

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАСИВУ АНАЛІТИЧНИМИ МЕТОДАМИ ПРИ ПЕРЕХОДІ З ТЕХНОЛОГІЙ ВІДКРИТОГО ВИДОБУТКУ НА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДКРИТО-ПІДЗЕМНОГО ВИДОБУТКУ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

O. Shepel¹ <https://orcid.org/0000-0003-4581-5441>

¹Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

RESEARCH METHODOLOGY FOR THE STRESS-STRAIN STATE OF ROCK MASS USING ANALYTICAL METHODS DURING THE TRANSITION FROM OPEN-PIT MINING TECHNOLOGIES TO OPEN-PIT AND UNDERGROUND MINING TECHNOLOGIES FOR IRON ORE

Мета. Дослідження геомеханічного стану масиву для обґрунтування стійкості бортів кар'єру та підземних робіт при переході з відкритого на комбінований видобуток.

Методологія. Застосовано комплексний підхід: аналітичне узагальнення та систематизація існуючих наукових праць з геомеханіки, гірничої справи та математичного моделювання; аналіз фізико-механічних властивостей неоднорідних гірських порід; метод скінченних елементів для створення моделей; регресійний аналіз.

Результати досліджень. Встановлено, що обрана методика досліджень напружено-деформованого стану при комбінованому видобутку дозволяє ефективно моделювати та візуалізувати задачі для прийняття інженерних рішень. Доведено, що дослідження напружено-деформованого стану гірничого масиву доцільно виконувати класичними методами математичного моделювання, а саме методом кінцевих елементів. Представлення результатів у вигляді ізоліній є наочним, оскільки дозволяє швидко визначати межі зон напружень, ідентифікувати найбільш навантажені та розвантажені ділянки масиву, а також оцінити взаємний вплив відкритих і підземних робіт. Це є ключовим для оцінки стійкості та прийняття проєктних інженерних рішень.

Наукова новизна. Виконаними дослідженнями кількісно обґрунтовано залежність величини максимальних напружень в гірському масиві під дном кар'єру від глибини розташування майбутніх підземних очисних камер. Вперше для даних умов встановлено експоненціальну залежність з високим коефіцієнтом детермінації. Встановлено закономірність, що щільне розташування ізоліній головних стискаючих напружень навколо контуру очисних камер, особливо біля кутів та по центру покрівлі, є наслідком формування «арок напружень».

Практичне значення. Результати досліджень дозволяють науково обґрунтувати параметри та послідовність гірничих робіт під час переходу з відкритої на підземну розробку. Це мінімізує ризики обвалення, забезпечує стійкість бортів кар'єру та підвищує безпеку робіт у зоні суміщення.

Ключові слова: відкрита, комбінована, підземна, комплексна розробка, руда, магнетитові кварцити, напружено-деформований стан.

Вступ. Геомеханічний стан масиву гірських порід є важливим фактором, що впливає на розвиток технологій ведення гірничих робіт та спосіб видобутку корисних копалин. Знання характеру напружено-деформованого стану (НДС) і величини діючих напружень в гірському масиві дозволяє мати загальну картину розвитку ситуації на теперішній час, а також і в майбутньому.

Дослідження і прогнозування впливових чинників обраної технології, можливість моделювання геомеханічного стану масиву в умовах багатфакторних залежностей під час вибору способу видобутку та очисного виймання корисних копалин дає можливість обґрунтувати вибір оптимальної технології розробки родовища, як з технологічної, так і з економічної, і екологічної точок зору [1–3].

Сучасні математичні методи моделювання дозволяють оцінити існуючі умови і отримати прогнозовані картини розвитку ситуації, як в короткостроковий, так і в довгостроковий термін існування рудника. Отримані результати моделювання використовуються для вдосконалення і розробки нових способів видобутку, удосконалення технологічних схем, вибору оптимальних параметрів ведення очисних робіт і раціональної їх послідовності [4–6].

Інформація про природні та штучні умови існування гірського середовища, можливі порушення цих середовищ, надзвичайно важлива, як на етапі проєкування, так і при переході з відкритої розробки родовищ корисних копалин на технології відкрито-підземного та підземного видобутку залізорудної сировини [7–9].

