

3. **Azaryan A.** Research of influence single crystal thickness NaJ (TL) on the intensity of the integrated flux of scattered gamma radiation / **A. Azaryan** // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 2. – P. 43–46. – URL: <https://bit.ly/2UMMbBQ>.
4. Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction / **A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, D. Shvets** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 5, issue 5 (95). – P. 13–19. – DOI: 10.15587/1729-4061.2018.144003.
5. XRD, internal field-NMR and Mössbauer spectroscopy study of composition, structure and magnetic properties of iron oxide phases in iron ores / **M. Manjunatha, R. Kumar, A. Anupama [et al.]** // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – Vol. 8, issue 2. – P. 2192–2200. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.01.022.
6. Experimental and simulated study of detector collimation for a portable 3"×3" NaI(Tl) detector system for in-situ measurements / **K. U. Kiran, K. Ravindraswami, K. M. Eshwarappa, H. M. Somashekarappa** // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 8, issue 4. – P. 597–605. – DOI: 10.1016/j.jrras.2015.07.006.
7. **Makek M.** Scintillator Pixel Detectors for Measurement of Compton Scattering / **M. Makek, D. Bosnar, L. Pavelić** // Condensed Matter. – 2019. – Vol. 4, issue 1. – P. 24. – DOI: 10.3390/condmat4010024.
8. **Azaryan A.** Complex automation system of iron ore preparation for beneficiation / **A. Azaryan, A. Pikilnyak, D. Shvets** // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Issue 8. – P. 64–66. – URL: <https://bit.ly/2Xf1Vpx>.
9. Mössbauer forward scattering spectra of ferromagnets in radio-frequency magnetic field / **A. Y. Dzyublik, E. K. Sadykov, G. I. Petrov, V. V. Arinin [et al.]** // Yaderna fizyka ta enerhetyka. – 2013. – Vol. 13, issue 1. – P. 73–82. – URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/yadf\\_2013\\_13\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/yadf_2013_13_1_12).
10. Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore / **A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, V. Serebrenikov, D. Shvets** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 3, issue 5 (99). – P. 29–35. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.170341.
11. **Трачук А. А.** Состояние проблемы оперативного контроля качества минерального сырья / **А. А. Трачук, В. А. Азарян** // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 1999. – С. 63–73.
12. Пат. № 38216А Україна МПК G01V 5/00. Пристрій автоматичного контролю вмісту корисного компоненту в мінеральній сировині / **А. А. Азарян, А. А. Трачук** ; заявник Криворізький технічний університет. – № 2000063325 ; заявл. 07.06.2000 ; опубл. 15.05.01, Бюл. № 4. – 4 с.
13. Методическое руководство по опробованию железных руд Кривбасса и КМА гамма-гамма-методом аппаратурой РСР / ВИОГЕМ. – Белгород, 1975. – 74 с.
14. **Бызов В. Ф.** Проблемы контроля и управления качеством минерального сырья и пути их решения / **В. Ф. Бызов, А. А. Азарян** // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2002. – С. 9–13.
15. **Василенко В. Е.** Исследование влияния влажности на точность контроля качества железорудного сырья гамма-гамма методом / **В. Е. Василенко** // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2002. – С. 230–237.

Рукопись поступила в редакцию 24.03.2020

УДК 622.274.3:622.224

С.В. ПИСЬМЕННИЙ, канд.техн.наук  
Криворізький національний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ОЧИСНИХ КАМЕР ПРИ СЕЛЕКТИВНІЙ РОЗРОБЦІ СКЛАДНОСТРУКТУРНИХ РУДНИХ ПОКЛАДІВ

**Мета.** Метою виконаних досліджень є визначення стійкості міжкамерного цілика при розробці складноструктурних рудних покладів системами з відкритим очисним простором, що дозволить підвищити показники вилучення рудної маси за рахунок селективного виїмання корисної копалини з виїмального блоку.

**Методи досліджені.** На практиці існує велика кількість теоретичних та лабораторних методик по визначенню конструктивних елементів системи розробки з відкритим очисним простором, які дозволяють визначити параметри ціликів та оголень для статичного об'єкту. При селективній розробці родовищ виїмальний блок необхідно розглядати як динамічний об'єкт. Тому, для визначення стійкого оголення в залежності від черги відпрацювання очисної камери в межах виїмального блоку необхідно визначити дію еквівалентних напружень в міжкамерному цілику за допомогою чисельних методів, або програмних комплексів створених на основі чисельного методу.

