

УДК 622.272

Калініченко О.В.

ДВНЗ «Криворізький національний університет»

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАСИВУ МАТЕМАТИЧНИМИ МЕТОДАМИ

У роботі для вирішення завдань дослідження, моніторингу та прогнозування напружено-деформованого стану гірського масиву під час видобутку залізної руди підземним способом використано розрахунковий метод кінцевих елементів. Визначено поля напружень, деформацій масиву навколо виробленого простору порожніх камер і камер, заповнених твердіючою закладкою. Наведено ізолінії максимальних напружень σ_1 із зазначеними величинами в контрольних точках порожніх камер і камер із закладкою виробленого простору. Установлено нові залежності величини максимальних вертикальних деформацій денної поверхні в контрольних точках гірського масиву при різних фізико-механічних властивостях гірських порід.

Ключові слова: гірський масив, підземна розробка, напружено-деформований стан, твердіюча закладка, напруження, деформації.

Постановка проблеми. Численні методи моделювання, що враховують фізико-механічні властивості неоднорідних гірських масивів, вимагають значних потужностей для вирішення завдань високої обчислювальної складності. Критерієм вибору оптимальної концепції застосування інформаційних технологій з моніторингу й управління напружено-деформованим станом масиву має бути мінімум матеріальних витрат на моніторинг великих за площею територій і масивів гірських порід.

Відомо низку методів, користуючись якими можна розрахувати і змоделювати розподіл напружень навколо виробки. Це моделювання методом фотопружності, розрахунковий метод кінцевих елементів (МКЕ) тощо. У загальному вигляді сутність методів полягає в тому, що в умовах, коли напруження в окремих ділянках перевищують допустимі (граничні для породи), масив починає руйнуватися.

Зі збільшенням площі оголення і глибин гірських робіт для масиву будь-якої міцності час стійкого стану оголень зменшується, а швидкість виділення потенційної енергії пружних деформацій зростає.

Швидкістю протікання кінетичних процесів можна управляти в досить широких межах, застосовуючи різні технологічні заходи і прийоми (зміна розмірів оголень, їх форм, орієнтації, використання різних видів підтримки виробок тощо).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині існує значна кількість прикладних програм, які дають змогу визначити напружено-деформований стан гірського масиву. До таких програм

можна зарахувати «SolidWorks», «Ліра», «Ansys», «GTSNX», «SCAD» і низку інших. Ці програмні комплекси допомагають досліджувати гірський масив як для безперервно-пружного, так і пружно-пластичного середовища.

Варто зазначити, що кожен програмний комплекс має низку обмежень, а також переваг і недоліків.

Так, програмний комплекс «Ansys» виконує розрахунки з обмеженою кількістю розрахункових елементів. «SolidWorks» вирішує тільки об'ємні завдання з обмеженою кількістю розрахункових рівнянь (не більше ніж 10 млн. шт.). «Ліра» вимагає ручного вибору форми досліджуваного елемента або масиву. «GTSNX» і «SCAD» призначені, як правило, для вирішення будівельних завдань.

Для вирішення завдань, пов'язаних із визначенням поля напружень, деформацій масиву навколо виробленого простору, можна виділити такі програмні комплекси – «SolidWorks», «Ліра», «Ansys».

У роботі розрахунок напружень і деформацій виконувався за допомогою програм «Ansys» і «SolidWorks 2015» [1–6].

Серед робіт, присвячених дослідженням пружно-деформованого стану масиву, можна виділити роботи М.І. Ступніка, О.В. Калініченко [9–14], В.Ф. Трумбачева [15] та інших. Водночас не встановлено основні закономірності зміни напружено-деформованого стану масиву під час застосування твердіючої закладки в умовах Криворізьких рудників.

Постановка завдання. Отже, дослідження напружено-деформованого стану масиву мате-

матичними методами, встановлення залежності величини максимальних вертикальних деформацій денної поверхні в контрольних точках гірського масиву при різних фізико-механічних властивостях гірських порід є актуальною проблемою, що має важливе наукове та практичне значення.

Виклад основного матеріалу дослідження. У таблиці 1 подано вихідні фізико-механічні властивості гірської породи й матеріалу закладки під час розрахунку напружень і деформацій за допомогою програми «SolidWorks 2015» [7–8].