Таким чином, для отримання коректних результатів досліджень напружено-деформованого стану масиву при переході з технологій відкритого видобутку на технології відкрито-підземного та підземного видобутку залізорудної сировини необхідна регулярна та якісна комплексна оцінка величин діючих напружень та деформацій та їх прогнозування під час безпечного та ефективного ведення комбінованого відкрито-підземного та підземного очисного виймання.

Отримана інформація дозволить обґрунтовано оцінити базові існуючі гірничо-геологічні та гірничо-технічні умови відпрацювання покладів та отримати вихідні дані для вдосконалення схем, що застосовуються і розроблення нових комбінованих технологічних способів відкрито-підземного видобутку, а також для розробки заходів з управління гірським тиском та запобігання небезпечним геологічним процесам.

Перехід з технологій відкритого видобутку магнетитових кварцитів на технології відкрито-підземного та підземного видобутку залізорудної сировини може бути майбутньою причиною небезпечних геологічних процесів. Тому ретельне вивчення та врахування всіх впливових процесів є критично важливим та актуальним.

Основна частина. Встановлено, що напружено-деформований стан масиву істотно залежить, як від природних, так і від штучних умов існування гірського середовища.

У зонах взаємного впливу відкритих і підземних способів розробки родовищ спостерігається складна та потенційно небезпечна ситуація, зумовлена зміною природного напружено-деформованого стану гірського масиву. Основні аспекти

цієї ситуації включають: 1) перерозподіл напружень; 2) зміну стійкості гірського масиву; 3) ускладнення гідрогеологічних умов; 4) підвищення інших ризиків.

Виконаний аналіз основних факторів комплексної розробки родовищ корисних копалин дозволяє зробити висновок про необхідність розвитку математичних методів оцінки геомеханічних умов переходу з відкритої на відкрито-підземну та виключно підземну розробку родовищ мінеральної сировини або корисних копалин.

Запропоновані нами математичні методи дозволяють оптимізувати технологічні варіанти режиму гірничих робіт на базі статистичної інтегруючої залежності обсягу видобутку в часі від величини активної площі робочої зони кар'єру та шахти, яка в свою чергу залежить від інтенсивності відкритої та підземної розробки в зоні їх поєднання.

При розвитку підземних гірничих робіт під дном кар'єру досліджують, як правило, два основні фактори, що впливають на вибір параметрів перехідної технології.

Першим основним фактором є визначення товщини та стійкості бар'єрного цілика між відкритими та підземними роботами, в разі застосування відповідної перехідної технології.

Після визначення величини вертикального переміщення гірничих робіт в кар'єрі на останній робочий горизонт визначається товщина (висота) бар'єрного цілика, яка дорівнює відстані від покрівлі підземної камери верхнього поверху до дна кар'єру. Отримана величина порівнюється з критичним розрахунковим значенням стійкості сформованої стелини (товщини бар'єрного цілика) для конкретних гірничо-геологічних умов в розрахунковій математичній моделі.

Якщо стійкість бар'єрного цілика перевищує критичні значення для конкретних гірських порід з відомими фізико-механічними властивостями, то підземні роботи не будуть впливати на інтенсивність ведення відкритих гірничих робіт, а виробнича потужність підземного рудника встановлюється на основі прийнятої технології.

В іншому випадку, необхідно збільшити товщину бар'єрного цілика, або розглянути варіанти переходу на підземні гірничі роботи із застосуванням безбар'єрних технологічних схем.

Другим основним фактором є визначення впливу підземної розробки на напружено-деформований стан гірських порід в зоні відкрито-підземного видобутку корисних копалин.

При цьому фіксується чергова кількість горизонтів кар'єру, що потрапили в зону впливу підземної розробки, і виходячи з цього – кількість блоків підземної шахти в зоні суміщення відкритих та підземних гірничих робіт. Це враховується при розрахунку загальної виробничої потужності комплексного відкрито-підземного рудника по рудній масі.

Після визначення виробничої потужності підземного рудника в зоні суміщення відкритих та підземних гірничих робіт розраховується загальний приріст видобувної площі в робочій зоні кар'єру.

