

УДК 622.83:622.27

С. В. ПИСЬМЕННИЙ

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОЇ ЗОНИ СКЛЕПОУТВОРЕННЯ НА КОНТУРІ ПІДЗЕМНО-ТРАНСПОРТНОЇ ВИРОБКИ ПРИ КОМБІНОВАНІЙ РОЗРОБЦІ ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ

Запропонована методика визначення кутової точки руйнівного тиску на контурі гірничої виробки з урахуванням техногенних сил, яка дає можливість визначити тиск та слабе місце на контурі гірничої виробки в умовах однорідного та неоднорідного гірського масиву. Дана методика дозволяє розрахувати тиск який діє на контур виробки з урахуванням раніше відробленого очисного блоку, що знаходиться в безпосередній близькості. Дана методика відрізняється від відомих визначенням кута діючого руйнівного тиску на контурі виробки урахуванням глибини розробки, радіусу кривизни склепіння утворюючої виробку та напруженнями, які змінюють початкове поле при очисному вийманні.

Ключові слова: напруження, кутова руйнівна точка, виробка, радіус кривизни склепіння, тиск, очисний блок.

Предложена методика определения угловой точки разрушаемого давления на контуре горной выработки с учетом техногенных сил, которые дают возможность определить давление и слабое место на контуре подземной горной выработки в условиях однородного и неоднородного горного массива. Данная методика позволяет определить действующего давления на контур выработки с учетом ранее отработанного очистного блока находящегося в непосредственной близости. Методика определения действующего угла разрушительного давления на контуре выработки отличается от известных учетом глубины разработки, радиуса кривизны свода образования выработки и напряжений, которые изменяют первоначальное поле при очистной выемке.

Ключевые слова: напряжение, угловая разрушительная точка, выработка, радиус кривизны свода, давление, очистной блок.

The article proposes a method for determination of the angular point of the destructive pressure on the mine working contour, taking into account the man-made forces, which makes it possible to determine the pressure and weak point on the mine working contour in a homogeneous and heterogeneous mountain massif. When solving the issue of the stability of mine workings in a multi-modular rock massif and determining the angular point of the destructive pressure on the mine working contour of a vaulted form, an analytical method of research is applied, taking into account the practice of the Kryvbas mines and establishing certain limitations when using it. This method differs from the known ones by determining the angle of the acting destructive pressure on the mine working contour taking into account the mine working depth, the vault curvature radius of the mine working generator and the stresses that change the initial field in the cleaning cavity. This method allows to calculate the pressure acting on the mine working contour, taking into account the previously used treatment unit in close proximity. The possibility of adjusting the parameters of the mine workings at the design stage of the block's excavation is determined directly when mining in homogeneous and heterogeneous rocks, taking into account the man-made forces and the shear angle of the rocks in which the mining working is done. The choice of the most expedient vault curvature radius of the mine working generator will increase the resistance of the rocks around the mine.

Keywords: tension, angular destructive point, mine working, vault curvature radius, pressure, cleaning block.

Вступ. Залізородне родовище Криворізького басейну представлено поодинокими та паралельно-зближеними рудними тілами природно-бідних і природно-багатих руд, які розробляються відкритим і підземним способами. За попередньою оцінкою, при існуючих обсягах виробництва гірничодобувні підприємства Криворізького залізородного басейну до 2070

рр. відпрацюють, близько 70% балансових запасів природно-бідних залізних руд (4,7 млрд. т) або досягнуть максимальної економічно-доцільної глибини ведення відкритих гірничих робіт [1-3]. В межах діючих гірничодобувних комплексів зосереджено понад 2,1 млрд. т запасів залізистих кварцитів, перспективних до комбінованої відкрито-підземної розробки (табл. 1) [4].

Таблиця 1 – Запаси природно-бідних руд залізистих кварцитів Криворізького родовища перспективних для розробки комбінованим відкрито-підземним способом

Гірничодобувний комплекс	Глибина гірничих робіт, м	Запаси в межах родовища, млн. т	
		балансові	забалансові
Ганнівський кар'єр	275	500	340
Першотравневий кар'єр	400	710	480
Інгулецький кар'єр	395-440	440	140
Південний кар'єр	325-350	1800	600
Глеєватський кар'єр	395	710	350
Петровський кар'єр	305		
Артемівський кар'єр	185		
Кар'єр №2-біс	225	2650	235
Кар'єр №3-біс	300		
		6810	2145

Відпрацювання забалансових запасів залізних руд в межах діючих гірничодобувних підприємств, комбінованим відкрито-підземним способом з річною продуктивністю 10 млн. т, дозволить подовжити їх плідну роботу ще на 20-30 років.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У розвиток теорії комбінованої відкрито-підземної розробки внесли значний вклад досліджен-

ня: В.О. Щелканова, Д.Р. Каплунова, В.С. Хохрякова, К.Н. Трубецкого, Б.М. Андреева, С.О. Сторчака, А.Д. Черних, М.І. Ступніка та інші вчені, які запропонували наступні варіанти комбінованої відкрито-підземної розробки: коли початок розробки здійснюється відкритим способом, а доопрацювання запасів – підземним, рис. 1, а; сумісної розробки родовища в часі та в просторі, рис. 1, б.

