

К.К. Ткачук, д.т.н., проф.

К.Н. Ткачук, д.т.н., проф.

Т.В. Гребенюк, аспір.

Національний технічний університет України «КПІ»

П.З. Луговий, д.т.н., проф.

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко НАНУ

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ НАПРУЖЕНЬ НАВКОЛО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ШПУРУ ПРИ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ КАМ'ЯНОГО БЛОКА

*Розроблено методику експериментального дослідження статичних полів напружень при видобутку кам'яних блоків шпуровим методом, яка дозволила визначити вісесиметричний плоский напружений стан у поперечному перерізі поодинокого циліндричного шпуру, до кругового контуру якого прикладене статичне рівномірне руйнуюче навантаження.*

**Вступ.** Видобуток кам'яних монолітів великих розмірів і розколювання їх на блоки потрібних розмірів у більшості випадків виконується за допомогою використання ряду шпурів, які пробурені в площині запланованого відколу. Цей процес ініціюється прикладанням до стінок циліндричних шпурів статичних або динамічних навантажень. Оскільки стрічка шпурів створює в блоці гірської породи направлену штучну анізотропію [1], яка сприяє утворенню площини відколу в запланованому напрямку, то важливо знати, яке поле напружень виникає навколо окремого шпуру при його навантаженні. Для цього проведемо експериментальне дослідження розподілу напружень навколо поперечного перерізу циліндричного шпуру при дії на його стінки нормального статичного навантаження. Так як натурні експерименти вимагають великих матеріальних витрат і необхідності значної кількості багатоканальної вимірювальної апаратури, яка повинна мати широкі можливості в амплітудному і частотному діапазонах реєстрації параметрів досліджуваних процесів, то основну увагу приділимо лабораторному моделюванню.

В гірничій справі експериментальне моделювання застосовується для вирішення завдань дослідження процесів статичної і динамічної породних масивів. При цьому розглядаються просторові (тривимірні) і плоскі (двовимірні) задачі геомеханіки, причому, зазвичай, перевага віддається, якщо це можливо, плоским задачам, які дозволяють досліджувати більш багатопараметричні системи.

**Постановка завдання.** В даній роботі розглядаються різні аспекти технологій відділення каменю за допомогою буріння ряду циліндричних шпурів, довжина яких значно більша від їх діаметра, тому можна вважати, що їх кінцеві частини не впливають на середню частину шпуру і для неї реалізуються умови плоскої деформації. В такому випадку для кожного перпендикулярного до осей шпурів стрічки перерізу будемо мати однаковий розподіл напружень навколо контурів шпурів [2]. Та обставина, що рівняння, які описують розподіл напружень при плоскій деформації відрізняються від рівнянь, що описують розподіл напружень при плоскому напруженому стані, відрізняються лише постійним множником, дає нам змогу виконати експериментальні моделювання на пластинах, а не на тривимірних зразках [3].

Таким чином, для визначення розподілу напружень навколо поперечного перерізу циліндричного шпуру маємо подібну задачу про плоский напружений стан. Зауважимо, що при експериментальному моделюванні необхідно, щоб отвір у пластині, яка вирізана з об'ємного зразка перпендикулярно осі шпуру, мав навантаження відповідне до реального. Граничні умови на краях пластини повинні відповідати граничним умовам об'ємного зразка. В подальшому будемо вважати, що грані кам'яних блоків вільні від навантажень.

**Викладення основного матеріалу та результати досліджень.** Як експериментальний матеріал були обрані пластини з органічного скла, фізико-механічні якості якого подібні до властивостей гірських порід середньої міцності. Окрім цього, процес тріщиноутворення в таких пластинах добре спостерігається візуально. Фізико-механічні параметри органічного скла такі: модуль пружності –  $E = 5,25 \cdot 10^9$  Па; коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,35$ ; щільність  $\rho = 1,12 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Спочатку була розроблена методика створення статичних навантажень на контур шпурового отвору. При видобутку кам'яних блоків із застосуванням НРС, або створення нормального тиску на стінки шпуру за допомогою еластичної камери в поперечному перерізі шпуру виникає вісесиметричне навантаження. Аналогічне навантаження необхідно прикласти до стінок кругового отвору в пластині з органічного скла.