Варіант такого алгоритму дозволяє також зробити оцінку поля напружень, а при необхідності і деформацій, що виникають в гірському масиві, наприклад варіант напружень представлено на рис. 1.

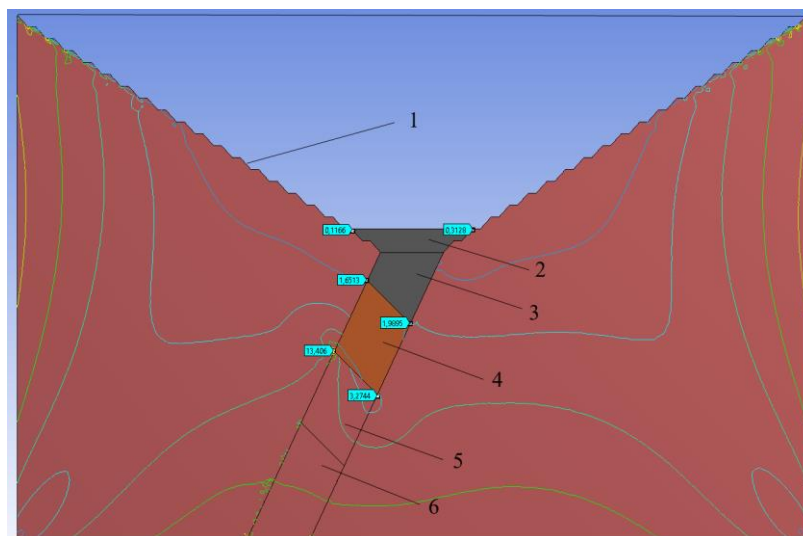


Рис. 1. Варіант відкрито-підземної розробки родовища магнетитових кварцитів з відбійкою та випуском відбитої руди і наступною закладкою очисного простору відпрацьованої камери пустими породами: 1 – контур кар'єру; 2 – пусті породи в межах нижньої частини відпрацьованого кар'єру; 3 – закладка верхньої відпрацьованої камери пустими породами; 4 – відбита руда нижнього підземного горизонту; 5 – майбутня камера нижчезалягаючого горизонту; 6 – рудний поклад

Формування виробленого простору при підземному відпрацюванні покладів супроводжується порушенням силової рівноваги. Вище розташована товща гірських порід має потенційну енергію за рахунок гравітаційної сили, яка звільняється при утворенні порожнин.

Очевидно, що розподіл цієї енергії в навколишньому масиві за вертикальним, горизонтальним і тангенціальним напрямками визначається розподілом силового поля, характер якого може бути заданий величинами відповідних напружень.

При цьому в навколишньому масиві виникають сили розтягнення і стискаючі напруження, які відчутно проявляють себе в зоні утворення очисного простору.

Математичні моделі гірського масиву і фізико-механічні процеси, які в ньому відбуваються, не можуть з достатньою точністю врахувати всі чинники, які впливають на результати цих процесів [10, 11].

Використання новітніх персональних комп'ютерів є невід'ємною частиною сучасного геомеханічного забезпечення підземних гірничих робіт, дозволяючи на більш якісному та достовірному рівні встановлювати та передбачати напружено-деформований стан гірського масиву, що є критично важливим для

безпечного та ефективного видобутку залізної руди комбінованим відкрито-підземним та підземним способами.

Для дослідження напружено-деформованого стану гірського масиву аналітичними методами при перехідних технологіях існує ряд аналітичних методик, користуючись якими можна розрахувати розподіл напружень та деформацій навколо відкритих і підземних гірничих виробок та змодельовати поведінку масиву гірських порід в процесі технологічного видобутку корисних копалин.

В кінцевому розумінні ідея існуючих відомих аналітичних способів в гірничій справі виглядає так, що якщо на встановлених точках експериментальної моделі головні напруження перевищують допустимі (граничні) значення, відбувається руйнування в цих точках моделі, а відповідно і руйнування гірського масиву в природному середовищі.

