть бути визначені методом додавання векторів. Таким чином напружений стан в будь-якій точці може бути описано сумою двох перпендикулярних векторів.

Умови плоского напруженого стану можна проілюструвати наступною схемою (рис. 2.1).



**Рисунок 2.1 – Схема визначення нормальних і дотичних напружень на довільному майданчику**

Напруження, спрямовані перпендикулярно до розглянутого майданчику  $S$  – нормальні ( $\sigma_n$ ); напруження, діючі щодо до майданчика  $S$  – дотичні ( $\tau$ ).

Наприклад, при плоскому напруженому стані в площині під кутом діятимуть напруження, які визначаються за формулами:

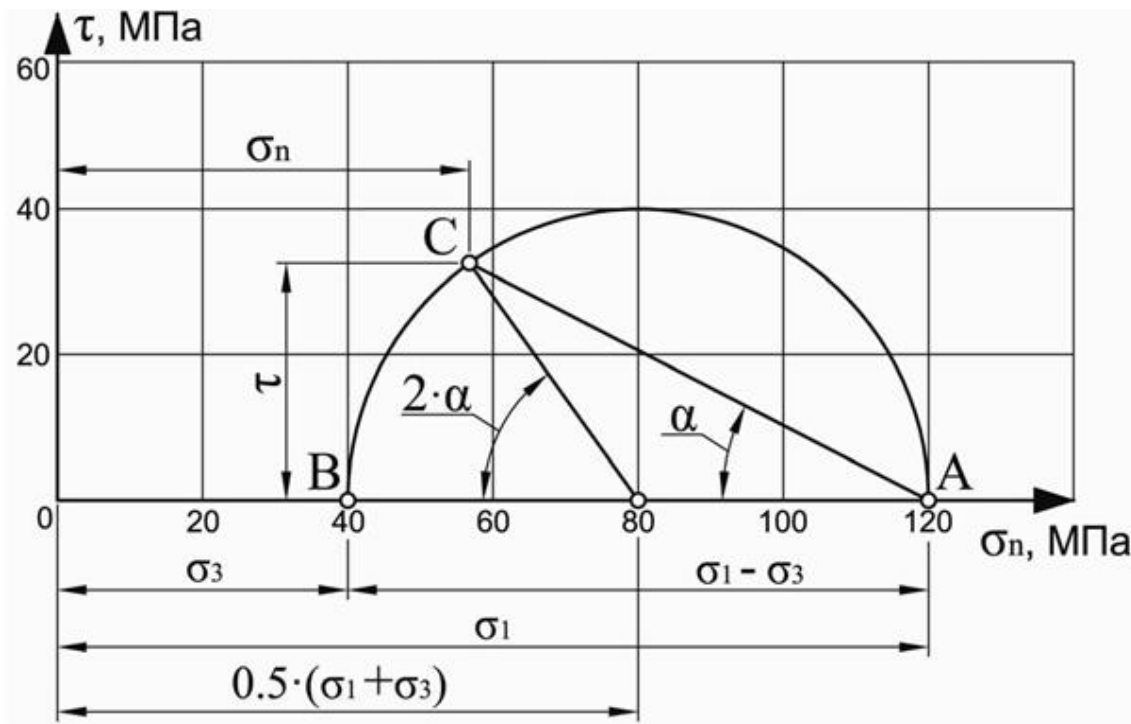
нормальні напруження

$$\sigma_n = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_3 \cdot \sin^2 \alpha \quad (2.1)$$

дотичні напруження

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin 2\alpha \quad (2.2)$$

Зв'язок між  $\sigma_n$  і  $\tau$  графічно можна представити за допомогою кілець Мора (рис. 2.2). Для цього по осі абсцис відкладають максимальне значення стискаючих напружень, що діють на зразок. На різниці відрізків, як на діаметрі, будують коло.



**Рисунок 2.2 – Схема визначення дотичних і нормальних напруг графічним методом**

Значення дотичних і нормальних напружень в будь-якій точці для заданого кута площини знаходять наступним чином: з точки (A) перетину абсциси з колом під заданим кутом проводять лінію до перетину з колом (C). Ордината точки C – дотичне напруження, а абсциса - нормальне. Кожному значенню напруженого стану відповідає своє коло напружень.

## Порядок виконання роботи

Намалюйте коло Мора, що описує напружений стан відповідно до вихідних даних (табл. 2.1) і визначте графічно значення нормального і дотичного напружень для кутів 10, 20, 30 і 40 град.

За даними варіанту (табл. 2.1) розрахуйте значення нормальних і дотичних напружень по аналітичним формулам 2.1 і 2.2 для кутів, які дорівнюють 50, 60, 70 і 80 град.

Побудуйте графік зміни нормальних і дотичних напружень в залежності від кута  $\sigma_n = f(\alpha)$  і  $\tau = f(\alpha)$ . Оформіть звіт. Підготуйте відповіді на контрольні питання.

### Контрольні питання:

1. Опишіть характеристику поняття напруження.
2. Проаналізуйте види напружених станів і напружень.
3. Дослідите як визначити значення напружень на довільному майданчику при плоскому напруженому стані?
4. Повідомте як пов'язані між собою дотичні і нормальні напруження?
5. Запропонуйте зв'язок між модулем Юнга і коефіцієнтом Пуассона?