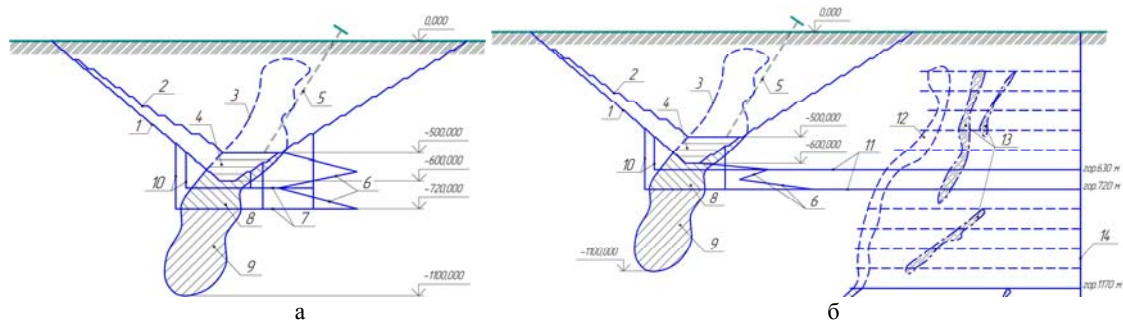


Рис. 1 – Схема розкриття забалансових запасів комбінованим відкрито-підземним способом: а – з транспортуванням руди на борт кар'єру; б – з транспортуванням руди до головного ствола; 1, 2 – контур кар'єру відповідно граничний та робочий; 3 – відпрацьовані запаси відкритим способом; 4, 8 – запаси, що відпрацьовуються відповідно відкритим та комбінованим способами; 5 – циклічно-поточкова технологія; 6 – похилий спіральний з'їзд; 7 – транспортні горизонти; 9 – поклад залізістих кварцитів; 10 – шурф; 11 – відкотний горизонт; 12 – запаси, що відпрацьовані підземним способом; 13 – поклад супутньої мінеральної сировини або бідних залізних руд.

Розкриття забалансових запасів відкрито-підземним способом з транспортуванням руди з очисного блоку на борт кар'єру здійснюється за допомогою похилих транспортних виробок, рис. 1а. Портал похилої транспортної виробки розташовують безпосередньо на дні кар'єру або на робочому горизонті біля комплексу циклічно-поточної технології. Транспортування гірничої маси з очисного блоку до колодязю крупного дроблення здійснюється підземними автосамоскидами по підземним гірничим виробкам 6, 7 [5].

Розкриття забалансових запасів комбінованим відкрито-підземним способом з транспортуванням руди з очисного блоку до головного ствола здійснюється горизонтальними транспортними виробками 11 або похилою виробкою, рис. 1б. Горизонтальна виробка 11 служить для транспортування гірничої маси до головного рудопідйомного ствола, а похила 6 – доставки до вибою матеріалів, обладнання бурової та прохідницької техніки [1, 4].

Для ефективного видобутку корисної копалини при даних схемах розкриття, необхідно створити єдину підземно-транспортну систему. Головною проблемою при створенні підземно-транспортної системи є забезпечення стійкості гірського масиву навколо підземної транспортної виробки на весь термін розробки родовища.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення небезпечної зони склепоутворення на контурі підземної транспортної виробки.

Задачею дослідження є обґрунтування активної зони склепоутворення на контурі підземної транспортної виробки при відпрацюванні забалансових запасів комбінованим відкрито-підземним способом.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Дослідити вплив початкового поля напружень різномодульного масиву на параметри склепоутворення на контурі підземної транспортної виробки.

2. Удосконалити методику по визначенню активної зони склепоутворення в різномодульному масиві навколо гірничої транспортної виробки.

Матеріали та методи дослідження початкового поля напружень різномодульного масиву на зону склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки. Подальший розвиток комбі-

нованої відкрито-підземної розробки залежить від достовірності наукового прогнозу гірничо-технічних умов, надійної оцінки неторкнутого масиву, а також прогнозування проявів гірського тиску. Застосування потужних самохідних бурових і вантажно-транспортних машин при видобутку залізних руди потребує забезпечувати надійність та стійкість гірничим виробкам з площею поперечного перерізу більше ніж 20 м² на весь термін їх існування [6].

Службою прогнозу гірських ударів ПАТ "Кривбасзалізрудком" було встановлено, що на глибинах понад 1000 м виробки прагнуть прийняти форму поперечного перетину близьку до еліптичної. Зі збільшенням глибини ведення гірничих робіт радіус закруглення для боків виробки збільшується, а для покрівлі виробки зменшується. Залежність радіусів заокруглення боків виробки та покрівлі для гірничої виробки висотою 3,75 м і шириною 5,15 м представлений на рис. 2.

За даними оптико-поляризаційного моделювання [7] встановлено, що контур виробки прагне придбати форму шатра. Виходячи з цього, локальне вивалоутворення можливо на тих ділянках, де зосереджена висока концентрація руйнівних напружень або породи навколо виробки є нестійкими, шаруватими або тріщинуватими.

Руйнівний тиск (вага порід) що діє на контур виробки визначається з виразу

$$P_{к.в} = \pm \frac{P \cdot \sin \delta}{l}, \quad (1)$$

де $P_{к.в}$ – руйнуючий тиск (вага) що діє на контур виробки, т/м²; P – тиск (вага) налягаючих порід, т/м³; l – довжина дуги контуру склепіння виробки, м,

Максимальні напруження в гірському масиві, які виникають на контурі виробки визначається

$$\left. \begin{matrix} \sigma_{\theta} \\ \sigma_r \end{matrix} \right\} = \sigma_z \cdot \left(1 \pm \frac{1}{r^2} \right), \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = 0,$$

де σ_r , σ_{θ} – нормальні та тангенційні напруження, т/м²; r – відстань від центру виробки до елементарного об'єму, м; τ_{xy} – дотичні напруження, т/м²;

Нормальні та дотичні напруження, що входять в

рівняння (2) описуються системою рівнянь

$$\begin{cases} \sigma_{\theta,r} = \sigma_n \cdot \cos \delta, \\ \tau_{r,\theta} = \sigma_n \cdot \sin \delta, \end{cases} \quad (3)$$

де σ_n – діюче значення ущільнюючого напруження, т/м²; δ – кут, під яким діє руйнівний тиск на контур виробки, град.