З пониженням глибини гірничих робіт зростає літостатичний гірський тиск (тиск від ваги вищезалігаючих порід). Цей тиск призводить до збільшення напружень у масиві, що оточує підземні гірничі очисні камери та виробки. Вищі напруження призводять до більшого накопичення потенційної енергії пружних деформацій у гірському масиві.

На сьогоднішній день, важливо зазначити, що чисельні методи є набагато поширенішими та потужнішими для розрахунку напружено-деформованого стану складних гірничих масивів з врахуванням їх неоднорідності, тріщинуватості, складної геометрії родовища, проведених підземних виробок та поетапності ведення робіт. Приклади програмних комплексів, що використовуються в гірничій справі для розрахунку НДС (переважно чисельними методами): «Flac» / «Flac3D»; «Udec» / «3Dec»; «Abaqus»; «Ansys»; «Plaxis»; «RS2» / «RS3» (Rocscience); «Phase2» / «Phase3» (Rocscience); «SolidWorks», «Lipa», «GTS NX», «SCAD» та інші. Ці програми використовують складні математичні моделі та чисельні методи для наближеного розв'язання рівнянь геомеханіки суцільного середовища, що описують поведінку гірського масиву під дією відкритих та підземних гірничих робіт.

Аналіз показав, що існує широкий спектр програмних комплексів для розрахунку НДС у гірництві, кожен з яких базується на певному чисельному методі і має свої сильні та слабкі сторони. «Flac3D» виділяється у моделюванні складного руйнування та динаміки, але вимагає значного досвіду. Пакети програмного забезпечення, такі як «Plaxis» та «Rocscience», пропонують універсальність та зручність використання для стандартних задач, тоді як «Abaqus» та «Ansys» є потужними, але складними універсальними інструментами ефективними для великомасштабних пружних задач, типових для гірництва. Існує неминучий компроміс між простотою використання та потужністю і гнучкістю моделювання.

Можливості «SolidWorks Simulation» для моделювання специфічної, часто сильно нелінійної та структурно складної поведінки гірських масивів, особливо в умовах великих деформацій навколо гірничих виробок або очисних камер, можуть бути більш обмеженими порівняно зі спеціалізованими геотехнічними пакетами або останніми версіями універсальних комплексів «Ansys». Тому в

подальшому основною розрахунковою програмою було обрано «Ansys, Inc. Products 2019 R3».

Розрахунки виконувались для умов Криворізького залізорудного басейну, де видобуток магнетитових кварцитів здійснюється на кар'єрах відкритим способом п'ятьма гірничо-збагачувальними комбінатами (ГЗК).

Враховуючи досягнення більшістю кар'єрів глибин 350 – 400 м, значне підвищення собівартості видобутку з подальшим пониженням глибини розробки та критичний стан екології в межах залізорудного басейну оптимальним рішенням є перехід на відкрито-підземний та подальший підземний видобуток магнетитових кварцитів.

При підготовці вихідних даних для «Ansys, Inc. Products 2019 R3» важливо мати достовірні значення фізико-механічних властивостей, що отримані в лабораторних або польових умовах для конкретних типів руд, вміщуючих порід та матеріалу закладки, при моделюванні напружено-деформованого стану масиву відкрито-підземної розробки родовищ, які наведено в таблиці.

Таблиця

Вихідні дані властивостей гірських порід та закладного матеріалу

Назва показника	Одиниці вимірювань	Магнетитові кварцити	Розріхлена пуста порода	Закладний матеріал (закладка)
Модуль Юнга	МПа	35000	5000	500
Об'ємна вага	кг/м ³	3400	2400	2000
Межа міцності на розтягнення	МПа	12	0,3	0,8
Межа міцності на стискання	МПа	120	5	8
Коефіцієнт Пуасона	безрозмірний	0,25	0,25	0,15

За кінцеву глибину кар'єру (або границю переходу з відкритого на підземний видобуток) було прийнято сьогодишню середню глибину кар'єрів на рівні – 300 м з висотою уступу $h=15$ м та шириною уступу – 15 м. В нижній частині довжина кар'єру зазвичай приймалася рівною потужності покладу. Довжина вхрест простягання на рівні денної поверхні – 2000 м. Кут нахилу стелини майбутніх камер під дном кар'єру – 45 градусів, з товщиною стелини – 90 м (при камерних системах розробки). Висота відпрацювання майбутніх горизонтів складала – 90 м.