**Наукова новизна.** Вперше за допомогою програмного комплексу ANSYS встановлено, що при формуванні цілика в виїмальному блоці між очисними камерами в залежності від напрямку відпрацювання блоку в цілику еквівалентні напруження змінюються за параболічною функцією. Так, при відпрацюванні виїмального блоку з лежачого до висячого боку еквівалентні напруження описуються параболічною функцією, а при веденні очисних робіт від висячого до лежачого боку – обернено-параболічною функцією.

**Практична значимість.** Відпрацювання складноструктурних покладів Криворізького залізрудного басейну селективним способом, системами з відкритим очисним простором, дозволить вилучати камерні запаси руди без додаткового засмічення пустими породами із збереженням міжкамерного цілика представленого безрудним чи рудним включенням.

**Результати.** Доведено, що відпрацювання виїмального блоку селективним способом дозволить підвищити показники вилучення рудної маси. Відпрацювання блоку від висячого до лежачого боку зменшує концентрацію напружень в цілику з 30–35 МПа до 5–10 МПа, що сприяє підвищенню його стійкості в 1,5–2,0 рази. При відпрацю-

ванні блоку від лежачого до висячого боку доцільно застосовувати підповерхово-камерну систему розробки для забезпечення стійкості цілику та очисним камерам під час вилучення руди.

**Ключові слова:** підземна розробка, залізна руда, напруження, стійкість, камерна система розробки, цілик

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-58-64

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Родовище Криворізького залізорудного басейну складається з 6–7 різноманітних покладів залізних руд з вмістом заліза загального від 10 до 67%. Поклади залізних руд з вмістом заліза загального в масиві 24–32% відпрацьовуються відкритим способом, а 52–67% – підземним. На ділянках покладів зустрічаються безрудні або рудні включення з вмістом заліза менше ніж бортовий. Відпрацювання даних ділянок здійснюється шляхом масового обвалення гірського масиву [1].

На відкритих гірничих роботах після масового обвалення масиву здійснюється сортування обваленої рудної маси безпосередньо у вибою, в результаті чого пусті породи складають у зовнішні чи внутрішні відвали, а руду направляють на збагачувальні фабрики. В деяких випадках пусті породи застосовують в якості огороження робочих площадок.

На підземних гірничих роботах Криворізького залізорудного басейну здійснити розподіл відбитої рудної маси за якістю в підземних умовах практично неможливо. Це призводить до суттєвого зниження вмісту заліза в видобутій рудній масі з 67 до 58% в залежності від потужності безрудного або рудного включення (БРВ) [2]. За даними гірничодобувних підприємств загальна кількість запасів БРВ в масиві становить для бідних руд 10–15%, а для багатих руд 5–12% [3].

Підвищити ефективність відпрацювання складноструктурних рудних покладів (збільшити показники вилучення рудної маси) можливо шляхом збагачення видобутої рудної маси, або за рахунок впровадження селективної розробки ділянок покладів, що містять БРВ [4,5].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Відпрацюванню складноструктурних родовищ присвячено цілий ряд досліджень пов'язаних з встановленням закономірностей показників вилучення, прояву гірського тиску, черговості їх виїмки та визначенню параметрів основних конструктивних елементів систем розробки.

В роботах [6-12] автори довели, що основними факторами для успішного відпрацювання родовища є: порядок очисного виймання, прояви гірського тиску, інтенсивність очисних робіт, кількість і стійкість ціликів, висота поверху, взаємне розташування камер і ціликів в покладах основного простягання.

На досвіді роботи шахт Криворізького басейну автори [6-8] розглянули порядок очисного виймання паралельно-зближених рудних покладів в залежності від потужності, міцності проміжної товщі (безрудного включення) та прийнятої системи розробки. Ними відзначається, що при масовому обваленні рудного масиву паралельного простягання початкове поле напружень в породах перерозподіляється, в наслідок чого виникають інтенсивні прояви гірського тиску, що призводить до порушення цілісності порід висячого боку. Порушення цілісності порід призводить до його руйнування та формування зони зсуву від горизонту що розробляється до земної поверхні, це ускладнює в подальшому відпрацювання рудного тіла основного простягання.