**Таблиця 2.1 – Вихідні дані**

Номер варіанту	Напруження, що діє на зразок, МПа		Номер варіанту	Напруження, що діє на зразок, МПа	
	$\sigma_1$	$\sigma_3$		$\sigma_1$	$\sigma_3$
1	70	25	21	70	25
2	100	35	22	100	35
3	150	30	23	150	30
4	120	25	24	120	25
5	140	38	25	140	38
6	60	20	26	60	20
7	80	30	27	80	30
8	110	20	28	110	20
9	110	35	29	110	35
10	90	25	30	90	25
11	200	45	31	200	45
12	160	36	32	160	36
13	100	12,5	33	100	12,5
14	140	12	34	140	12
15	160	18	35	160	18
16	200	16	36	200	16
17	190	20	37	190	20
18	180	14	38	180	14
19	120	20	39	120	20
20	150	25	40	150	25

## Робота № 3

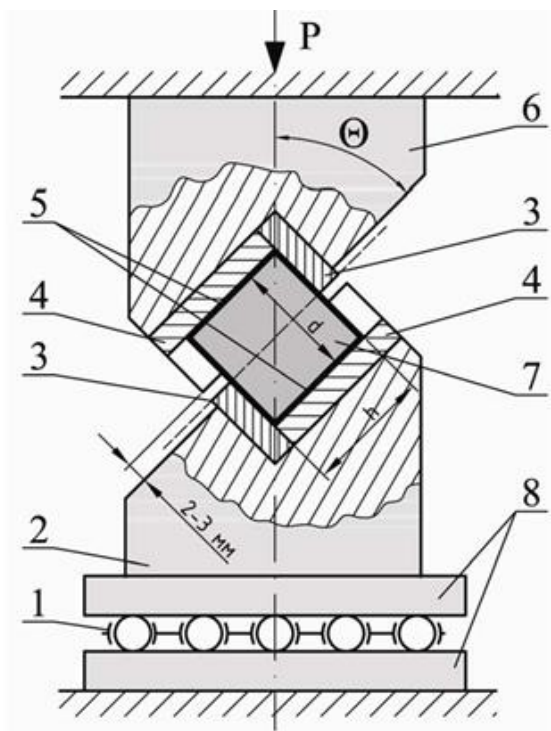
### Побудова паспорта міцності за даними випробування гірської породи на зріз із стисненням

**Мета роботи:** вивчити методику побудови паспорта міцності гірської породи за результатами випробування на зріз із стисненням, визначати механічні властивості.

#### Теоретичні відомості

Даний метод випробувань породних зразків дозволяє визначити характеристики механічних властивостей порід, а саме – межу міцності на зріз із стисненням, стосовно вирішення будь-яких виробничих і науково-дослідних завдань. Для випробувань використовуються циліндричні або призматичні зразки твердих гірських порід (з межею міцності на одноосьове стиснення не менше 5 МПа).

Суть методу полягає у вимірюванні руйнівної сили, прикладеної до зразка, встановленого в сталеві похилі матриці випробувального пристрою (рис. 3.1)



**Рисунок 3.1 – Пристрій  
випробування на зріз із  
стисненням:**

1 – роликіве ліжко; 2 – нижня матриця; 3 – вкладиш; 4 – обойми;  
5 – фольга; 6 – верхня матриця;  
7 – зразок; 8 – плити

Для проведення випробувань застосовують прес, максимальне зусилля якого не менше ніж на 20 % перевищує граничне навантаження на зразок. Пристрій (рис. 3.1), розміщується на опорній плиті преса і містить змінні роз'ємні матриці з вкладниками з розрізними обоймами для встановлення зразка під певними кутами нахилу (як правило кути нахилу приймаються ( $\theta = 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ$ ) і опорний пристрій у вигляді сталевих плит з роликовою постіллю. Ріжучі кромки вкладишів повинні бути розташовані в одній діаметральній (циліндричні зразки) або серединній (призматичні зразки) площині.

Для випробувань виготовляють циліндричні або призматичні (з квадратним перетином) зразки. Діаметр (ширина) зразка повинен бути рівним його висоті, і мати розмір  $42 \pm 2$  мм (допускаються розміри від 30 до 75 мм). Зразки вибурюють або вирізують на каменерізній машині з штуфів і кернів, їх торцеві поверхні шліфують. При проведенні випробувань зразок гірської породи розміщують в матрицю випробувального пристрою.

Між зразком і обоймами матриці прокладають фольгу. Зібрану зі зразком матрицю разом з опорним пристроєм встановлюють в центрі опорної плити преса, маючи на увазі, що вісі роликів паралельно зрізують край матриці. Зразок навантажують рівномірно із швидкістю зростання напружень 1-5 МПа /с зрізують до повного руйнування по площині зрізу. Значення руйнуючої сили ( $P$ ) фіксується силовимірником преса в кН.

Межа міцності на зріз ( $\tau_3$ ) і нормальне стискуєче напруження ( $\sigma_3$ ) обчислюють за формулами

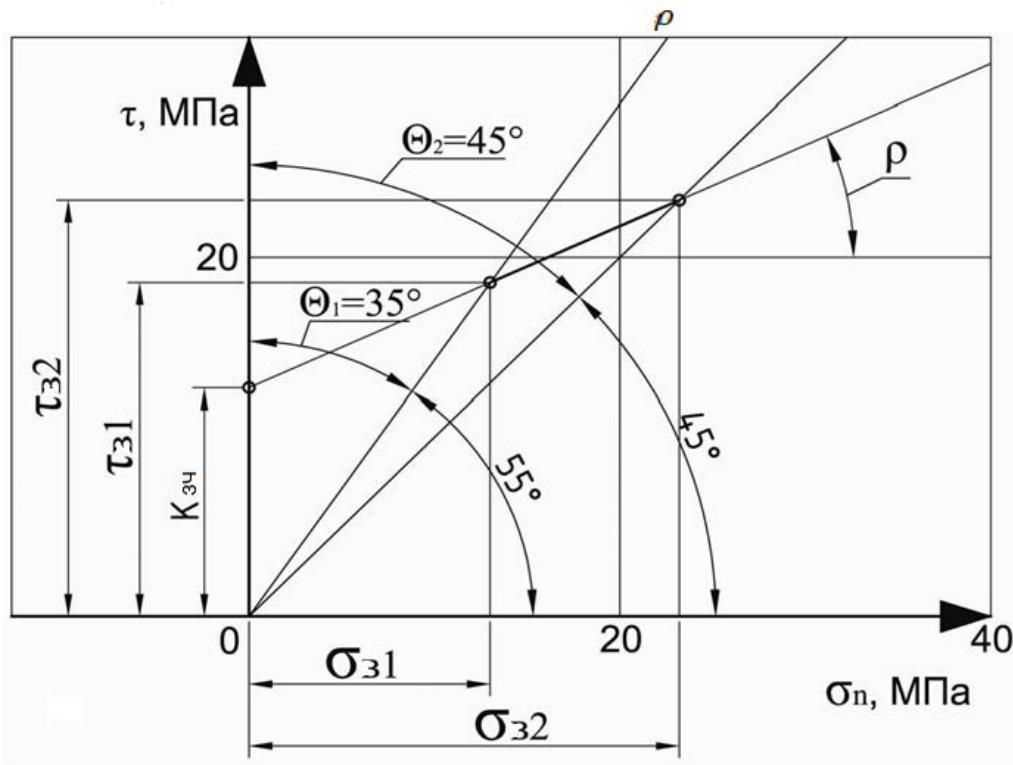
$$\tau_3 = \frac{10 \cdot P}{S} \cdot \cos\theta \quad (3.1)$$