На рис. 2 представлено загальну вихідну розрахункову схему з сіткою кінцевих елементів відкрито-підземного видобутку для розрахунку НДС в

комбінованому масиві при відкрито-підземному відпрацюванні родовищ запропонованими варіантами.

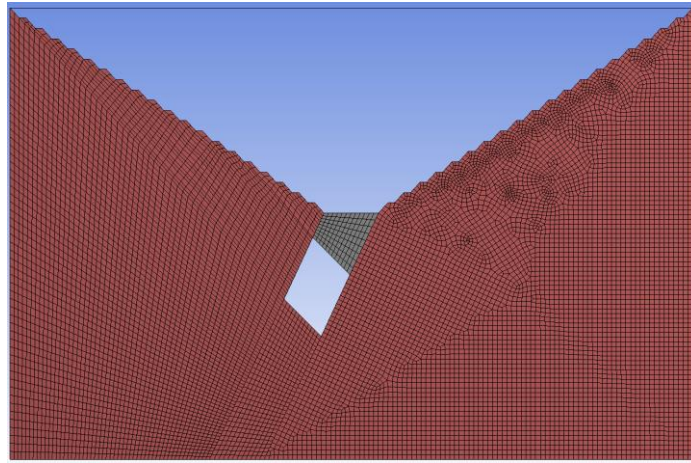


Рис. 2. Сітка поділу моделі родовища, що досліджується в «Ansys»

Сутність представленої розрахункової схеми комбінованого відкрито-підземного видобутку полягає в поділенні масиву на сітку кінцевих елементів. Розмір вихідної комбінованої моделі приймається подібним розмірам технології комбінованого видобутку руди, що досліджується [12–14].

Сітка поділу моделі родовища в «Ansys» – це дискретне представлення його геометричної та геологічної структури за допомогою скінченних елементів, що є основою для застосування рівнянь механіки суцільних середовищ та проведення чисельного аналізу при відкрито-підземній технології видобутку магнетитових кварцитів [15].

Встановлення густоти сітки (розміру елементів) залежно від очікуваного розподілу напружень та деформацій є стандартною та вкрай важливою проблемою в «Ansys». Раціональний підхід до сіткування дозволяє: 1) забезпечити необхідну точність розрахунку в критичних точках або місцях моделі; 2) значно зменшити загальну кількість кінцевих елементів та вузлів у моделі; 3) скоротити обчислювальні витрати (необхідну оперативну пам'ять та час розрахунку) без суттєвої втрати точності в критичних ділянках моделі.

Для розрахунків в моделі було використано сітку з поділенням на гексаедричні елементи (див. рис. 2.), що є добрим вибором з точки зору якості елементів, а також розміром сітки – 7 м. Такий розмір сітки може бути прийнятним для моделювання регіонального напруженого стану на великій території великомасштабних об'єктів, таких як загальна стійкість бортів великого кар'єру або підземних очисних камер під дном кар'єру.

На рис. 3 представлено демонстраційні результати моделювання, у вигляді візуалізації результатів чисельного моделювання при поєднанні відкритих та підземних гірничих робіт з елементами закладки, що відображають накладання двох основних впливів на первинне поле напружень. Вплив існування кар'єру та вплив підземного очисного камерного виймання з наступним заповненням камер твердіючою сумішшю.