В пластині з органічного скла 1 (рис. 1) товщиною  $h = 4,0$  мм висвердлювався круговий отвір діаметром  $D = 16$  мм. Розміри пластини по ширині і довжині в 20 разів перевищували діаметр отвору.

Статичне навантаження на контур отвору в пластині 1 створювалося за допомогою пристрою, який має шток 2 з конусом і різьбою М8 2 (рис. 1). Завдяки циліндричному стакану 3, вісь якого проходить через центр отвору і співпадає з віссю штока 2, за допомогою гвинта 8, який вкручується в конічну частину штока 2, створюється рівномірне вісесиметричне навантаження на контур отвору. Циліндричний стакан 3, виготовлений з міцної сталі спираючись на пластину, врівноважує зусилля  $F$ , яке створюється гвинтом 4.

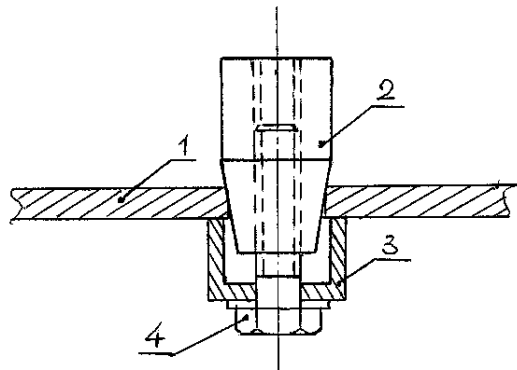


Рис. 1. Пристрій для створення статичного навантаження

Статичне навантаження контуру отвору в пластині створюється гвинтом за допомогою динамометричного ключа. Виконаємо розрахунок навантаження контуру отвору, використовуючи схему (рис. 2).

З розрахункової схеми слідує:  $F_1 = F \sin \alpha$ ;  $F_2 = F \cos \alpha$ ;  $F_3 = F_1 \cos \alpha = 1/2 F \sin 2\alpha$ .

В проведених дослідах використовувався шток 2 (рис. 1) зі зрізаним конусом, розміри якого такі: діаметр зрізаної вершини конуса – 11,5 мм; діаметр його основи – 19,5 мм; висота зрізаного конуса – 16,5 мм. Звідси слідує, що кут конусності  $\alpha = 13^\circ 25'$ .

Згідно з принципом Сен-Венана, на відстані товщини пластини  $h$  від зовнішньої стінки циліндричного стакану 3 можна вважати, що радіальні зусилля  $F_3$  створюють рівномірні напруження по товщині пластини, які визначаються таким чином  $\sigma_r = F_3 / \pi \cdot D \cdot h$ . Для такого випадку навантаження в пластині в зоні  $r > R + h$  реалізується вісесиметричний плоский напружений стан.

Вага пристрою для навантаження контуру отвору в пластині (рис. 1) незначна, тому при визначенні напружень вона не враховувалася.

Посилаючись на сказане вище, тензодатчики для вимірювання радіальних і тангенціальних деформацій від дії вісесиметричного рівномірного навантаження на контур отвору наклеювалися на пластину за допомогою епоксидної смоли на відстані  $r = 14,8$  мм від центра отвору.

Тензодатчики для вимірювання радіальних деформацій  $\epsilon_r$  наклеювалися по лінії, що проходить через центр отвору, а для тангенціальних деформацій  $\epsilon_\theta$  – перпендикулярно цій лінії. Для виміру статичних деформацій використовувалися тензодатчики  $R_{\text{нзм}}$  марки КФ4П1-5-200В-12 з опором 216 Ом і базою  $l = 5$  мм та коефіцієнтом чутливості  $\gamma = 2,16$ .