$$\sigma_3 = \frac{10 \cdot P}{S} \cdot \sin\theta \quad (3.2)$$

де  $P$  – руйнівна сила, кН;  $\theta$  – кут між площиною зрізу і напрямком дії руйнівної сили, град,  $S = h \cdot d$  – площа зрізу зразка, см<sup>2</sup>.

За результатами випробувань, знайшовши значення межі міцності при зрізі і нормальне стискуєче напруження при різних кутах нахилу  $\theta$ , можна побудувати

паспорт міцності гірської породи (рис. 3.2), визначити зчеплення і кут внутрішнього тертя породи.



**Рисунок 3.2 – Побудова паспорта міцності породи за результатами випробування на зріз із стисненням**

**Порядок виконання**

Відомі результати випробувань породи на зріз із стисненням – руйнівна сила (кН) при куті  $\theta = 25^\circ, 35^\circ$  і  $45^\circ$  (табл. 3.1).

Для кожного варіанта випробувань знайдіть межу міцності при зрізі і нормальне стискуєче напруження за формулами 3.1 і 3.2. Площа зрізу зразка приймаємо  $S = 4,2 \cdot 4,2 = 17,64 \text{ см}^2$ .

Побудуйте паспорт міцності і встановіть графічним методом величини зчеплення і кута внутрішнього тертя гірської породи в зразку, визначить межі їх зміни (рис. 3.2). Оформіть звіт.

Підготуйте відповіді на контрольні питання.

**Таблиця 3.1 – Вихідні дані**

Варіант	Руйнуюча сила (P, кН) при відповідному куті $\Theta$			Варіант	Руйнуюча сила (P, кН) при відповідному куті $\Theta$		
	$\theta = 25^\circ$	$\theta = 35^\circ$	$\theta = 45^\circ$		$\theta = 25^\circ$	$\theta = 35^\circ$	$\theta = 45^\circ$
1	32	42	60	21	24	33	55
2	30	43	58	22	22	28	35
3	28	41	55	23	32	42	60
4	26	36	51	24	32	42	60
5	24	34	55	25	32	42	60
6	34	43	60	26	32	42	60
7	31	41	58	27	32	42	60
8	29	38	55	28	32	42	60
9	27	37	52	29	32	42	60
10	25	34	55	30	32	42	60
11	22	27	35	31	32	42	60
12	31	42	64	32	32	42	60
13	29	40	57	33	32	42	60
14	27	42	53	34	32	42	60
15	26	34	51	35	32	42	60
16	22	31	53	36	32	42	60
17	32	44	57	37	32	42	60
18	31	42	58	38	32	42	60
19	28	37	55	39	32	42	60
20	26	36	52	40	32	42	60

**Приклад**

Початкові дані:

- руйнівна сила

$$P_1 = 30 \text{ кН} \rightarrow \text{для кута } \theta = 25^\circ$$

$$P_2 = 40 \text{ кН} \rightarrow \text{для кута } \theta = 35^\circ$$

$$P_3 = 58 \text{ кН} \rightarrow \text{для кута } \theta = 45^\circ$$



## Вирішення

1. Для кожного варіанта випробувань знаходимо межу міцності на зріз і нормальне стискуюче напруження:

для кута  $\theta = 25^\circ$

$$\tau_{31} = \frac{10 \cdot P}{S} \cdot \cos\theta = \frac{10 \cdot 80}{17,64} \cdot \cos 25 = 15,4 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{31} = \frac{10 \cdot P}{S} \cdot \sin\theta = \frac{10 \cdot 80}{17,64} \cdot \sin 25 = 7,2 \text{ МПа}$$

для кута  $\theta = 35^\circ$

$$\tau_{32} = \frac{10 \cdot P}{S} \cdot \cos\theta = \frac{10 \cdot 80}{17,64} \cdot \cos 35 = 18,6 \text{ МПа}$$