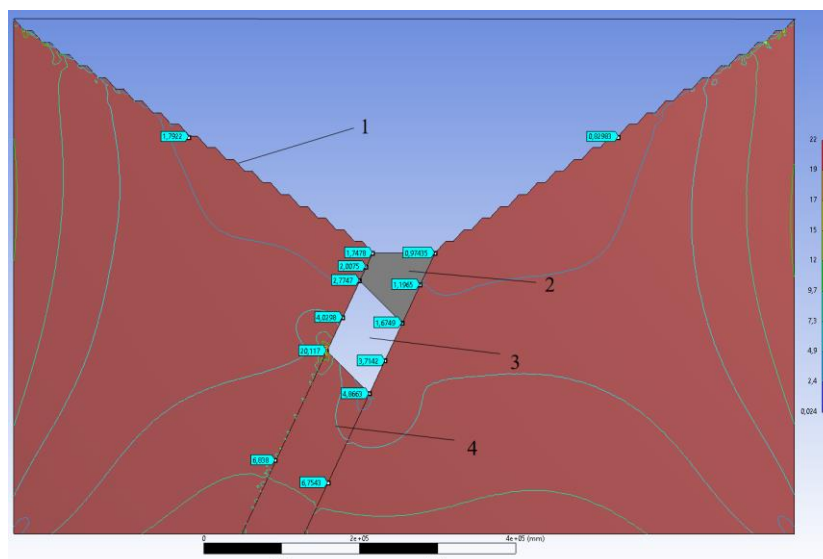


Рис. 3. Розподіл ізоліній головних напружень в масиві при варіанті відкрито-підземної розробки родовища магнетитових кварцитів з камерним вийманням руди і формуванням бар'єрного цілика з твердіючої закладки: 1 – контур кар'єру; 2 – твердіюча закладка; 3 – очисна камера нижнього підземного горизонту; 4 – рудний поклад

Аналізуючи візуалізацію ізоліній в контурах кар'єру та навколо підземних камер з відкритим очисним простором, але при наявності бар'єрного цілика з твердіючої закладки можна зробити певні висновки.

Ізолінії головних стискаючих напружень σ_1 щільно розташовуються навколо контуру очисних камер, особливо біля кутів та по центру покрівлі або підшви, формуючи так звані «арки напружень».

Це показує зони високої концентрації стискаючих напружень, що є потенційно небезпечними з точки зору руйнування від стискання. В нижній частині бар'єрного цілика величина σ_1 складає – 1,67 МПа, що є значно меншим за міцність штучного масиву твердіючої закладки верхнього горизонту. Ізолінії головних розтягуючих напружень σ_3 можуть з'являтися на контурі камер або в зонах розвантаження, особливо біля вільної поверхні, якою є контур виймання, вказуючи на ризик обвалення. Розташування ізоліній чітко показує форму зони впливу підземної розробки та кар'єру. Від очисного простору за падінням покладу спостерігається зменшення σ_1 , що означає зменшення саме індукованої складової напружень та їх концентрації в зоні очисного простору, а більш рівномірний розподіл свідчить про повернення до більш стабільного, незайманого стану напружень в масиві, де локальні збурення вже не домінують.

А також навколо бар'єрного цілика з закладки ізолінії чітко демонструють, як закладений цілик впливає на розподіл напружень порівняно з відкритим простором. В середині самого цілика ізолінії σ_1 мають високі значення, показуючи, що твердіюча закладка несе значне навантаження. На межі між закладеним ціликом та відкритим простором камер ізолінії демонструють, як закладка перерозподіляє напруження, знижуючи їх концентрацію в сусідньому гірському масиві.

Це візуалізує ефект підтримання від закладки та її роль у формуванні загального напруженого стану. Градієнт напружень або щільність ізоліній становляться високими на границі різних структур руди або породи та очисного простору з твердіючою закладкою.

Таким чином, представлення результатів у вигляді ізоліній є дуже наочним, оскільки дозволяє швидко визначати межі зон з різними рівнями напружень, ідентифікувати найбільш навантажені та розвантажені ділянки масиву та закладки, а також оцінити взаємний вплив відкритих та підземних робіт. Це є ключовим для оцінки стійкості та прийняття проєктних інженерних рішень.

На рис. 4 показано епюри напружень гірського масиву під дном кар'єру у вигляді кольорового поля, де кожному значенню напруження в МПа відповідає певний колір. Зазвичай, на градієнтній шкалі червоні або «теплі» кольори відповідають високим значенням напружень (часто концентраціям), а сині або «холодні» – низьким значенням (часто розвантаження). Також можна побачити максимальні і мінімальні значення.