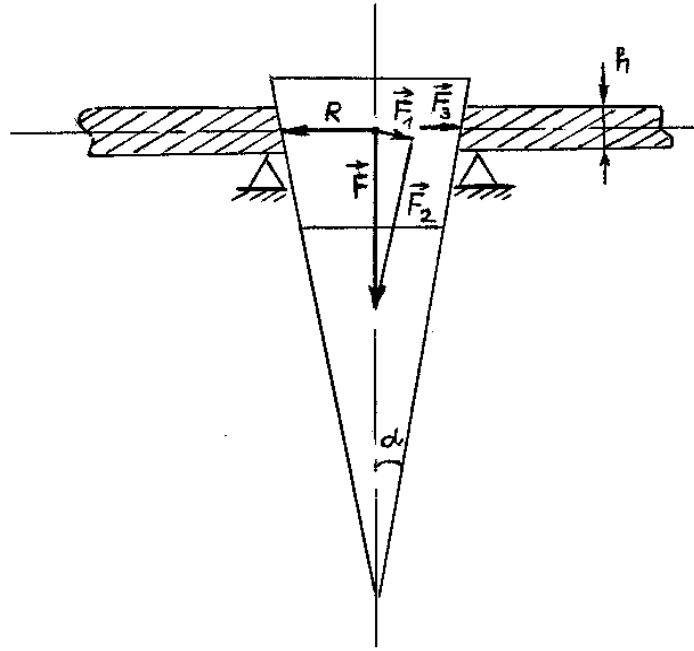


Рис. 2. Схема для розрахунку навантаження контуру отвору

Датчики підключалися в мостову схему [4] (рис. 3).

Як опори  $R_1$ – $R_3$  можна використати такі ж тензорезистори, як і вимірювальні, але наклеєних поза зоною вимірів деформацій. Оскільки вони знаходяться в тих же умовах, що і вимірювальний тензорезистор  $R_{вим}$ , то термокомпенсація мостової схеми буде виконана.

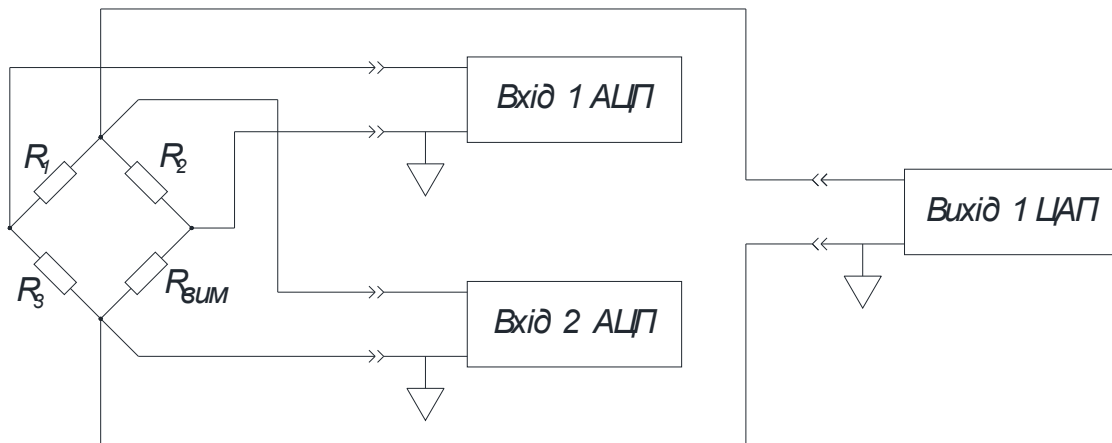


Рис. 3. Принципова схема експерименту

Наклеєні тензодатчики і встановлений навантажувальний пристрій показано на рисунку 4. Статичне навантаження контуру отвору в пластині з органічного скла виконувалося за допомогою динамометричного ключа, яким закручувався гвинт 4 (рис. 1) з кроком у півоберта. Сигнал розбалансу мостової схеми (рис. 3) подавався на цифровий вимірювач деформацій ИДЦ-1, а результат вимірів висвічувався на цифровому моніторі (рис. 5).