При розробці покладів основного простягання камерними системами в першу чергу, відбувається збільшення інтенсивності прояву гірського тиску, яке призводить до зниження стійкості оголень та збільшенню ймовірності до руйнування міжкамерних ціликів.

На підставі проведених досліджень автори [11, 13] приходять до висновку, що позацентрове розташування ціликів і камер недопустиме при розробці паралельно-зближених покладів камерними системами. Посилаючись на промислові дослідження з відпрацювання блоків на шахті "Гвардійська" автори вказують, що випереджене відпрацювання камер в покладах основного простягання збільшує гірський тиск та негативно впливає на безрудне включення, яке розташоване між покладами.

З метою забезпечення стійкості оголень стосовно відпрацювання паралельно-зближених покладів автори [10,14] рекомендують враховувати наступні заходи: взаємне розташування камер і ціликів в покладах основного і паралельного простягання; черговість очисних робіт в

однойменних камерах розташованих одна відносно іншої у висячому і лежачому боках; послідовність відпрацювання покладів у шахтному полі.

В роботі [11] автори відзначають, що при відпрацюванні складноструктурних покладів камерними системами розробки з залишенням ціликів, кількість ціликів повинна бути мінімальною, так як вони служать концентраторами напружень та ускладнюють умови подальшої розробки родовища.

Автори робіт [6-8], прийшли до протилежного висновку, тобто випереджувальна виїмка пластів зі сторони висячого боку знижує гірський тиск в пластах основного простягання. Такі суперечливі висновки про послідовність ведення очисних робіт виникли в наслідок того, що зазначені дослідження проводилися в неоднакових умовах і на різних глибинах.

В роботі [9] виділені різні зони зміни гірського тиску, обумовлені випереджаючим відпрацюванням одного з пластів, а також тимчасовим відставанням робіт і їх просторово-взаємним розташуванням. Встановлено, що зменшення взаємного впливу похилих покладів відбувається зі збільшенням їх кута падіння.

Дослідженнями [10-12] встановлено, що опорний тиск у гірських породах за простяганням розподіляється нерівномірно, а зосереджується на флангах виробленого простору. В результаті цього в породах розташованих між паралельно-зближеними покладами, за простяганням, виникають зони розвантаження та зони концентрації напружень.

Таким чином, при впровадженні ресурсозберігаючої технології при відпрацюванні покладів, що містять БРВ, необхідно визначити за допомогою сучасних програмних комплексів як впливає порядок відпрацювання покладу та прогін оголення на конструктивні елементи камерної системи розробки.

**Постановка задачі.** Для забезпечення високих показників виймання при селективній розробці виймального блока необхідно визначити: максимально-допустимий стійкий проліт оголення очисної камери в залежності від конструктивних елементів камерної системи розробки та зміни еквівалентних напружень в міжкамерному цілику від порядку ведення очисних робіт.

**Викладення матеріалу та результати.** За допомогою методу кінцевих елементів можливо не тільки описати об'єкт але й дослідити розподіл напружень навколо нього для пружно-пластичного гірського масиву. Метод кінцевих елементів знайшов широке застосування при визначенні полів напружень навколо виробленого простору. Даний метод надзвичайно універсальний, оскільки дозволяє аналізувати інженерні конструкції зі складною геометрією і дає можливість досліджувати тривимірні задачі, а також допускає використання пружно-пластичних елементів для обліку пластичності гірського масиву.

Сили взаємодії елементів передавались за допомогою вузлових точок, які замінюються на кінцеву кількість структурних елементів кінцевих розмірів, які з'єднуються один з одним. Припускаючи, що всередині кожного елемента переміщення можна уявити простою функцією координат в плоскій задачі тоді єдиним переміщенням є переміщення  $u$  і  $v$ , а в найпростішому випадку в межах елемента їх можна уявити лінійними функціями координат

$$\begin{cases} u = a'x + b'y + c; \\ v = e'x + f'y + g, \end{cases} \quad (1)$$

де  $u, v$  – координати переміщення досліджуваного об'єкта;  $x, y$  – початкові координати досліджуваного об'єкта;  $a, b, c, e, f, g$  – постійні величини, що описують досліджуваний об'єкт.