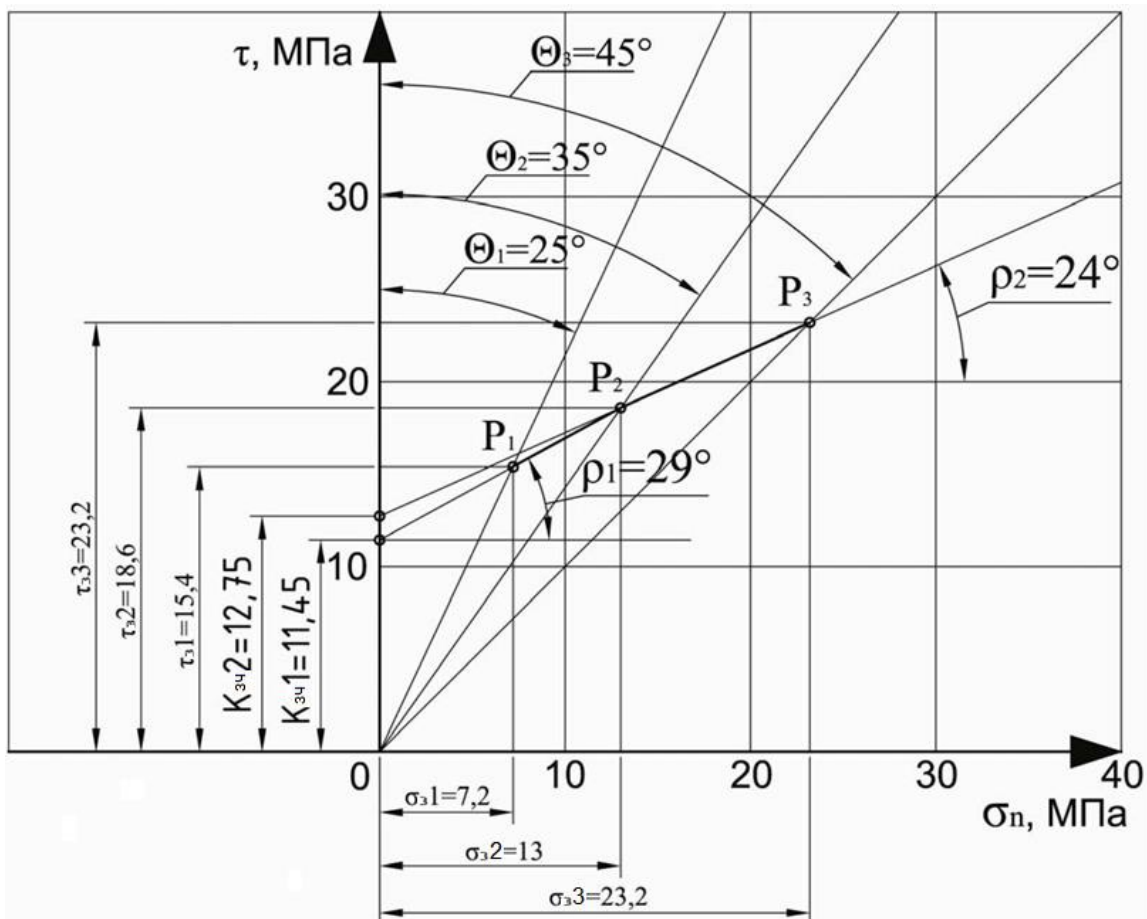
$$\sigma_{32} = \frac{10 \cdot P}{S} \cdot \sin\theta = \frac{10 \cdot 80}{17,64} \cdot \sin 35 = 13 \text{ МПа}$$

для кута  $\theta = 45^\circ$

$$\tau_{33} = \frac{10 \cdot P}{S} \cdot \cos\theta = \frac{10 \cdot 80}{17,64} \cdot \cos 45 = 23,2 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{33} = \frac{10 \cdot P}{S} \cdot \sin\theta = \frac{10 \cdot 80}{17,64} \cdot \sin 45 = 23,2 \text{ МПа}$$

2. Будуємо паспорт міцності (рис. 3.3), для цього наносимо точки  $P_1, P_2, P_3$ , за результатами вищенаведених розрахунків.
3. Проводимо дві прямі через точки  $P_1 - P_2$  та  $P_2 - P_3$ , до перетину з вертикальною віссю. За ординатою перетину прямих з віссю визначаємо зчеплення:  $K_{зч1} = 11,45$  МПа для відрізка  $P_1 - P_2$ ,  $K_{зч2} = 12,75$  МПа для відрізка  $P_2 - P_3$ .
4. По куту нахилу прямих  $P_1 - P_2$  та  $P_2 - P_3$  до горизонтальної вісі визначаємо відповідні значення кута внутрішнього тертя:  $\rho_1 = 29^\circ$  і  $\rho_2 = 24^\circ$ .



**Рисунок 3.3 – Паспорт міцності гірської породи за результатами випробування зразка на зріз із стисненням**

### **Контрольні питання**

1. Обрисуйте визначення тріщини і приведіть класифікацію тріщин за розмірами.
2. Визначте характеристика блочності гірських порід.
3. Викладіть методику визначення кількості зразків для визначення механічних властивостей гірських порід.
4. Наведіть визначення однорідних, неоднорідних, ізотропних, анізотропних гірських порід.
5. Узагальніть визначення коефіцієнта структурного ослаблення.

## Робота № 4

### Побудова паспорта міцності за даними об'ємно-напруженого випробування гірської породи

**Мета роботи:** побудувати паспорт міцності і встановити графічним методом величини зчеплення і кута внутрішнього тертя гірської породи в зразку за результатами її випробування в умовах нерівномірного об'ємно напруженого стану.