Підставивши у вираз (2) формули (1 та 3) та ви-

конавши відповідні перетворення, отримаємо остаточне рівняння руйнівного тиску на контурі виробки аркової форми в залежності від кута прикладеного навантаження до контуру виробки

$$P_{к.в} = \pm \frac{r \cdot \tau_0 \cdot \sin \delta}{\sin 2\delta - r^2 \cdot \cos \beta \cdot \text{tg} \rho} \quad (4)$$

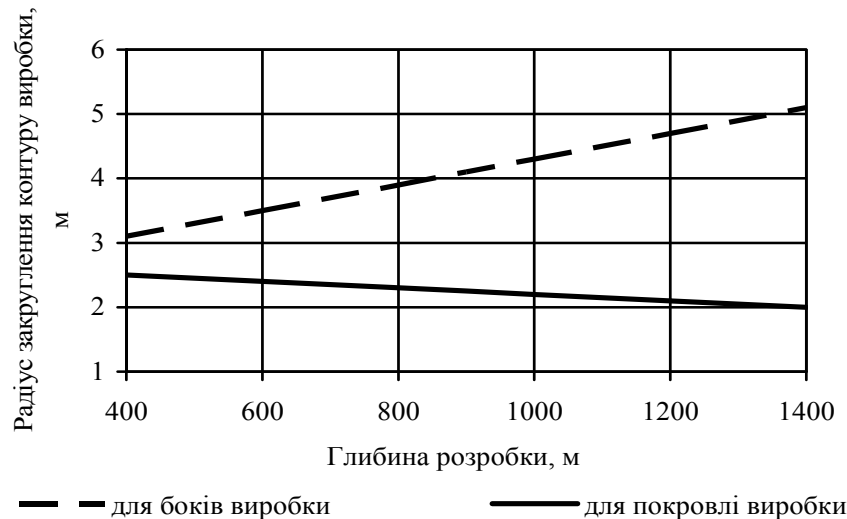


Рис. 2 – Залежності радіусу закруглення контуру гірничої виробки від глибини розробки при площі поперечного перетину 16 м²

Якщо руйнівний тиск масиву, визначений за формулою (4), більше нормальних напружень навколо виробки, то контур гірничої виробки буде зберігати свою стійкість, в іншому випадку контур виробки буде схильний до деформації під кутом δ .

Визначимо розмір породної ділянки що руйнується на контурі виробки від локального вивалоутворення (рис. 3).

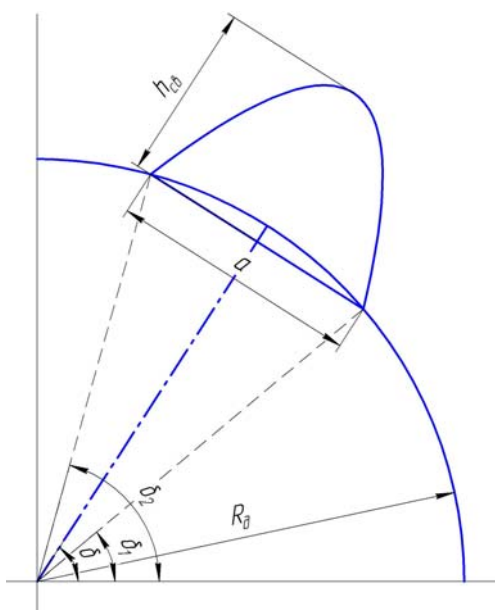


Рис. 3 – Схема до визначення параметрів утворення склепіння обвалення на контурі виробки в верхній її частині

Згідно з дослідженнями [7-10] руйнування порід над очисним простором відбувається по теоріям М.М.Протодьяконова або С.В.Ветрова – гіпотези склепінь [11]. Відповідно до гіпотези склепінь тиск визначається вагою налягаючих порід, ув'язнених у зводі нестійкої рівноваги або динамічно-розвантаженого куполу (зводу) [10-12], з якого частинки рухаються тільки під власною вагою.

При великій прохідності частинок і малому куті внутрішнього тертя витікання відбувається дуже плавно, а під дією вертикальних сил породи в зводі руйнуються. Швидкість випадання або заміщення частинок в динамічному зводі визначається висотою еліпсоїда тиску, а крива динамічного зводу описується рівнянням [12, 13]

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x, \quad (5)$$

де p – висота фігури розвантаження (динамічного) склепіння, м; x – поточна координата по осі $x-x$.

Згідно з дослідженнями [11], висота динамічного зводу склепіння визначається за виразом

$$h_{св} = p = \frac{a}{2 \cdot \text{tg} \rho} = \frac{a}{f}, \quad (6)$$

де $h_{св}$ – висота динамічного зводу, м; a – ширина (прольоту оголення) склепіння в нижній його частині, м; ρ – кут внутрішнього тертя, що відповідає даній висоті переміщення частинок, град.; f – коефіцієнт міцності порід за шкалою проф. М.М. Протодьяконова.

Таким чином, висота динамічного зводу нестійкої рівноваги визначають з виразу

$$h_{cb} = \frac{a}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left(1 - \frac{r^2}{(0,5 \cdot a)^2} \right), \quad (7)$$

де r – радіус склепіння, м.

Відповідно до гіпотези Ветрова С.В. [11], висота динамічного зводу нестійкої рівноваги в загальному вигляді визначається виразом

$$h_{cb} = k_{hc} \cdot a, \quad (8)$$

де k_{hc} – коефіцієнт висоти склепіння.

Відповідно до проведених досліджень проф. В.А.Коржом [12] стосовно породам Криворізького басейну, коефіцієнт висоти склепіння визначається за формулою

$$k_{hc} = \exp(3 \cdot \pi / f - 2) + 0,2. \quad (9)$$

Як показують розрахунки [11], коефіцієнт висоти склепіння змінюється від 0,125 до 0,5 в залежності від міцності порід.