Рішення рівняння (1) з шістьма невідомими  $a, b, c, e, f, g$  дає нам вираз констант і координати вузлів ( $u, v$ ) які відображають всі переміщення всередині елемента через переміщення вузлових точок. Оскільки переміщення двох загальних вузлових точок на кінцях лінії розділу для обох елементів ( $u, v$ ) повинні бути загальними то деформації між сусідніми елементами та визначаються за формулою

$$\begin{cases} s_{ij} = \frac{\alpha K}{\epsilon \sqrt{2} p' r \varnothing} f_{ij}(q); \\ u_i = C' K' \sqrt{r'} f_i(q). \end{cases} \quad (2)$$

Вузлові сили в плоскій задачі мають дві складові: одну – в напрямку  $x$ , іншу – в напрямку  $y$ . Сили, що діють в вузлових точках граничних елементів, прирівнюються до зовнішнього навантаження або напруженням, які вирішуються методом кінцевих елементів.

На теперішній час вирішити рівняння (2) можливо за допомогою програмних комплексів "SolidWorks", "Ліра", "Ansys". Данні програмні комплекси дозволяють створити об'єкт і визначити не тільки поле напружень, але й деформацію гірського масиву навколо виробленого простору. З метою визначення зміни напружень в цілику розташованого в виймальному блоці між очисними камерами будують розрахункову схему, рис. 1.

При побудові моделі були виконані наступні умови:

у виймальному блоці формуємо ділянку з безрудним включенням;

припускаємо, що БРВ розповсюджується на всю глибину родовища;

зі сторони висячого та лежачого боків від виймального блоку формуємо вмичуючі породи;

у верхній частині ділянки масиву, що досліджується та зі сторін висячого і лежачого боків додаємо зовнішнє навантаження (головні вертикальні та горизонтальні напруження).

При виконанні досліджень були прийняті наступні вихідні умови: глибина розробки

1260 м, горизонтальна потужність складноструктурного рудного покладу 50 м, кут падіння 60 град, потужність безрудного включення 10 м, відстані розташування БРВ від контуру лежачого та висячого боків покладу відповідно 25 та 15 м, висота поверху 80 м, головні вертикальні та горизонтальні напруження відповідно склали 36 та 11,37 МПа, коефіцієнт Пуассона приймається для порід 0,24 і руди 0,23. Для безрудного включення прийняті наступні характеристики: питома вага 2800 кН, межа міцності на стискання та розтягання відповідно 160 і 11 МПа, Модуль Юнга 70000.

Згідно гірничо-геологічних умов підприємства фізико-механічні властивості порід лежачого та висячого боків наведені в табл. 1. Всього було проведено 6 серій досліджень, які відрізнялись між собою: чергою відпрацювання виймального блоку представленого складноструктурним рудним покладом, фізико-механічними властивостями руди та безрудного включення.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості гірського рудного масиву

№ досліджу	Питома вага, кН	Межа міцності на, МПа		Модуль Юнга
		стискання	розтягання	
1	3600	90	6	50000
2	3400	70	4	50000
3	3800	110	8	50000

При проведенні досліджень на моделі фіксували розподіл еквівалентних напружень в масиві на різних стадіях ведення гірничих робіт: початкова, до начала ведення гірничих робіт; проміжна, коли в гірському масиві сформували очисний простір у висячого або лежачого боку виймального блоку (в залежності від напрямку ведення гірничих робіт); кінцева, на момент формування очисних камер першої та другої черг відпрацювання виймального блоку.

За допомогою програмного комплексу ANSYS проведено моделювання зміни поля напружень в гірському масиві навколо очисних камер на різних стадіях ведення гірничих робіт при відпрацюванні виймального блоку від висячого до лежачого боку, рис. 2: початкова – без ведення гірничих робіт; проміжна – формування очисної камери у висячого боку; кінцева – формування очисної камери у лежачого боку.