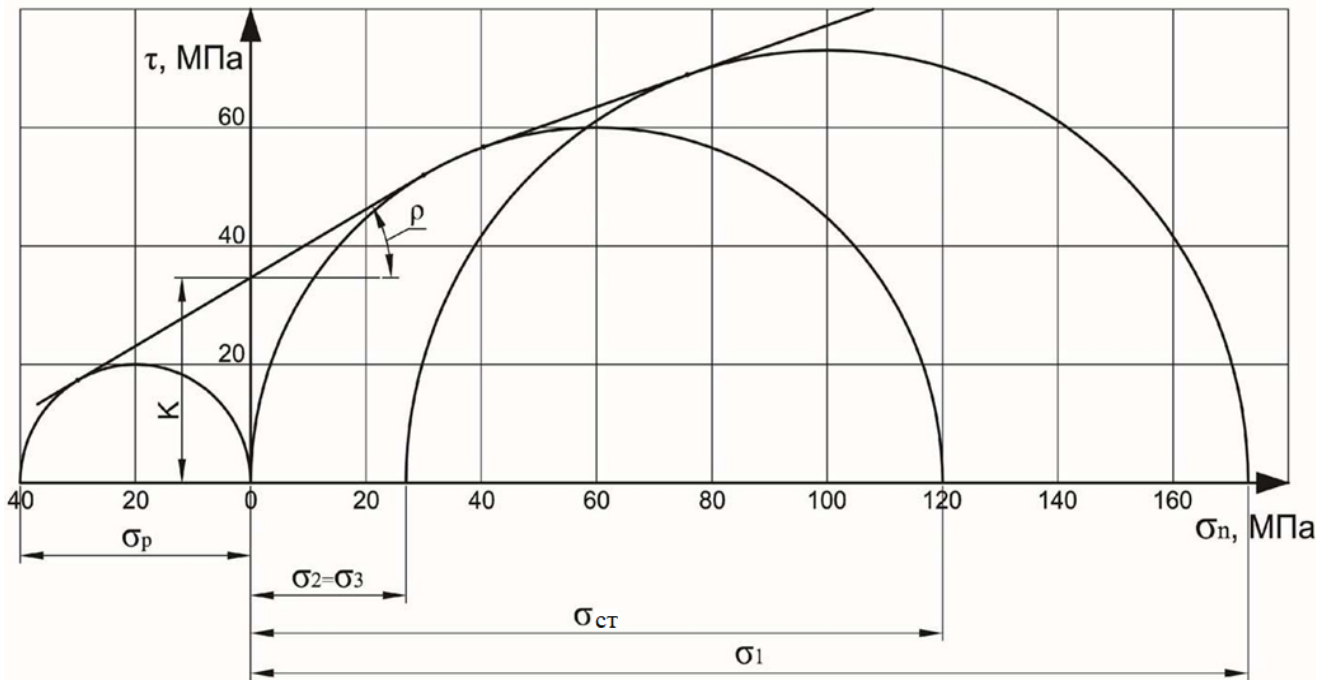
#### Теоретичні відомості

Найбільш точно і повно поведінку гірських порід при руйнуванні відображає паспорт міцності, отриманий за результатами випробувань порід в умовах нерівномірного об'ємного напруженого стану. Відповідні випробування проводять в спеціальному приладі - стабілометрі, який дозволяє створювати напружений стан, обумовлений умовою. Для цього зразок породи поміщають в камеру, наповнену олією. Величину напружень уздовж поздовжньої вісі зразка створюють плунжером від зусилля, створюваного пресом. Величину напружень забезпечують шляхом підтримки тиску в маслі. Зразок породи зазвичай має циліндричну форму діаметром 30-36 мм і висотою 50-70 мм. Плівка гумового клею зберігає зразок від проникнення в нього масла.

#### Порядок виконання

На горизонтальній вісі  $\sigma_n$  (рис. 4.1) від нуля вліво відкладають значення границі міцності на одновісне розтягування, а вправо - значення межі міцності на стиснення ( $\sigma_c$ ) при  $\sigma_n = 0$  (вихідні данні брати з табл. 4.1). На цих відрізках, як на діаметрах, будують кола. Потім вправо від нуля відкладають попарно значення, отримані в ході описаних випробувань. По отриманих колах проводять огинаючу криву (рис. 4.1), дотична до якої визначає для зразка величину зчеплення, а кут її нахилу до горизонту - кут внутрішнього тертя.

Оформіть звіт. Підготуйте відповіді на контрольні питання.



**Рисунок 4.1 – Побудова паспорту міцності за результатами випробувань порід при об'ємному напруженому стані**

**Контрольні питання:**

1. Сформулюйте стадії ідеальної деформації гірських порід при тривалому впливі на них навантажень.
2. Наведіть рівняння для опису деформацій при тривалій дії навантажень.
3. Поясніть релаксацію напружень в гірських породах.
4. Проаналізуйте взаємозв'язок поточної напруги з часом навантаження.
5. Порівняйте вплив часу навантаження на міцність різних гірських порід.
6. Назвіть причини консолідації порід при тривалій дії навантажень.

**Таблиця 4.1 – Вихідні дані**

Номер варіанту	Межа міцності породи, МПа:		Напруження $\sigma_2 = \sigma_3$ , МПа	Напруження, МПа
	на стискання	на розтягнення		
1	70	25	15	110
2	100	35	25	150
3	80	30	15	115
4	75	25	15	110
5	60	14	20	100
6	60	28	20	95
7	80	30	15	110
8	70	20	24	130
9	110	35	15	140
10	90	25	15	130
11	120	45	14	150
12	65	14	10	100
13	100	24	30	180
14	90	22	25	160
15	85	18	15	140
16	75	16	15	125
17	65	14	14	110
18	55	12	12	105
19	50	10	15	110
20	45	10	15	100
21	60	20	20	100
22	100	35	25	160
23	80	25	15	120
24	70	22	15	110
25	55	14	20	100
26	60	28	30	120
27	70	30	20	110
28	55	20	30	130
29	50	15	18	90
30	70	23	25	130
31	65	20	22	120
32	60	17	12	95
33	55	10	8	90
34	110	27	22	180
35	105	25	25	190
36	90	16	18	140
37	80	18	20	145
38	70	14	11	110
39	60	16	15	105

## Робота № 5

### Побудова круглоциліндричної поверхні ковзання

**Мета роботи:** побудувати потенційну поверхню ковзання (руйнування) на схилі.

За даними варіанту (табл. 1.1) і наданим в роботі №1 значенням зчеплення і кута внутрішнього тертя побудуйте потенційну поверхню ковзання (руйнування) на схилі, використовуючи наступний порядок.

#### Порядок виконання

1. У масштабі (1: 500, 1: 1000, 1: 2000) побудуйте поперечний розріз укосу (рис. 5.1).

2. Розрахуйте величину зчеплення в масиві борту по формулі

$$K_M = \frac{K}{1 + \alpha \cdot \ln\left(\frac{H}{l_{cp}}\right)} \quad (5.1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт структурного послаблення (табл. 5.1),  $l_{cp}$  – середній розмір структурного блоку м.

**Таблиця 5.1 – Значення коефіцієнта структурного послаблення**

Зчеплення породи в зразку, МПа	Коефіцієнт структурного послаблення
$K < 0,4$	0,5
$0,4 \leq K < 2,0$	2,0
$2,0 \leq K < 8,0$	2,5
$8,0 \leq K < 15$	3,0
$15 \leq K < 17$	4,0
$17 \leq K < 20$	5,0
$20 \leq K < 30$	6,0
$K \leq 30$	7,0

3. Визначте розрахункові значення зчеплення ( $K_p$ ) і кута внутрішнього тертя ( $\rho_p$ ) з урахуванням коефіцієнта запасу міцності (стійкості) рівного  $\eta_p = 1,5$ :

$$K_p = \frac{K_M}{\eta_p} \quad (5.2)$$

$$\rho_p = \arctg\left(\frac{tg\rho}{\eta_p}\right) \quad (5.3)$$

4. Розрахуйте глибину потенційної тріщини відриву за формулою:

$$H_{90} = \frac{2K_p}{\gamma} \cdot ctg\left(45 - \frac{\rho_p}{2}\right) \quad (5.4)$$

де  $\gamma$  – об'ємна вага породи,  $\text{кН/м}^3$ .