Дослідженнями проф. Борисова А.А. [14] встановлено, що стосовно до осадових шаруватих порід висота склепіння дорівнює; - проф. Галаєва Н.З. [11] з моделювання однорідних тріщинуватих вивержених порід. Так як динамічні склепіння розвантаження постійно руйнуються і утворюються знову висота таких склепінь згідно [11] визначається за формулами (6-8). Розрахунки висоти склепіння нестійкої динамічної рівноваги за виразами (6-8) відрізняються не більше ніж на 3-7%. Таким чином, для подальших розрахунків скористаємося формулою (7).

Згідно рис. 4 проліт вивалоутворення за контуром вироблення визначається за виразом

$$a = R_0 \cdot \sin \left(\frac{180 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot R_0} \right), \quad (10)$$

де R_0 – радіус дуги висота склепіння обвалення, м; l – довжина дуги, м.

Тоді площа вивалу визначається як різниця площ парабол по формулі, рис. 4

$$S = \frac{R_0}{6} \cdot \left(8 \cdot \left(1 - \frac{l}{2 \cdot R_0 \cdot f} \right) \cdot \sin \alpha - \frac{3 \cdot l}{R_0} - \sin 2\alpha \right). \quad (11)$$

У шаруватих породах причиною локального вивалоутворення є зниження міцності та коефіцієнту зчеплення порід між шарами. Значення міцності на контактах між шарами значно менше, тому руйнування в масиві буде відбуватися саме на контактах між породами. Границя вивалу по периметру зводу гірничої виробки обмеженими кутами θ_{xz1} и θ_{xz2} визначається за формулою

$$\begin{cases} \delta_{1,2} = 0,5 \left(\arcsin \left(\sin \rho + \frac{\tau_0}{P} \cos \rho \right) \pm \rho \right), \\ 2 \cdot \sin 2\delta \geq 0. \end{cases} \quad (12)$$

Навантаження від ваги породи на поверхні кріплення при утворенні склепіння обвалення залежить від розтягуючих напружень (рис. 4).

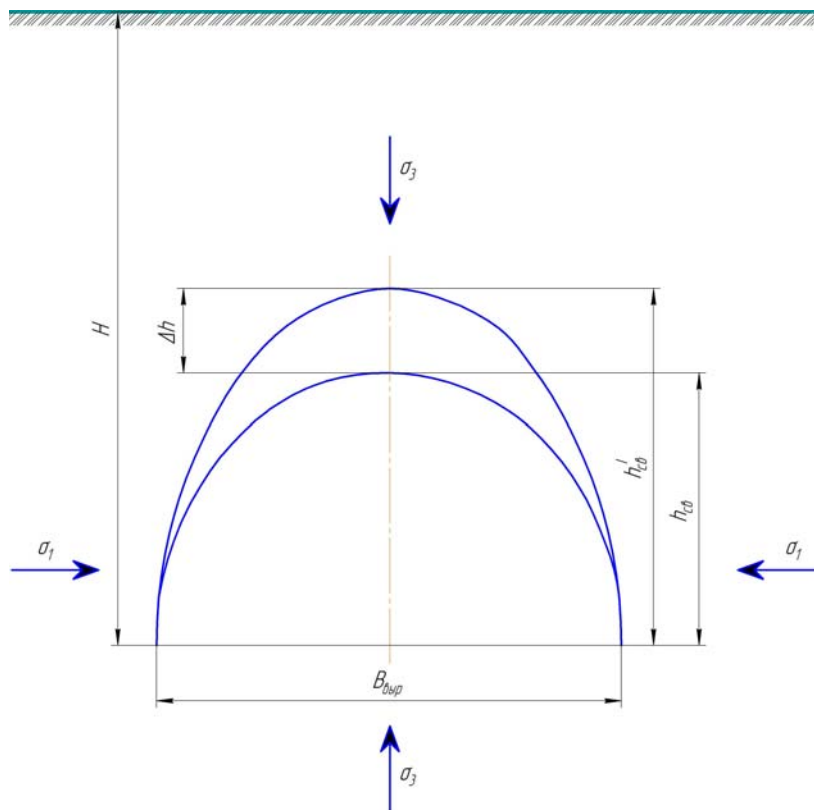


Рис. 4 – Схема до визначення навантаження на кріплення при розвитку сводообразованні від напруг, що розтягують

Висота утворення склепіння нестійкої рівноваги відповідає новому контуру виробки, на якому діють розтягуючі напруження, тому висота склепіння після деформації визначається з виразу

$$\Delta h = h'_{\text{св}} - h_{\text{св}}, \quad (13)$$

де $h'_{\text{св}}$ – висота нового контуру утворюючої склепіння стійкої рівноваги, м;

Після перетворення формули (13) отримаємо остаточний вираз для визначення приросту висоти склепіння нестійкої рівноваги при дії розтягуючих напружень в гірському масиві на контурі гірничої виробки

$$\Delta h = \frac{a \cdot (1 - \mu)}{\mu} \cdot \left(\frac{1 - 2 \cdot \mu}{1 - \mu} - \frac{\sigma_p}{\sigma_z} \right) - h_{\text{св}}, \quad (14)$$

де Δh – деформація початкової висоти утворюючої склепіння стійкої рівноваги від розтягуючих напружень, м; μ – коефіцієнт Пуассона.