Таблиця 1
Фізико-механічні властивості гірської породи й матеріалу закладки

Параметри	Одиниці вимірювань	Порода	Закладка
Модуль Юнга	МПа	50000	500
Об'ємна вага	кг/м ³	3400	2000
Межа міцності на розтяг	МПа	14	0,2
Межа міцності на стиск	МПа	140	2
Коефіцієнт Пуасона		0,25	0,15

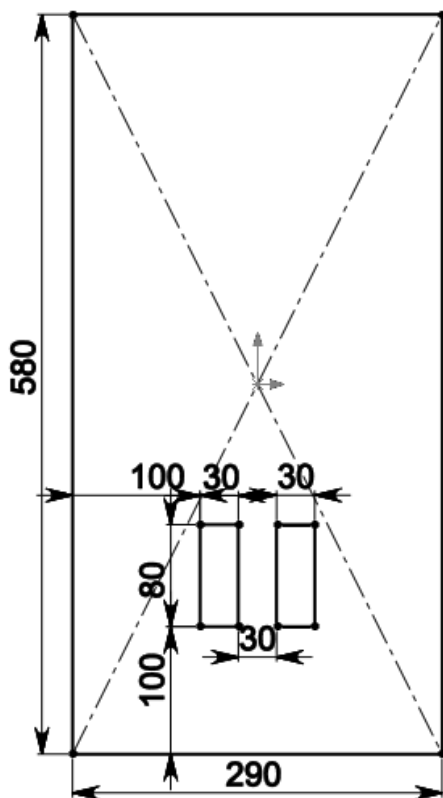


Рис. 1. Вихідна розрахункова схема масиву гірських порід з двома очисними камерами й міжкамерним цілком

На рисунку 1 представлена вихідна розрахункова схема масиву гірських порід з двома очисними камерами й міжкамерним цілком для розрахунку напружень і деформацій у гірському масиві під час відпрацювання родовища камерними системами розробки з формуванням відкритого очисного (відпрацьованого) простору. У подальшому запропонована технологія передбачає заповнення відпрацьованих камер закладними сумішами або обвалення вміщуючих порід (міжкамерних і міжповерхових ціликів) на відпрацьований простір очисних камер.

Нижче наведено результати розрахунку полів напружень у масиві гірських порід при відпрацьованих очисних камерах, а також під час закладки останніх твердіючими закладними сумішами (рисунк 2). Представлено ізолінії поля головних напружень навколо камер з відкритим очисним простором (а) і камер, заповнених твердіючою закладкою (б).

Для візуального визначення напружень усі ізолінії мають певне значення напружень (Па), а також відповідають певній колірній шкалі.

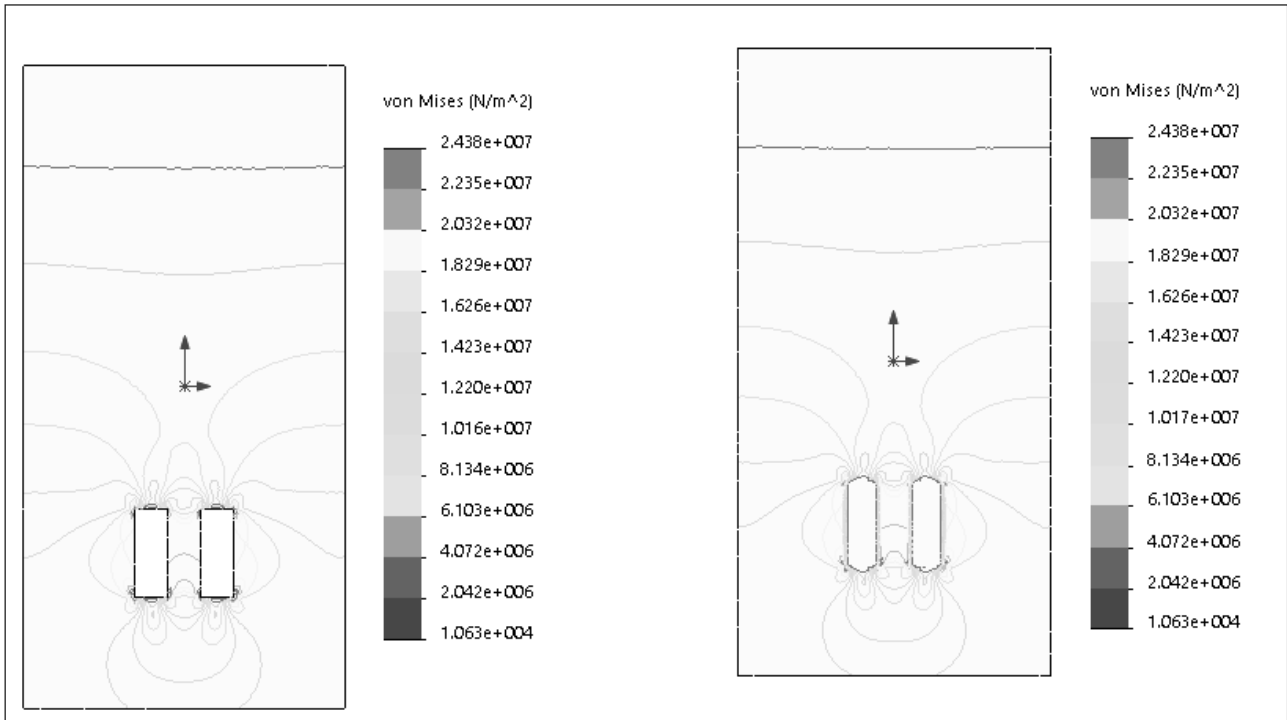
З рисунка 2 видно, що загальна картина розподілу поля напружень є класичною: найбільшої абсолютної величини напруження досягають поблизу кутів утвореної очисної камери з боку рудного масиву. Спостерігається невелика концентрація напружень у кутах на днищі камери. Поява значних максимальних напружень σ_1 в кутах камери пояснюється дією стискаючих напружень. З віддаленням углуб рудного масиву напруження σ_1 зменшуються, а їх характер розподілу стає більш рівномірним.