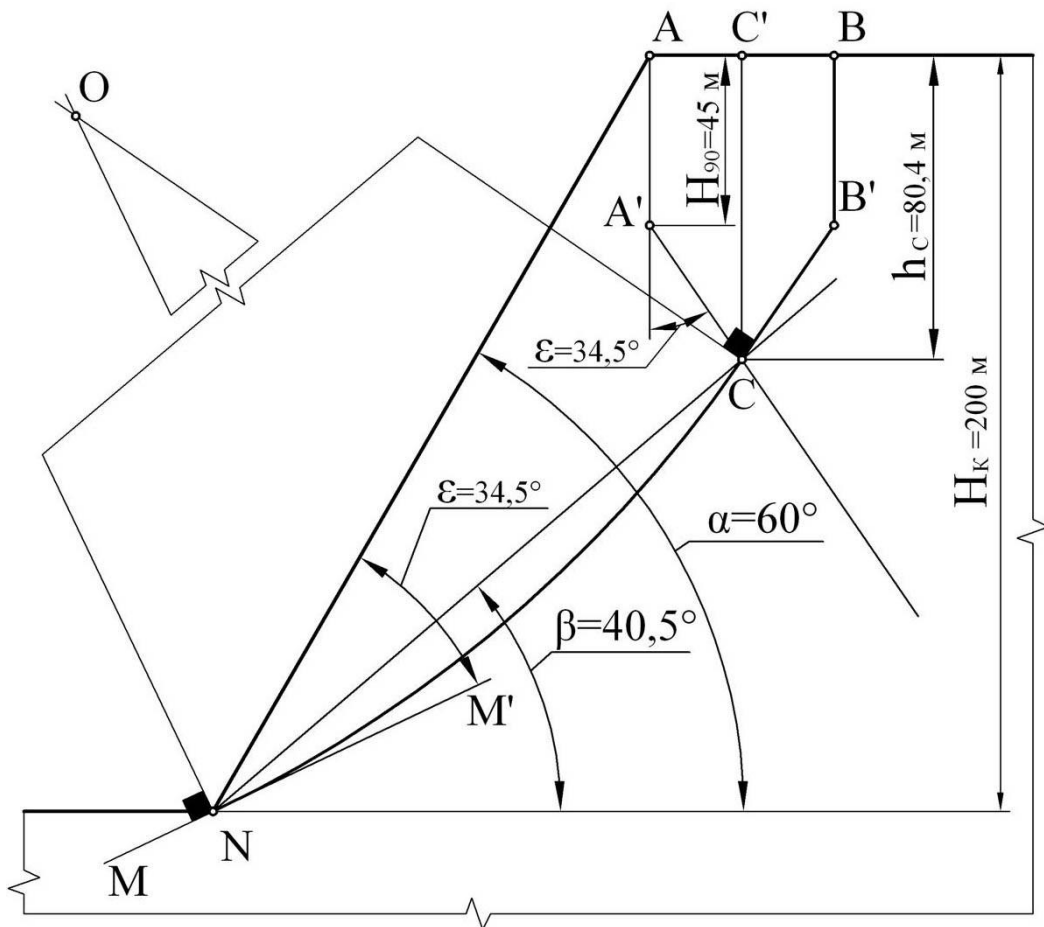


Рисунок 5.1 – Схема побудови поверхні ковзання

5. Визначте значення кутів:

$$\varepsilon = 45 - \frac{\rho_p}{2} \quad (5.5)$$

$$\beta = \frac{(\alpha + \rho_p)}{2} \quad (5.6)$$

6. На розрізі укосу борту котловану побудуйте з урахуванням параметрів  $H_{90}$ ,  $\varepsilon$ ,  $\beta$  потенційну поверхню ковзання.

### ***Вирішення***

$$K_M = \frac{84,6}{1 + 6,4 \cdot \ln\left(\frac{200}{0,8}\right)} = 0,81 \text{ МПа}$$

$$K_p = \frac{0,81}{1,5} = 0,54 \text{ МПа}$$

$$\rho_p = \arctg\left(\frac{\text{tg}30}{1,5}\right) = 21^\circ$$

$$H_{90} = \frac{2 \cdot 0,54}{0,035} \cdot \text{ctg}\left(45 - \frac{21^\circ}{2}\right) = 45 \text{ м}$$

$$\varepsilon = 45 - \frac{21^\circ}{2} = 34,5^\circ$$

$$\beta = \frac{(60^\circ + 21^\circ)}{2} = 40,5^\circ$$

### ***Побудова поверхні ковзання***

Від верхньої бровки відкосу А в точку А' проводимо вертикаль довжиною  $H_{90} = 45,0$  м (рис. 5.1). З точки А' під кутом  $\varepsilon = 34,5^\circ$  до вертикалі проводимо пряму лінію А'С. З точки N нижньої бровки укосу під кутом  $\beta = 40,5^\circ$  до горизонту проводимо лінію NC до перетину її в точці С з лінією А'С. З точки С до верхнього майданчика проводимо вертикальну лінію СС'.



Щодо лінії  $CC'$  будемо трапецію  $BB'CC'$ , симетричну трапеції  $AA'CC'$ . Через точку  $N$  нижньої бровки під кутом  $\varepsilon = 34,5^\circ$  до лінії укосу проводимо лінію  $MM'$ . З точки  $N$  до лінії  $MM'$  і з точки  $C$  до лінії  $CB'$  будемо перпендикуляри до моменту їх перетину в точці  $O$ , яка є центром круглоциліндричної поверхні ковзання. За допомогою циркуля дугою (радіусом  $R = OC = ON$ ) з'єднаємо точки  $C$  і  $N$ .

Пошукувана поверхня ковзання з'єднає точки  $B, B', C$  і  $N$  (рис. 5.1).

### **Контрольні питання**

1. Згадайте завдання напруженого стану і за яких припущеннях вирішують розрахунки стійкості укосів?
2. Пояснить як можна розрахувати найбільшу головну напругу?
3. Дайте визначення суцільності масиву гірських порід.
4. Опишіть поняття непошкодженого масиву.
5. Проаналізуйте визначення неоднорідності будови гірських порід.