Результати дослідження початкового поля напружень різномодульного масиву на зону склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки. Виконав розрахунки відповідно виразу (12), побудовані залежності розподілу руйнівного тиску на контурі виробки в залежності від кута її прикладення для однорідного та неоднорідного масиву, рис. 5, 6

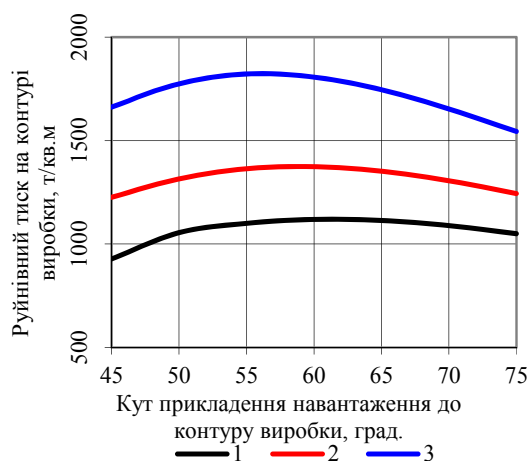


Рис. 5– Величина руйнівного тиску на контурі виробки за зоною впливу очисних робіт в залежності від кута прикладення навантаження до контуру виробки зсуву порід в однорідному масиві: 1–3 – відповідно кут зрушення порід 55,60 і 65 град

З графіків, наведеного на рис. 5, видно, що гранична рівновага на контурі виробки змінюється від 55 до 65 град. в залежності від кута зсуву порід. Так при куті зсуву порід 55 град. утримуюча сила на контурі виробки діє під кутом 65 град., а зі збільшенням кута зсуву до 65 град. кут максимально утримуючої сили зменшується до 55 град.

Згідно графіків, наведених на рис. 6, встановлено, що в неоднорідному масиві руйнівне навантаження на контурі виробки діє під кутом 55 град. а макси-

мально-допустимі руйнівні напруження зменшується з 1190 до 550 т/м².

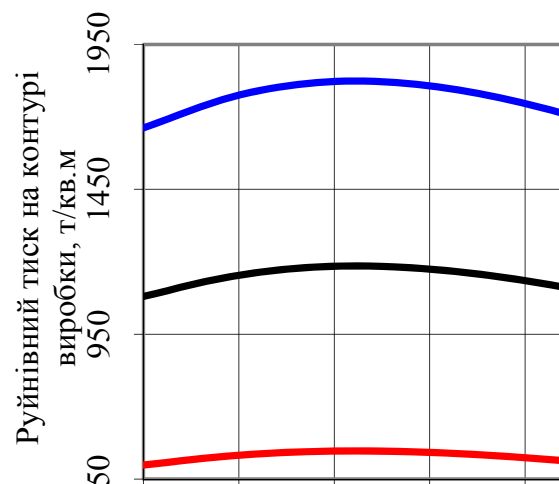


Рис. 6 – Величина руйнівного тиску на контурі виробки за зоною впливу очисних робіт в неоднорідному та однорідному гірських масивах, при куті зсуву порід 65 град.:

1, 2 – неоднорідний гірський масив відповідно для мікросхарового та окремих шарів порід і контактів; 3 – однорідний гірський масив

Таким чином, в однорідному масиві гірнична виробка руйнується при максимально-допустимому навантаженні в 1830 т/м², а в неоднорідному масиві руйнівний тиск на контурі виробки зменшується в 1,5-3,0 рази.

Для підтвердження надійності запропонованої методики за допомогою програмного комплексу ЛІРА 9.4 було визначено поле діючих напружень навколо гірничої виробки склепінчастої форми. При визначенні напружено-деформованого стану гірського масиву використовувався метод кінцевих елементів, який дозволяє вирішувати системи рівнянь з великою кількістю невідомих.

За допомогою даного комплексу вирішували питання напружено-деформованого стану: в лінійно-пружнотній середовищі; в рамках нелінійної теорії пружності і в пружно-пластичній постановці кроковим і кроків-ітераційним методами з автоматичним вибором кроку навантаження. Результати виконаних розрахунків еквівалентних і вертикальних напружень при висоті гірничої виробки 5 м в однорідному гірському масиві наведені на рис. 7, 8.

З наведених епюр еквівалентних і вертикальних напружень див. рис. 7, 8 видно, що найбільші напруження виникають на контурі гірничої виробки в склепінній її частині, а кут дії руйнуючого тиску дорівнює 60 град.

Таким чином, моделювання методом кінцевих елементів підтверджує достовірність методики з визначення активної зони склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки при комбінованій розробці залізородних родовищ.