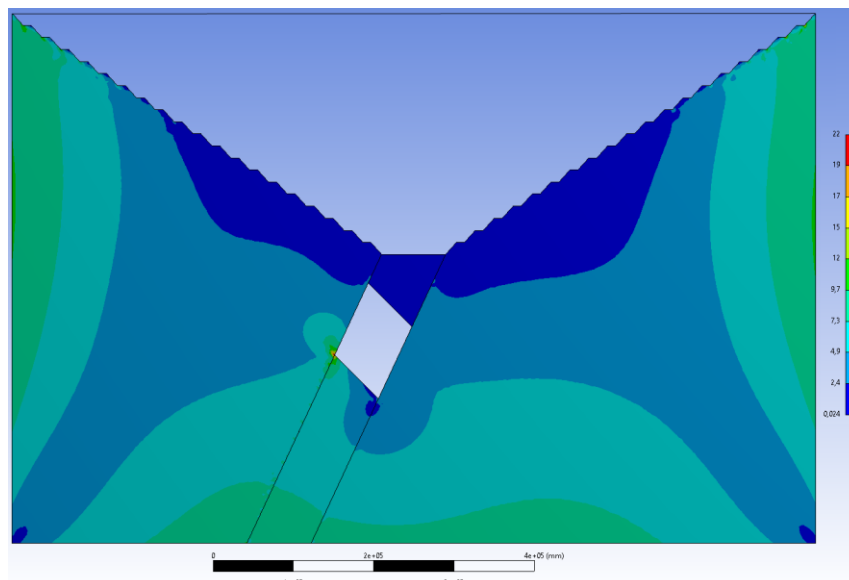


Рис. 4. Епюри напружень у вигляді градієнтної кольорової діаграми комбінованого гірського масиву, штучного бар'єрного цілика з твердіючої закладки та робочої очисної камери

При виконанні досліджень всі схеми були приведені до єдиного масштабу моделювання, що дозволило виконувати дослідження напружено-деформованого стану комбінованого масиву з високою точністю отриманих результатів.

На рис. 5 представлена залежність величини напружень в гірському масиві під дном кар'єру від глибини розташування майбутніх підземних очисних камер I та II черги відпрацювання.

Аналіз результатів розрахунків величини напружень в гірському масиві дає можливість встановити наступну закономірність.

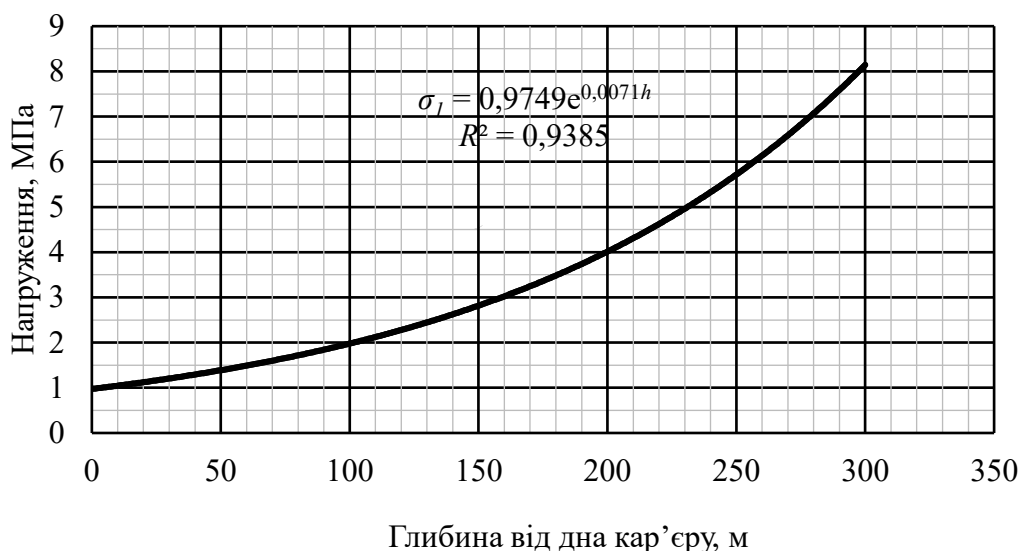


Рис. 5. Залежність величини максимальних напружень в гірському масиві під дном кар'єру від глибини розташування майбутніх підземних очисних камер

Виявлена дослідженнями залежність добре описується експоненціальною функцією виду:

$$\sigma_1 = 0,9749e^{0,0071h},$$

$$R^2 = 0,9385,$$

де σ_1 – величина максимальних напружень в гірському масиві, МПа; h – глибина розташування майбутніх підземних камер під дном кар'єру, м; R – величина достовірності апроксимації.