Концентрація максимальних напружень σ_1 спостерігається в незакладених камерах – у верхніх і нижніх кутах камер, у закладених – тільки в нижній їх частині.

У деяких випадках бічні оголення очисної камери характеризуються тим, що в центральній частині бічної твірної з'являються розтягуючі напруження σ_3 . Напруження σ_1 в цьому випадку зменшуються від кордону камери вглиб рудного масиву.

На рисунку 3 представлені епюри деформацій у вигляді градієнтної кольорової діаграми гірського масиву при 2-х відпрацьованих незаповнених камерах, яка дає змогу візуально визначити величину деформацій гірського масиву в різних його частинах.

На рисунку 4 представлені епюри деформацій (градієнтна кольорова діаграма) гірського масиву при 2-х відпрацьованих камерах, запо-



а) б)
Рис. 2. Ізолінії максимальних напружень σ_1 : а – пусті камери, б – камери із закладкою

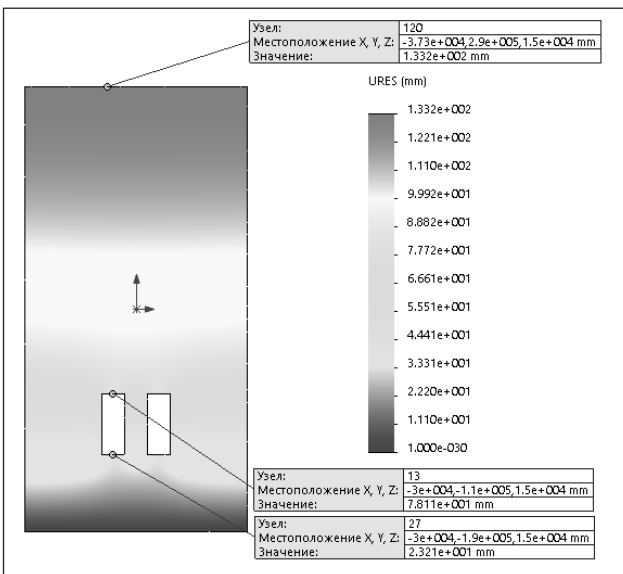


Рис. 3. Епюри деформацій (градієнтна кольорова діаграма) гірського масиву при 2-х відпрацьованих незаповнених камерах

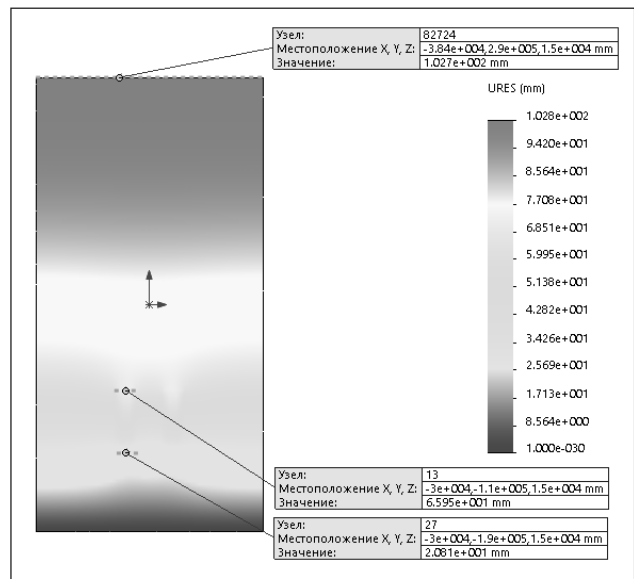


Рис. 4. Епюри деформацій (градієнтна кольорова діаграма) гірського масиву при 2-х відпрацьованих камерах, закладених твердіючою закладкою