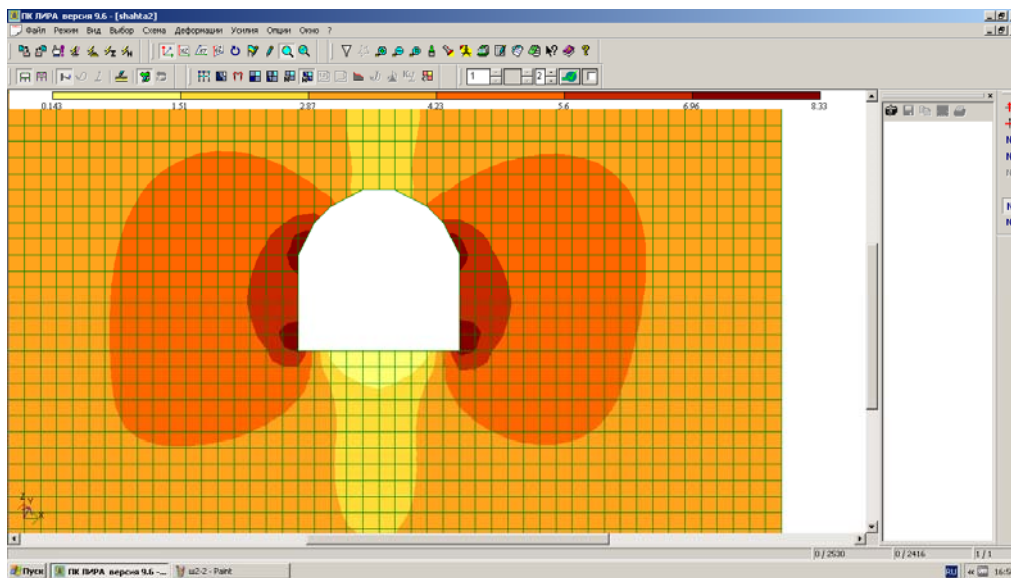


Рис. 7 – Епюри еквівалентних напружень діючих навколо гірничої виробки

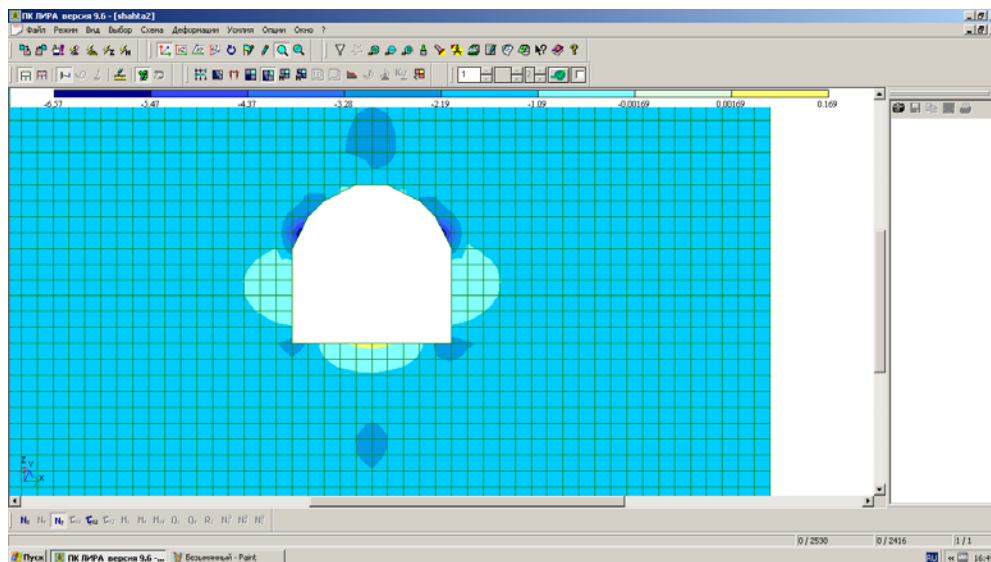


Рис. 8 – Епюри вертикальних напружень по теорії Мора, що діють навколо гірничої виробки

Обговорення результатів дослідження визначення активної зони склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки при комбінованій розробці залізрудних родовищ. Встановлено, що в межах діючих залізрудних підприємств Криворізького залізрудного басейну забалансових запасів природно-бідних руд налічується понад 2,0 млрд. т, які можливо відпрацювати відкрито-підземним або підземним способами. Відробку запасів комбінованим способом доцільно здійснювати з створенням єдиної підземно-транспортної системи із застосуванням імпортованого самохідного устаткування, що дозволить подовжити роботу гірничим підприємствам на 20-30 років.

Доведено, що стійкість гірничих виробок залежить від діючих напружень, які виникають в різномодульному гірському масиві на контурі виробки в склепінній її частині. Визначений кут під яким діють максимальні руйнівні напруження дозволяє визначити заходи, які дозволять підвищити стійкість гірничим виробкам, а також подовжити термін їх існування без додаткових експлуатаційних витрат.

Висновки

1. На контур горизонтальної підземно-транспортної виробки в однорідному та неоднорідному масиві діє руйнівне поле напружень навколо якого формується зона склепіння стійкої рівноваги. На контур виробки діє руйнівний тиск під кутом, який змінюється за поліноміальним законом в залежності від руйнівного тиску та кута зміщення порід, зі збільшенням кута внутрішнього тертя з 55 до 65 град., кут під яким діють максимальні напруження на контурі виробки зменшується з 65 до 55 град. в однорідних породах

2. В неоднорідному масиві діюче поле напружень змінюється зворотньопропорційно куту зсуву порід та відстані від очисного блоку і знаходиться в межах від 50 до 80 град.

Список літератури:

1. Ступник, Н. И. Перспективные технологические варианты дальнейшей отработки железорудных месторождений системами с массовым обрушением руды [Текст] / Н. И. Ступник, С. В. Письменный // Вестник Криворожского национального университета. – 2012. – № 30. – С. 3–6.
2. Stupnik, N. Pillars sizing at magnetite quartzites room-work