## Робота № 6

### Визначення коефіцієнта запасу стійкості

**Мета роботи:** розрахувати і побудувати коефіцієнт запасу стійкості (міцності) укосу за критерієм міцності Кулона-Мора за допомогою наступної методики.

#### Порядок виконання

1. На поверхні ковзання позначте кілька точок (рис. 6.1).
2. У цих точках визначте дотичні і нормальні напруження за формулами:

$$\sigma_{ni} = h_i \cdot \gamma \cdot \cos^2 \varphi_i \quad (6.1)$$

$$\tau_{ni} = h_i \cdot \gamma \cdot \sin 2\varphi_i \quad (6.2)$$

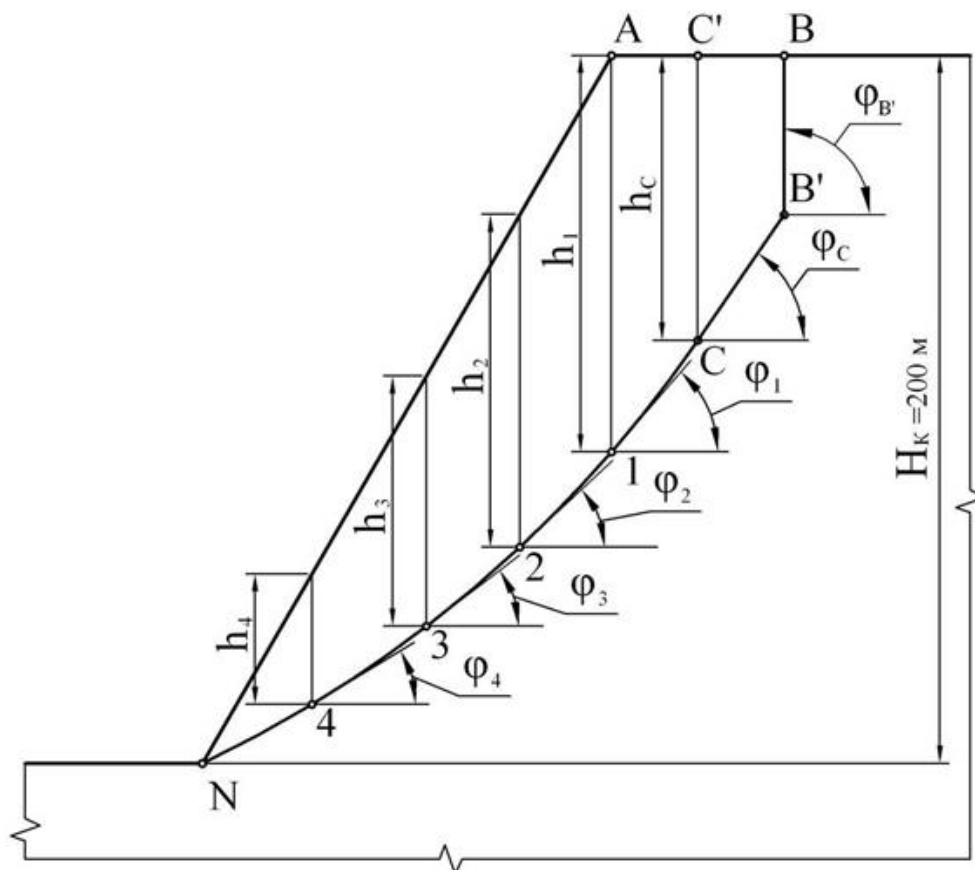
де  $h_i$  – відстань по вертикалі від поверхні уступу до  $i$ -ої точки на поверхні ковзання, м;  $\varphi_i$  - кут нахилу до горизонту дотичний до поверхні ковзання в  $i$ -ої точці, град.

Використовуючи рівняння паспорта міцності (робота №1, формула 1.6) для обчислених нормальних напружень  $\sigma_{ni}$  визначте в зазначених точках опір порід зрушенню  $\tau'_{yi}$ :

$$\tau'_{yi} = K_{зч} + \sigma_{ni} \cdot \operatorname{tg} \rho \quad (6.1)$$

Розрахуйте опір порід зрушенню в зазначених точках с урахуванням масштабного фактора за формулою:

$$\tau_{yi} = \frac{\tau'_{yi}}{1 + \alpha \cdot \ln \left( \frac{H}{l_{cp}} \right)} \quad (6.2)$$



**Рисунок 6.1 – Схема розрахунку коефіцієнту запасу стійкості укусу**

3. Поверхню ковзання з розрахунковими точками розверніть на горизонтальну лінію, з кожної зазначеної точки по осі ординат відкладіть відрізки, відповідні дотичним зсувним напруженням і утримуючим напруження, кінці яких з'єднайте плавною лінією (рис. 6.1).

4. Розрахуйте площі, обмежені віссю абсцис і кривими.

Площа епюри характеризує суму зсувних, а епюри - суму утримуючих сил, що діють по поверхні ковзання.

5. Визначте значення коефіцієнта запасу стійкості співставленням площ цих епюр:

$$\eta_{\theta} = \frac{S_{\tau_y}}{S_{\tau_c}} \quad (6.3)$$

де  $S_{\tau_y}$  – площа епюр утримуючих сил;  $S_{\tau_c}$  – площа епюр зсувних сил.

Якщо  $\eta_\theta < 1$ , то міцність порід не забезпечує стійкість укосу з заданими параметрами, якщо  $\eta_\theta > 1$ , то властивості порід забезпечують необхідний запас стійкості.

### Вирішення

1. Відзначаємо на поверхні точки В', С, 1,2,3,4, N (рис. 6.1).
2. Встановлюємо для зазначених точок відстані від поверхні укосів  $h_i$  і значення кутів нахилу дотичних до поверхні ковзання  $\varphi_i$ .
3. Результати розрахунків зводимо в таблицю 6.1.