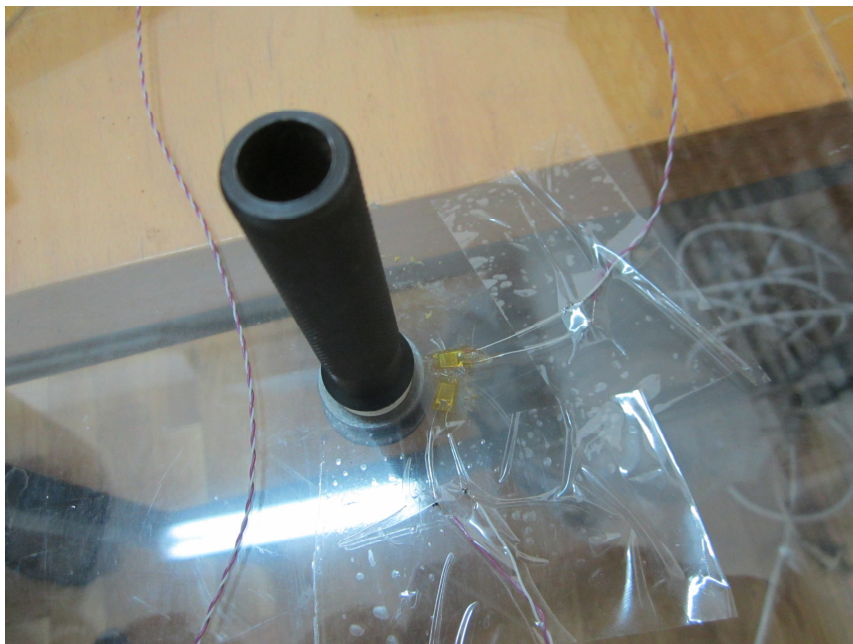


Рис. 4. Навантажувальний пристрій

Радіальним  $\varepsilon_r$  і тангенціальним  $\varepsilon_\theta$  деформаціям на цифровому моніторі відповідають величини вимірів у мВ (N). Підрахунок реальних деформацій виконувався згідно з формулою [4]:

$$E = 10^{-5} \cdot 2\Delta N / \gamma, \quad (1)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт чутливості тензодатчика.



Рис. 5. Цифровий вимірювач деформації ИДЦ-1

Результати вимірів наведено в таблиці 1. У першому рядку вказана величина інтенсивності дії рівномірного вісесиметричного навантаження  $P$  на контур отвору в пластині з органічного скла. В другому – величини розбалансу мостової схеми тензодатчика в мВ ( $N_{0мВ}$ ), який вимірює тангенціальні деформації –  $\varepsilon_\theta$ . В третьому представлено значення реальних тангенціальних деформацій –  $\varepsilon_\theta$ , які обчислені за формулою (1). В четвертому – надано значення розбалансу мостової схеми тензодатчика в мВ ( $N_{рмВ}$ ), який вимірює радіальні деформації –  $\varepsilon_r$ , а в п'ятій – відповідні реальні величини радіальних деформацій –  $\varepsilon_r$ , які обчислені за формулою (1).

Таблиця 1

## Результати експериментальних досліджень

$P, \text{Па}$	0,0	$0,15 \cdot 10^7$	$0,25 \cdot 10^7$	$0,5 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$
$N_{0\text{мВ}}$	645	703	771	832	889	955	1014	700
$\epsilon_0$	0,0	$0,58 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$2,44 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-3}$	$3,69 \cdot 10^{-3}$	$0,55 \cdot 10^{-3}$
$N_{\text{тмВ}}$	956	924	898	853	821	787	755	837
$\epsilon_r$	0,0	$-0,32 \cdot 10^{-3}$	$-0,68 \cdot 10^{-3}$	$-1,03 \cdot 10^{-3}$	$-1,35 \cdot 10^{-3}$	$-1,69 \cdot 10^{-3}$	$-1,69 \cdot 10^{-3}$	$1, \cdot 10^{-3}1$

З таблиці видно, що тріщина, яка показана на рисунку 6, утворилася на етапі навантаження контуру отвору дією рівномірного вісесиметричного навантаження  $P$  при величині інтенсивності від  $2,0 \cdot 10^7$  до  $2,5 \cdot 10^7$  Па. Візуальному спостереженню утворення тріщини відповідає різке падіння величин деформацій  $\epsilon_r$  і  $\epsilon_0$ . Так як навантаження при цьому проходило за межами пружності органічного скла, то при утворенні тріщини навколо отвору збереглися залишкові деформації, величина яких вказана в останньому стовпчику таблиці 1.

З рисунку 6 видно, що тріщина розповсюдилась на відстань  $l = 29$  мм. Оскільки краї пластини вільні від навантажень, то в зоні з радіусом більше ніж  $R + l$  стискаючі напруження мають недостатню інтенсивність для подальшого розвитку тріщини, а статичне навантаження на контур отвору знизилось за рахунок появи тріщини. З механіки руйнування суцільних середовищ відомо, що тріщина утворюється в зоні розтягуючих і розвивається в напрямку стискаючих напружень. Тому в подальших експериментах будемо приділяти увагу вимірюванні радіальних деформацій стиску.