- [Text] / N. Stupnik, V. Kalinichenko, S. Pismennyi // Mining of Mineral Deposite. A Balkema Book. – 2013. – P. 11–15.
3. Stupnik N. I. Testing complex-structural magnetite quartzite deposits chamber system design theme [Text] / N. I. Stupnik, V. A. Kalinichenko, V. A. Kolosov, M. B. Fedko, S. V. Pismennyi // Metallurgical and mining industry. – No. 2. – 2014. – P. 89–93.
 4. Письменный, С. В. Исследования устойчивости целиков от формы очистной камеры при отработке магнетитовых кварцитов в полях действующих шахт подземным способом [Текст] / С. В. Письменный // Вестник Криворожского национального университета. – 2014. – № 36. – С. 9–13
 5. Ступнік, М. І. Комбіновані способи подальної розробки залізородних родовищ Криворізького басейну [текст] / М. І. Ступнік, С. В. Письменний // Гірничий вісник. – 2012. – № 95 (1). – С. 3–7.
 6. Ступнік, Н. І. Исследование формы поперечного сечения подземных выработок при комбинированной отработке месторождений [Текст] / Н. І. Ступнік, Б. Н. Андреев, С. В. Письменний // Вестник Криворожского национального университета. – 2014. – № 32. – С. 3–6.
 7. Лавриненко, В. Ф. Уровень удароопасности пород на глубоких горизонтах шахт Кривбасса [Текст] / В. Ф. Лавриненко, В. І. Лысак // Разработка рудных месторождений. – 1991. – № 52. – С. 30–36.
 8. Влох, Н. П. Прогноз удароопасности выработок на стадии проектирования горных работ [Текст] / Н. П. Влох, А. В. Зубков, Я. І. Липин // Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. – 1987. – С. 50–54.
 9. Влох, Н. П. Совершенствование конструкции днищ в условиях действия высоких горизонтальных сжимающих напряжений [Текст] / Н. П. Влох, А. В. Зубков, Ю. Ф. Пятков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1981. – № 4. – С. 78–82.
 10. Тимченко, А. В. Формирование нагрузки от локальных вывалов при сплошном сводообразовании [Текст] / А. В. Тимченко, В. Н. Пустобриков, Т. С. Цидаев // Вестник Владикавказского научного центра. – 2007. – Т. 7. – № 2. – С. 44–48.
 11. Галаев, Н. З. Управление состоянием массива горных пород при подземной разработке рудных месторождений [Текст] / Н. З. Галаев. – М.: Недра. 1990. – 176 с.
 12. Stupnik, N. Modeling of stopes in soft ores during ore mining [Text] / N. Stupnik, V. Kalinichenko, V. Kolosov, S. Pismennyi, A. Shepel // Metallurgical and mining industry. – 2014. – No. 3. – P. 32–36.
 13. Plevako, V. Analytical study of the bending of isotropic plates, inhomogeneous in thickness [Text] / V. Plevako, V. Potapov, V. Kycenko, I. Lebedynecj, I. Pedorych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/74 (82). – P. 10–16. doi: [10.15587/1729-4061.2016.75052](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75052)
 14. Ступнік, Н. І. Разработка рекомендаций по выбору типа крепления горных выработок и сопряжений в условиях урановых шахт ГП "ВОСТГОК" [Текст] / Н. І. Ступнік, М. Б. Федько, В. А. Колосов, С. В. Письменний // Научный вестник НГУ. – 2014. – № 5. – С. 21–25.

Bibliography (transliterated):

1. Stupnik, N. I., Pis'mennyi, S. V. (2012). Perspektivnyye tekhnologicheskiye varianty dal'neyshey obrabotki zhelezorudnykh mestorozhdeniy sistemami s massovym obrusheniym rudy. Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu, 30, 3–7.
2. Stupnik, N., Kalinichenko, V. Pismennyi, S. (2013) Pillars sizing at magnetite quartzites room-work. Mining of Mineral Deposite. A Balkema Book, 11–15.
3. Stupnik, N. I., Kalinichenko V. A., Kolosov, V. A., Fedko M. B. Pismennyi, S. V. (2014). Testing complex-structural magnetite quartzite deposits chamber system design theme. Metallurgical and mining industry, 2, 89–93.
4. Pismennyi, S. V. (2014). Issledovaniya ustoychivosti tselikov ot formy ochistnoy kamery pri otrabotke magnetitovykh kvartsitov v polyakh deystvuyushchikh shakht podzemnym sposobom. Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu, 36, 9–13.
5. Stupnik, M. I., Pys'mennyi, S. V. (2012). Kombinovani sposoby podal'shoyi rozrobky zalizorudnykh rodovyshch Kryvoriz'koho baseynu. Hirnychyy visnyk, 95 (1), 3–7.
6. Stupnik, N. I., Andreyev, B. N., Pys'mennyi, S. V. (2012). Issledovaniye formy poperechnogo secheniya podzemnykh vyrabotok pri kombinirovannoy otrabotke mestorozhdeniy. Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu, 32, 3–6.
7. Lavrinenko, V. F., Lysak, V. I. (1991). Uroven' udaroopasnosti porod na glubokikh gorizontakh shakht Krivbassa. Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy, 52, 30–36.
8. Vlokh, N. P., Zubkov, A. V., Lipin, Ya. I. (1987). Prognoz udaroopasnosti vyrabotok na stadii proyektirovaniya gornyykh rabot. Prognoz i predotvrashcheniye gornyykh udarov na rudnykh mestorozhdeniyakh Apatity, 50–54.
9. Vlokh, N. P., Zubkov, A. V., Pyatkov, Yu. F. (1981). Sovershenstvovaniye konstruktssii dnishch v usloviyakh deystviya vysokikh gorizontallykh szhimayushchikh napryazheniy. Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopyayemykh, 4, 78–82.
10. Timchenko, A. V., Pustobrikov, V. N. Tsidayev, T. S. (2007). Formirovaniye nagruzki ot lokal'nykh vyvalov pri sploshnom svodoobrazovanii. Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra, 7 (2), 44–48.
11. Galayev, N. Z. (1979). Upravleniye sostoyaniyem massiva gornyykh porod pri podzemnoy razrabotke rudnykh mestorozhdeniy, Moscow: Nedra, 176.
12. Stupnik, N., Kalinichenko, V., Kolosov, V., Pismennyi, S., Shepel, A. (2014). Modeling of stopes in soft ores during ore mining, 3, 32–36.
13. Plevako, V., Potapov, V., Kycenko, V., Lebedynecj, I., Pedorych, I. (2016). Analytical study of the bending of isotropic plates, inhomogeneous in thickness. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (7 (82)), 10–16. doi: [10.15587/1729-4061.2016.75052](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75052)
14. Stupnik, N. I., Fed'ko, M. B., Kolosov, V. A., Pis'mennyi, S. V. (2014). Razrabotka rekomendatsiy po vyboru tipa krepleniya gornyykh vyrabotok i sopryazheniy v usloviy uranovykh shakht GP "VOSTGOK". Naukovyy visnyk NHU, 5, 21–25.