**Таблиця 6.1 – Результати розрахунків**

Назва точки	$h_i$ , м	$\varphi_i$ , град	$\sigma_{ni}$ , МПа	$\tau'_{yi}$ , МПа	$\tau_{yi}$ , МПа	$\tau_{ci}$ , МПа
В'	45,0	90,0	0,0	34,6	0,81	0,00
С	80,4	55,5	0,9	35,2	0,82	1,31
1	112,0	49,1	1,7	35,6	0,83	1,94
2	94,0	43,1	1,8	35,7	0,83	1,64
3	70,7	37,5	1,6	35,5	0,83	1,20
4	36,8	31,2	0,9	35,2	0,82	0,57
N	0,0	25,5	0,0	34,6	0,81	0,00

Графік  $\tau_y$  та  $\tau_c$  показані на рис 6.1. З їх допомогою (по площі епюр  $\tau_y$  та  $\tau_c$ ) визначені значення зсувних та затримуючих сил  $S_{\tau_c} = 105$  МН,  $S_{\tau_y} = 42,9$  МН.

Коефіцієнт запасу стійкості:

$$\eta_\theta = \frac{42,9}{105} = 0,41$$

Таким чином, для заданих параметрів укосу властивості порід не забезпечують його тривалу стійкість.

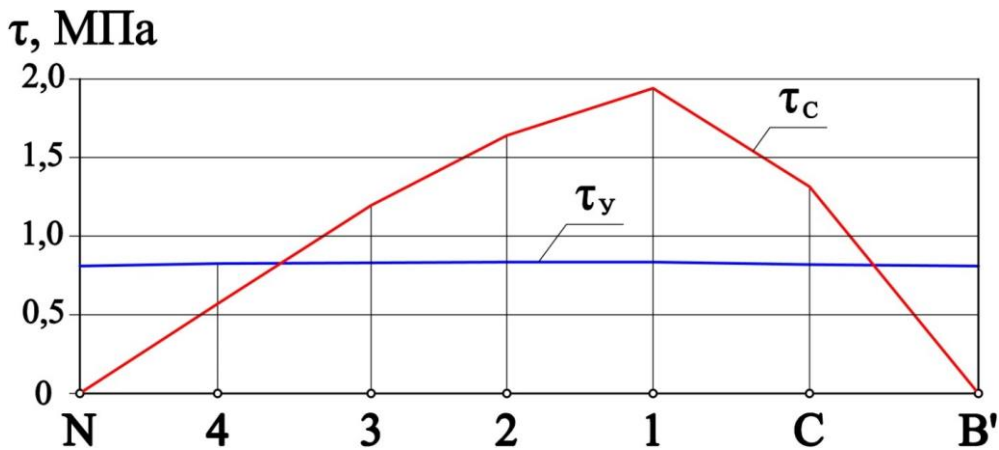


Рисунок 6.2 – Епюри дотичних напружень

### Контрольні питання:

1. Сформулюйте поняття гірського тиску.
2. Поясніть аналітичний метод визначення пружних напружень в породах оточуючих гірничу виробку.
3. Опишіть своїми словами моделювання пружних напружень в гірських породах, що оточують гірничу виробку
4. Проаналізуйте поняття пружної деформацій гірських порід і методи їх визначення.
5. Продемонструйте натурні вивчення напружено-деформованого стану порід, що оточують вироблений простір.
6. Наведіть методи і засоби визначення пружного стану масивів гірських порід.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Управління станом масиву гірських порід / С. С. Гребьонкін, В. Н. Павлиш, В. Л. Самойлов та ін. — Донецьк: ДонНТУ, 2010. — 191 с.
2. Теорія управління станом масиву гірських порід: Підручник для вузів / Бондаренко В. І., Ільяшов М. О., Руденко М. К. — Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2012. — 320 с.
3. Геомеханічні основи підвищення стійкості підготовчих виробок Навчальний посібник / Бондаренко В. І., Бузило В. І., Табаченко М. М., Медяник В. Ю.. — Д.: Національний гірничий університет, 2009. — 407 с.
4. Геомеханіка взаємодії елементів системи «породний масив-виїмкова виробка-охоронна конструкція». Монографія / Бондаренко В. І., Ковалевська І. А., Симанович Г. А., Коваль А. І.. — Дніпропетровськ: «Системні технології», 2007. — 209 с.
5. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник / Л. М. Шутенко, О. Г. Рудь, О. В. Кічаєва та ін. ; за ред. Л. М. Шутенка ; пер. з рос. ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 563 с.
6. Опір матеріалів: Навч. посіб. для студентів ВНЗ. Рекомендовано МОН / Шваб'юк В. І. — К., 2009. — 380 с.
7. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. 2009.

Навчальний посібник

С.М. Стовпник, Л.В. Шайдецька, О.В. Ган

## **Геомеханіка-2. Механіка ґрунтів: Практикум**

для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 184 «Гірництво»

Відповідальний редактор

В.В. Вапнічна

Рецензент

Т.В. Кріль

Комп'ютерна верстка

О.В. Ган

## ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ПРИЙНЯТИХ ВЕЛИЧИН

- $\rho$  – кут внутрішнього тертя ґрунту, град;  
 $K$  – зчеплення породи, МПа;  
 $\sigma_{cm}$  – межа міцності на стиск, МПа;  
 $\sigma_p$  – межа міцності на розтяг, МПа.  
 $\sigma_n$  – нормальні напруження в ґрунті, кПа, кН/м<sup>2</sup> ;  
 $\tau$  – дотичні напруження в ґрунті, кПа;  
 $P$  – руйнівна сила, кН;  
 $\theta$  – кут між площиною зрізу і напрямком дії руйнівної сили, град;  
 $S = \square \cdot d$  – площа зрізу зразка, см<sup>2</sup>;  
 $K_m$  – зчеплення породи у масиві, МПа;  
 $\alpha$  – коефіцієнт структурного послаблення;  
 $l_{cp}$  – середній розмір структурного блоку, м;  
 $K_p$  – розрахункові значення зчеплення породи, МПа;  
 $\rho_p$  – кута внутрішнього тертя, град;  
 $\eta_p$  – коефіцієнт запасу міцності (стійкості) породи;  
 $H_{90}$  – висота укусу, м;  
 $\gamma$  – об'ємна вага породи, кН/м<sup>3</sup>  
 $\eta_\theta$  – коефіцієнт запасу стійкості породи;  
 $S_{\tau_y}$  – площа епюр утримуючих сил;  
 $S_{\tau_c}$  – площа епюр зсувних сил.