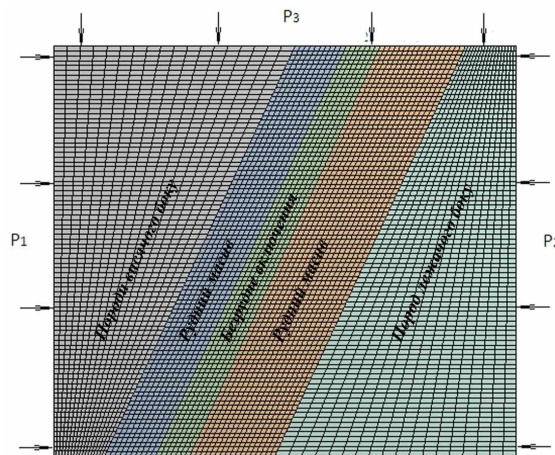
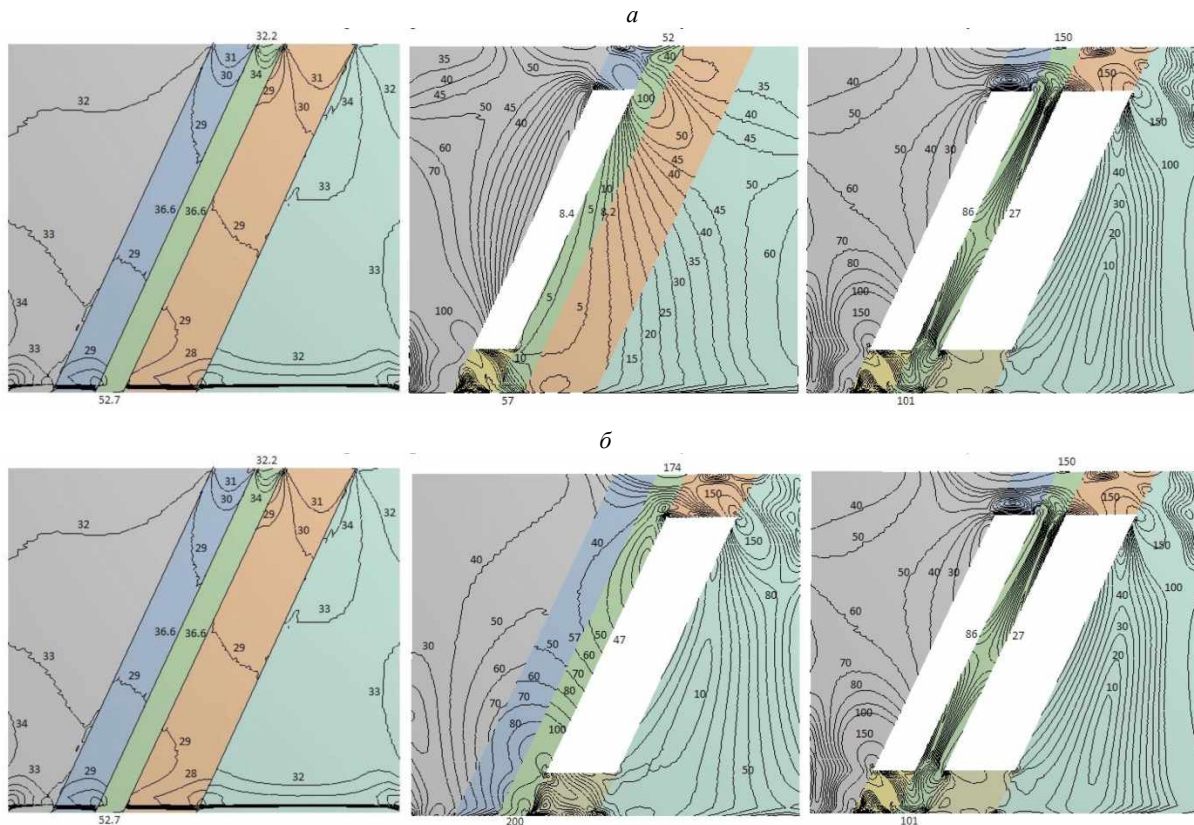
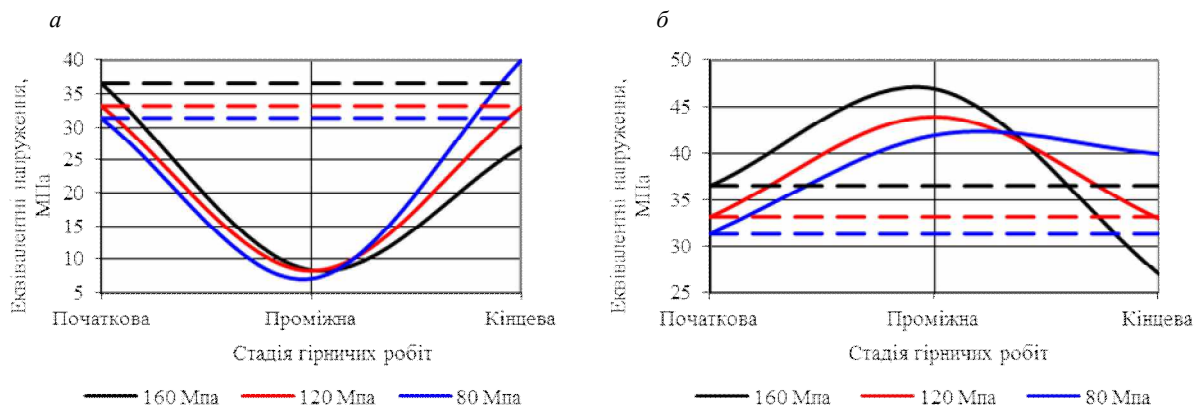