Надійшла (received) 20. 04. 2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методика визначення активної зони склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки при комбінованій розробці залізородних родовищ/ С. В. Письменний // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.99–106. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Методика определения активной зоны сводообразования на контуре подземно-транспортной выработки при комбинированной разработке железородных месторождений/ С. В. Письменний // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.99–106. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459.

Method for determining the core of the arch of formation on the contour of underground transport excavation in the combined development of iron ore deposits/ S. Pismennyi //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238).– P. 99–106. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-5459

Письменный Сергей Васильевич – доцент, кандидат технических наук, Державний вищий навчальний заклад "Криворізький національний університет", доцент кафедри "Підземної розробки родовищ корисних копалин"; адреса університету: вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027

Письменный Сергей Васильевич – доцент, кандидат технических наук, Государственное высшее учебное заведение "Криворожский национальный университет", доцент кафедры "Подземной разработки месторождений полезных ископаемых"; адрес университета: ул. Виталия Матусевича, 11, г. Кривой Рог, Украина, 50027

Pysmennyi Serhii – Associate Professor, candidate of technical sciences (PhD), State institution of higher education «Kryvyi Rih National University», Associate Professor "Underground mining of mineral deposits"; University address: 11, Vitaliy Matusevych str., Kryvyi Rih, Ukraine, 50027

УДК 621.74

О. А. ЧИБИЧИК, Р. Н. СТЕПАНЕНКО, А. Н. ГОРОЩЕНКО, Д. В. ГРИЦЕНКО, Л. А. САЛТЫКОВ, Д. Н. МАКАРЕНКО

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЛИТЬЯ ПОД НИЗКИМ ДАВЛЕНИЕМ Al-Mg СПЛАВА ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА ЖИДКОТЕКУЧЕСТИ

Проведено математическое моделирование влияния соотношения Al/Mg и температуры на жидкотекучесть Al-Mg сплава. Показано, что такое влияние может быть описано уравнением регрессии в факторном пространстве 2^2 , которое получено на основе реализации центрального ортогонального композиционного плана (ОЦКП) второго порядка. Проанализирована возможность исследования полученной поверхности отклика для выявления оптимальных значений входных переменных, выступающих главными технологическими режимами литья под низким давлением

Ключевые слова: литье под низким давлением, Al-Mg сплав, жидкотекучесть, центральный ортогональный композиционный план второго порядка, уравнение регрессии, поверхность отклика

Проведено математичне моделювання впливу співвідношення Al/Mg та температури на рідкотікучість Al-Mg сплаву. Показано, що такий вплив може бути описано рівнянням регресії у факторному просторі 2^2 , яке побудовано на основі реалізації центрального ортогонального композиційного плану (ОЦКП) другого порядку. Проаналізовано можливість дослідження отриманої поверхні відгуку для виявлення оптимальних значень вхідних змінних, що виступають головними технологічними режимами лиття під низьким тиском.

Ключові слова: лиття під низьким тиском, Al-Mg сплав, рідкотікучість, центральный ортогональный композиційний план другого порядку, рівняння регресії, поверхня відгуку

An adequate regression equation describing the influence of the Al/Mg ratio and temperature on the Al-Mg alloy castability for low-pressure casting is obtained. It is shown that such effect can be described by the regression equation in the factor space 2^2 , which is obtained on the basis of the realization of the second order central orthogonal compositional design (COCD). The possibility of investigating the received response surface is analyzed to identify the optimal values of the input variables that act as the main technological regimes of low-pressure casting. In particular, it is shown that the study of the nature of the function $*(\lambda)$ in the four ranges of the input variable separated by the poles λ_1 and λ_2 makes it possible to find the values of the input variables that are suboptimal and provide the possibility of obtaining high castability indices by the appropriate selection of technological regimes - Al/Mg ratio and temperature of the Al-Mg alloy for low-pressure casting.

Keywords: low-pressure casting, Al-Mg alloy, castability, second order central orthogonal compositional design, regression equation, response surface

Введение. В последнее время в литейном производстве одним из самых перспективных способов является литье под низким давлением (ЛНД). Наиболее широко ЛНД применяется для изготовления отливок из алюминиевых сплавов. Отличительной способностью ЛНД от остальных видов литья является многоступенчатое регулирование давления газа над зеркалом расплава в тигле машины с сифонной подачей расплава в литейную форму по металлопроводу. Именно поэтому для изготовления отливок энергетического машиностроения, в частности заливки роторов тяговых электроприводов, выбрана именно эта технология. В частности, наилучшей является технология, при которой рабочее давление устанавливают на уровне, близком к минимально необходимому, а после заполнения формы и выдержки, достаточной для образования твердой поверхности отливки, давление поднимают с целью повышения эффективности питания. Особую актуальность при этом приобретают

вопросы, связанные с моделированием влияния технологических факторов на жидкотекучесть сплава.

Анализ литературных данных. ЛНД относится к специальным видам литья, преимущественно цветного литья, поэтому рассмотрение данной технологии, так же, как и для других спецвидов, происходит в основном с позиции управления качеством [1–3]. Авторы по-разному подходят к исследованию подобных технологий и формированию качества готовых отливок, например на этапе проектирования (САПР) [4, 5] или этапе эксплуатации с непосредственной экспериментальной обработкой технологического процесса [6–10]. Последнему подходу, включающему в себя также математическое моделирование на основе полученных промышленных экспериментальных данных технологии ЛНД, посвящены работы [11–13]. Несмотря на то, что все перечисленные исследования в основном ориентированы на решение конкретных практических задач и не содержат в себе системного

© О. А. Чибичик, Р. Н. Степаненко, А. Н. Горощенко, Д. В. Гриценко, Л. А. Салтыков, Д. Н. Макаренко. 2017