внених твердіючою закладкою, згідно з наявними технологіями відпрацювання покладів системами розробки із закладенням виробленого простору.

Залежно від розрахункової стійкості камер діючі максимальні напруження σ_1 мають різний ефект на загальну картину напружено-деформованого стану масиву. При величинах, далеких від

критичних значень, вони не можуть викликати руйнування масиву.

Варто зазначити, що під дією деформацій бокова поверхня й покрівля камери можуть трансформуватися та набувати опуклої форми. У цьому випадку в них з'являються розтягуючі напруження σ_3 , які можуть послабити стелину, а в деяких випадках призвести до її обвалу.

Водночас при величинах, близьких до критичних значень, діючі напруження можуть викликати руйнування стелин або міжкамерних ціликів з подальшим руйнуванням навколишнього масиву.

Наприклад, максимальні стискаючі напруження в нижніх кутах незакладених камер становлять 22–25 МПа при межі порід на стиснення в 140 МПа, тобто їх величина становить усього 16–18 % від критичних значень.

Щодо деформацій гірського масиву в контрольних точках, то картина дещо інша: при незакладених камерах на рівні їх покрівлі деформації становлять 78 мм, а на денний поверхні – 133 мм. У разі заповнення камер твердіючою закладкою ці деформації в вищевказаних контрольних точках трохи менші й становлять, відповідно, 66 і 103 мм.

Отримані розрахункові значення залежності величини максимальних вертикальних зсувів денної поверхні від фізико-механічних властивостей гірських порід, що характеризуються модулем пружної деформації Юнга, добре апроксимуються логарифмічною кривою, яка визначається рівнянням виду:

$$\varepsilon = -227,12 \ln E + 2584,7, \quad (1)$$

де ε – величина максимальних вертикальних зсувів денної поверхні, мм;

E – модуль пружної деформації Юнга, МПа.

Це рівняння дає змогу визначати величину максимальних вертикальних зсувів денної поверхні під час формування очисних камер з відкритим

очисним простором у гірських породах з різними фізико-механічними характеристиками.

Аналогічна залежність величини максимальних вертикальних зсувів денної поверхні від різних фізико-механічних властивостей гірських порід у разі заповнення відпрацьованих очисних камер твердіючою закладкою добре апроксимується логарифмічною кривою, яка визначається рівнянням виду:

$$\varepsilon = -180,91 \ln E + 2059,7. \quad (2)$$

Висновки. Отже, доведено, що залежність величини максимальних вертикальних зсувів денної поверхні від різних фізико-механічних властивостей гірських порід, що характеризуються модулем пружної деформації Юнга, з досить високою ймовірністю можна апроксимувати логарифмічною кривою.

Установлено параметри лінії тренда й визначено рівняння для знаходження величини вертикальних деформацій ε гірського масиву залежно від модуля пружної деформації гірських порід E і стану очисних камер. Визначено достовірність апроксимації для діагностованих кривих.

Наступним кроком планується дослідження поля напружень уже не окремих елементів, а найбільш проблемних ділянок Кривбасу у великих масштабах для моніторингу процесів взаємодії та управління процесами взаємодії полів напружень під час ведення гірських робіт.

Список літератури:

1. Панжин А.А., Панжина Н.А. Мониторинг геодинамических процессов на горных предприятиях и урбанизированных территориях. Горный информ.-аналит. бюл. 2007. № 3. С. 171–183.
2. Сашурин А.Д., Панжин А.А., Коновалова Ю.П. Исследование геодинамических процессов с применением GPS-технологий. Горный информ.-аналит. бюл. 2003. № 7. С. 34–38.
3. Сашурин А.Д., Беликов В.Е. Проблемы устойчивости подземных и наземных сооружений в зоне тектонических нарушений. Вопросы осушения, горнопромышленной геологии и охраны недр: материалы Международного симпозиума. Белгород: ВИОГЕМ. 2003. С. 206–216.
4. Сашурин А.Д. Диагностика геодинамической активности участков размещения объектов недропользования для снижения риска природно-техногенных катастроф. Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сб. научных трудов / ИГД УрО РАН. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. Вып. 5 (95). С. 419–428.
5. Інформаційні технології – складова процесів моніторингу та керування напружено-деформованим станом масиву / М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, І.О. Музика, О.В. Калініченко, М.Б. Федько, С.В. Письменний. Розробка родовищ 2015: щорічний наук.-техн. зб. Дніпропетровськ: Літограф, 2015. С. 175–181.
6. Дослідження напружено-деформованого стану гірського масиву покладу магнетитових кварцитів в умовах шахти «Гігант-Глибока» ПАТ «ЦГЗК» / М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, І.О. Музика, О.В. Калініченко, М.Б. Федько, С.В. Письменний. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2015. № 5. С. 85–88.
7. Методические указания по исследованию проявлений горного давления на моделях из эквивалентных материалов. Ленинград: Изд. ВНИМИ, 1976. 83 с.
8. Глушхин Ф.П. Моделирование в геомеханике. Москва: Недра, 1991. 240 с.
9. Pismennij S. Theoretical and Practical Solution of Mineral Resources Mining: CRC Press is an imprint of the Taylor&Francis Group, an informa business A BALKEMABOOK, 2015. С. 39–45.

10. Kalinichenko E., Stupnik N., Kalinichenko V., Muzika I., Fed'ko M., Pis'menniy S. The research of strain-stress state of magnetite quartzite deposit massif in the condition of mine "Gigant-Gliboka" of central iron ore enrichment works (CGOK). Metallurgical and mining industry. 2015. No. 7. P. 377–382.

11. Калініченко О.В. Удосконалення концепції управління напружено-деформованим станом гірського масиву при підземних гірничих роботах. Сборник научных трудов Государственного предприятия «Научно-исследовательский горнорудный институт». Кривой Рог, 2015. С. 104–111.

12. Калініченко О.В. Удосконалення концепції системного управління процесами підземних гірничих робіт з урахуванням впливу на них напружено-деформованого стану гірського масиву. Гірничий вісник: наук.-техн. збірник. Кривий Ріг, 2016. Вип. 100. С. 27–31.

13. Stupnik M., Kalinichenko V., Pysmennyi S., Kalinichenko O., Fedko M. Method of simulating rock mass stability in laboratory conditions using equivalent materials. Mining of Mineral Deposits, National Mining University. 2016. Volume 10, Issue 3. P. 47 – 52.

14. Удосконалення методики визначення параметрів буровибухових робіт з урахуванням напружено-деформованого стану масиву при його обваленні на похиле оголення / М.І. Ступнік, В.О. Калініченко, М.Б. Федько, О.В. Калініченко, І.О. Музика, С.В. Письменний. Гірничий вісник: наук.-техн. збірник. Кривий Ріг, 2017. Вип. 102. С. 47–53.

15. Трумбачев В.Ф., Мельников Е.А. Распределение напряжений в целиках и потолочинах камер. Исследование распределения напряжений вокруг горных выработок: сборник. Углетехиздат, 1959. 44 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА МАТЕМАТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В работе для решения задач исследований, мониторинга и прогнозирования напряженно-деформированного состояния горного массива при добыче железной руды подземным способом использован расчетный метод конечных элементов. Определены поля напряжений, деформаций массива вокруг выработанного пространства пустых камер и камер, заполненных твердеющей закладкой. Приведены изолинии максимальных напряжений σ_1 с указанными величинами в контрольных точках пустых камер и камер с закладкой выработанного пространства. Установлены новые зависимости величины максимальных вертикальных деформаций дневной поверхности в контрольных точках горного массива при различных физико-механических свойствах горных пород.

Ключевые слова: горный массив, подземная разработка, напряженно-деформированное состояние, твердеющая закладка, напряжения, деформации.

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF ROCKS BY MATHEMATICAL METHODS

In the article the calculation method of finite elements is used to analyze, monitor and forecast the stress-strain state of the rock massif when mining iron ore by underground methods. There are determined stress fields and strains around the dead area of empty and backfilled stopes. Also, isolines of maximum stresses σ_1 in control points of empty stopes and those with backfilled dead areas are provided. There are determined new dependencies of the value of maximum vertical strains of the daylight surface in the control points of the rock massif for various physical and mechanical properties of rocks.

Key words: rock massif, underground mining, stress-strain state, consolidating backfill, strains.