Рис. 1. Сітка кінцевих елементів при дослідженні поля напружень складноструктурного рудного покладу



**Рис. 2.** Результати моделювання відробки ССРП від висячого до лежачого боку при межі міцності безрудного включення на стискання 160 МПа: *а, б* – порядок відпрацювання виймального блоку відповідно від висячого боку до лежачого та від лежачого до висячого

За результатами виконаних досліджень побудовані залежності зміни еквівалентних напружень в середній частині безрудного включення при відпрацюванні виймального блоку від висячого боку до лежачого та навпаки від лежачого до висячого боку, рис. 3.



**Рис. 3.** Залежності зміни еквівалентних напружень в середній частині безрудного включення від межі міцності порід БРВ при межі міцності руди 90 МПа та висоті поверху 90 м при відпрацюванні виймального блоку: *а* – від лежачого до висячого боку; *б* – від висячого до лежачого боку

З графіків приведених на рис. 3*а* видно, що на характер зміни еквівалентних напружень в БРВ у середній його частині впливає тільки порядок гірничих робіт у виймальному блоці. При цьому відбувається підвищення межі пропорційності за законом Гука, яке викликане подальшим навантаженням матеріалу більшим за межу текучості [15].

Таким чином, у випадку коли межа міцності на стискання в породах безрудного включення буде більшою ніж за 120 МПа очисні камери першої та другої черги будуть стійкими.

З графіків приведених на рис. 3*б* видно, що при утворенні очисної камери у лежачого боку еквівалентні напруження в середній частині БРВ збільшуються з 33–37 до 42–47 МПа, створю-



ючи зону розтягуючих напружень. В подальшому, при відпрацюванні запасів у висячого боку, еквівалентні напруженні різко зменшуються до 27–40 МПа, що призведе до руйнування міжкамерного цілика.

З теорії опору матеріалів відомо, якщо зразок рівномірно навантажувати в часі, в ньому зростають нормальні напруження до межі міцності матеріалу на стискання, рис. 4а. Як тільки стискаючі напруження стануть більшими за межу міцності БРВ на стискання або з'являються лінійні деформації то міжкамерний цілик буде зруйновано (поз. 2, рис. 4).

У випадку коли на цілик протягом часу діють стискаючі та розтягуючі напруження, нормальні напруження в БРВ спочатку збільшуються, а потім зменшуються. При повторному навантаженні в цілику виникають лінійні деформації, що значно зменшують межу міцності порід на стискання, (рис. 4б).

Таким чином, з метою збереження цілісності БРВ, який представляє собою міжкамерний цілик під час ведення очисних робіт в блоці, необхідно виконання наступної граничної умови

$$\begin{cases} s \leq s_k @ [s_{cm}]; \\ e = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де  $s$  – нормальні напруження МПа;  $s_k$  – критичні напруження МПа;  $[s_{cm}]$  – межа міцності порід на стискання МПа;  $e$  – лінійні деформації.