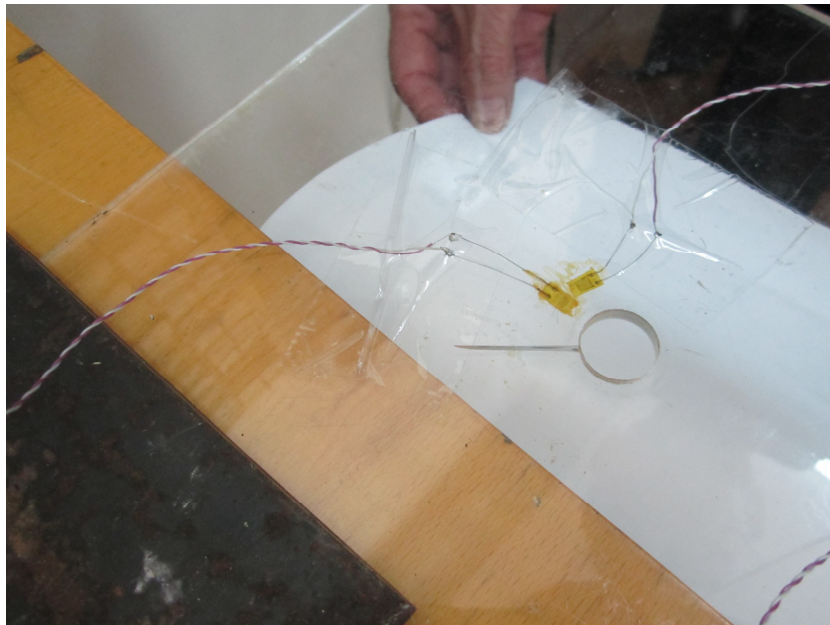


Рис. 6. Результат дії рівномірного вісесиметричного навантаження на контур отвору

Зі схеми навантаження отвору (рис. 2) слідує, що в пластині реалізується вісесиметричний напружений стан відносно центру отвору. Тому навіть при ідеальному просвердлюванні отвору і його навантаженні практично неможливо зарання передбачити точку на контурі отвору, де зароджується тріщина.

З таблиці видно, що на початку навантаження тангенціальні деформації  $\epsilon_0$  перевищують радіальні деформації  $\epsilon_r$ . Після утворення тріщини (рис. 6) тангенціальні деформації  $\epsilon_0$  різко падають. Вони не падають до нульових значень, оскільки навантаження на контур отвору викликали пластичні деформації і виникло явище «наклепу», іншими словами розвантаження же пройшло не по лінії навантаження.

#### Висновки:

1. Розроблена експериментальна методика, яка дозволила змоделювати і визначити вісесиметричний плоский напружений стан в поперечному перерізі поодинокого циліндричного шпuru, до кругового контуру якого прикладене статичне рівномірне навантаження, аж до процесу руйнування.

2. Розроблена методика експериментального дослідження взаємодії статичних полів навантаження при видобутку кам'яних блоків шпуровим методом.

**Список використаної літератури:**

1. *Ткачук К.К.* Аналіз впливу якості бурових робіт на видобуток блочного каменю / *К.К. Ткачук, Т.В. Гребенюк* // матер. VI Междунар. науч.-практич. конф. молодих учених, аспірантов и студентов «Перспективы освоения подземного пространства». – Днепропетровськ, 2012.
2. *Карасев Ю.Г.* Природный камень. Добыча блочного и стенового камня : учеб. пособие / *Ю.Г. Карасев, Н.Т. Бакка*. – СПб, 1997. – 428 с.
3. *Савин Г.Н.* Распределение напряжений около отверстий / *Г.Н. Савин*. – К. : Наукова думка, 1968. – 887 с.
4. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений : справ. пособие. – К. : Наукова думка, 1981. – 583 с.

ТКАЧУК Костянтин Костянтинович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерної екології Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- гірництво;
- сучасні методи видобутку каменю.

ТКАЧУК Костянтин Нифонтович – доктор технічних наук, професор кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- гірництво;
- сучасні методи видобутку каменю.

ГРЕБЕНЮК Тетяна Володимирівна – аспірантка кафедри інженерної екології Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- гірництво;
- сучасні методи видобутку каменю.

ЛУГОВИЙ Петро Захарович – доктор технічних наук, професор Інституту механіки ім. С.П. Тимошенко НАНУ.

Наукові інтереси:

- гірництво;
- сучасні методи видобутку каменю.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2012