Коли протягом часу в цілику зростають навантаження, то в ньому збільшуються нормальні напруження, згідно виразу (3), а при зменшенні навантаження, нормальні напруження не досягають межі міцності порід, що призводить до руйнування цілика при наступній умові

$$\begin{cases} s \ll s_k @ s_e \ll [s_{cm}]; \\ e \neq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Слід зазначити, що при математичному моделюванні практично неможливо відтворити гірничий масив, тому проліт оголення очисної камери необхідно зменшити на коефіцієнт запасу стійкості.

Коефіцієнт запасу стійкості безрудного чи рудного включення визначається за виразом

$$K_{cm} = K_{cmp.o} / K_3, \quad (5)$$

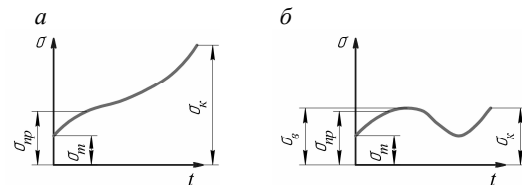
де  $K_{cmp.o} = 0,65 - 0,95$  – коефіцієнт структурного ослаблення порід тріщинами (приймається 0,85);  $K_3 = 1,5 - 2,0$  – коефіцієнт запасу міцності порід (приймається 1,5).

При висоті поверху виймального блоку 90 м похилий прольот оголення складає 104 м, а з урахуванням виразу (5) він становить 58,9 м. За результатами моделювання встановлено, що при висоті поверху 90 м (проліт похилого оголення 58,9 м) та ширині очисної камери 25 м при межі міцності БРВ більшим ніж 120 МПа оголення зберігає свою стійкість. У випадку коли межа міцності порід буде меншою ніж за 120 МПа проліт оголення буде нестійким, БРВ та очисні камери будуть зруйновані.

Порівнюючи результати моделювання з аналітичними дослідженнями встановлено, що очисна камера шириною 25 з похилим прольотом оголення 57 м та межею міцності БРВ 120 МПа буде стійкою, а різниця між значеннями похилого прогону оголення не перевищує 3,2%.

У випадку коли межа міцності БРВ буде складати 80 МПа, при прольоті оголення 58,9 м очисні камери будуть зруйновані, так як за даними аналітичних розрахунків проліт оголення не повинен перевищувати 39 м.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Таким чином, встановлено, що при відпрацюванні складноструктурних рудних покладів необхідно не тільки визначити конструктивні елементи системи розробки але й зміну напружень навколо очисних камер та в цілику після початку ведення очисних робіт. Так, якщо після утворення очисних камер в блоці напруження в цілику буде збільшуватись до початкового стану та не перевищить його, можна вважати, що цілик та камери будуть стійкими. Якщо, значення еквівалентних напружень в середній частині перевищать значення напружень початкового стану системи, цілик буде зруйнований в процесі



**Рис. 4.** Характер розподілу напружень та деформацій в матеріалі на різних стадіях навантаження: а – при дії на зразок протягом часу стискаючих зусиль; б – при дії на зразок протягом часу стискаючих і розтягувальних зусиль

відпрацювання очисної камери другої черги. Забезпечити стійкість очисним камерам і міжкамерному цілику можливо шляхом зменшення площі похилого оголення, однак, порядок відпрацювання необхідно визначити.

### Список літератури

1. Письменный С.В. Отработка складно-структурных залежей богатых руд камерными системами разработки / С.В. Письменный // Гірничий вісник : Науково-технічний збірник. – 2014. – Вип. 97. – С. 3-7.
2. Ступник Н.И. Перспективные технологические варианты дальнейшей отработки железорудных месторождений системами с массовым обрушением руды / Н.И. Ступник, С.В. Письменный // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – Вип. 30. – С. 3-7.
3. М.І. Ступнік. Комбіновані способи подальшої розробки залізородних родовищ Криворізького басейну / М.І. Ступнік, С.В. Письменный // Гірничий вісник: Науково-технічний збірник. – 2012. – Вип. 95(1). – С. 3-7.
4. Pysmennyi, S., Brovko, D., Shwager, N., Kasatkina, I., Paraniuk, D., Serdiuk, O. (2018). Development of complex structure ore deposits by means of chamber systems under conditions of the Kryvyi Rih iron ore field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5, Issue 1 (95), 33-45.
5. Гирич В.С. Пути совершенствования качества металлургического сырья на шахтах Кривбасса / В.С. Гирич, Н.К. Кравцов, В.А. Витряк // Разраб. рудн. месторождений. Кривой Рог: КТУ. – 2000. – Вип. 70. – С. 10-13.
6. Малахов Г.М. Исследование закономерностей проявления горного давления при отработке параллельных залежей / Г.М. Малахов, Г.Т. Фаустов, П.А. Абашин, А.И. Пикалов, Г.С. Шкробко // Разработка рудных месторождений: Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – 1974. – Вип. 18. – С. 117-125.
7. Логачев Е.И. Снижение потерь и засорения обрушенной руды при отработке месторождений с углом падения 45-60° / Е.И. Логачев, С.В. Письменный // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». – 2010. – Вип. 11(161). – С. 96-99.
8. Ступник Н.И. Технология разработки рудных месторождений открыто-подземным способом / Н.И. Ступник, Б.Н. Андреев, С.В. Письменный // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – Вип. 33. – С. 3-8.
9. Сторчак С.А. Повышение качества рудной массы при поэтажном обрушении, за счет технологических факторов / С.А. Сторчак, С.В. Письменный, В.А. Сбитнев – Качество минерального сырья. Сборник научных трудов. – 2002. – С. 70-74.
10. Прохода А.З. Исследование комбинированной системе разработки / А.З. Прохода, Н.И. Ступник, В.М. Елезов, В.А. Зиненко // Разр. руд. месторождений. Кривой Рог. – 1983. - №36. – С. 68-73.
11. Золотарев И.И. Отработка параллельных залежей в условиях Криворожского бассейна / И.И. Золотарев, Н.И. Стариков, Г.Т. Фаустов // Горный журнал. – 1962. - №6. – С. 19-23.
12. Абашин П. А. Исследование устойчивости целиков при отработке параллельных залежей / П.А. Абашин, А.И. Пикалов, Г.Т. Фаустов, Г.С. Шкробко, А.В. Говоров // Горный журнал. – 1974. - №5. – С. 57-59.
13. Khomenko O. Laboratory research of influence of face area dimensions on the state of uranium ore layers being broken / O. Khomenko, D. Maltsev // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2013. Issue 2. P. 31-37.
14. Khomenko O. Principles of rock pressure energy usage during underground mining of deposits / O. Khomenko, A. Sudakov, Z. Malanchuk, Ye. Malanchuk // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2017. Issue 2. P. 35-43.
15. Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н.П. Влох. – М.: Недра, 1994. – 208 с.

Рукопис подано до редакції 20.03.2020

УДК 691.328

О.І. ВАЛОВОЙ, канд. техн. наук, проф., Д.В. ПОПРУГА,  
В.В. АФАНАСЬЄВ, кандидати техн. наук, доценти,  
К.В. ЧОРНА, аспірант, О.М. ГРИЦАСЕНКО, асистент  
Криворізький національний університет

## МІЦНІСТЬ БАЛОК З МЕТАЛЕВИМ І СКЛОПЛАСТИКОВО-МЕТАЛЕВИМ АРМУВАННЯМ РОЗТЯГНУТОЇ ЗОНИ

**Мета** – визначити та порівняти міцність дослідних зразків балок армованих металевим і гібридним склопластиково-металевим армуванням у розтягнутій зоні. Визначити передумови використання склопластикової арматури в якості робочої в згинальних бетонних елементах.

**Методи.** Експериментальне випробування натурних дослідних зразків у лабораторних умовах. Аналітичне дослідження і порівняння отриманих результатів.

**Наукова новизна.** Визначені необхідні умови для використання склопластикової арматури в поєднанні з металевією в згинальних бетонних елементах. Встановлено необхідний переріз площі склопластикової і металевією арматури для ефективного підвищення міцності дослідних зразків.

**Практична значимість.** Отримані результати дозволять розширити спектр використання склопластикової композитної арматури у будівельних конструкціях, що працюють на згин. Незначна вага, висока міцність, протико-

© Валовой О.І., Попруга Д.В., Афанасьев В.В., Чорна К.В., Грицасенко О.М., 2020