Отримана залежність має високий коефіцієнт кореляції та підтверджує відомі результати досліджень, які були отримані іншими вченими при вирішенні близьких за тематикою задач.

Отже, розрахунки надають конкретну кількісну характеристику зміни напруженого стану в залежності від глибини, підкреслюючи критичну важливість цих значень для безпечного та ефективного переходу до підземної розробки родовища.

Висновки. Таким чином, запропонована методика досліджень напружено-деформованого стану масиву при переході з технологій відкритого видобутку на технології відкрито-підземного та підземного видобутку залізорудної сировини прийнята для подальших досліджень комбінованих масивів аналітичними методами та візуалізації завдань і розв'язання задач, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети.

Перелік посилань

1. Stupnik, M.I., Kalinichenko, V.O., Kalinichenko, O.V., Muzika, I.O., Fed'ko, M.B., & Pis'menniy, S.V. (2015). 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*, (7), 377–382.

2. Ступнік, М.І., & Калініченко, В.О. (2013). Проблеми моніторингу денної поверхні в полях закритих і діючих шахт Криворізького залізрудного басейну. *Збірник наукових праць Науково-дослідного гірничорудного інституту*, (54), 17–22.
3. Ступнік, М.І., Калініченко, В.О., Калініченко, О.В., Музика, І.О., Федько, М.Б., & Письменний, С.В. (2015). Дослідження напружено-деформованого стану гірського масиву поклада магнетитових кварцитів в умовах шахти «Гігант-Глибока» ПАТ «ЦГЗК». *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promishlennost*, (5), 85–88.
4. Stupnik, N., & Kalinichenko, V. (2012). Parameters of shear zone and methods of their conditions control at underground mining of steep-dipping iron ore deposits in Kryvyi Rig basin. *Geomechanical Processes during Underground Mining*, 25–28. <https://doi.org/10.1201/b13157-5>.
5. Rymarchuk, B.I., Shepel, O.L., & Khudyk, M.V. (2017). Expediency of application of the vertical concentrated charges to decrease losses of ore on a lying wall of deposits. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, (3), 32–37. <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>.
6. Shekhunova, S., & Kril, T. (2021). Risk analysis for prevention emergencies in post-mining areas. *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215k2068>.
7. Фролов, О. О., & Бельтек, М. І. (2022). Дослідження впливу тріщинуватості скельного гірського масиву на коефіцієнт структурного ослаблення. *Технічна інженерія*, 2(90), 183–192. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-183-192](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-183-192).
8. Фролов, О. О., Бельтек, М. І., & Косенко, Т. В. (2025). Обґрунтування вибору моделі вибухового руйнування скельного гірського масиву в програмному середовищі Ansys autodyn. *Технічна інженерія*, 2 (94), 283–290. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-283-290](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-283-290).
9. Калініченко, О.В. (2018). Дослідження напружено-деформованого стану масиву математичними методами. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського: Розробка корисних копалин*, (29, 68, №5, 2), 133–137.
10. Tomova, M. (2024). Geophysical Methods for Optimizing the Design and Construction of Underground Mining. *12th Congress of the Balkan Geophysical Society*, 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202449BGS28>.
11. Tomova, M., & Kisyov, A. (2024). Applications and advantages of geophysical methods in underground mining. *Annual of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”*, (67), 184–188. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13762777>.
12. Dong, G. (2012). Cross domain similarity mining. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 14(1), 43–47. <https://doi.org/10.1145/2408736.2408744>.
13. Guarascio, M., Fabris, M., & Castelli, E. (2020). Numerical model simulation of the subsidence induced by solution mining cavities. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, 233–240. <https://doi.org/10.1201/9781003078531-34>.
14. Settari, A., & Sen, V. (2007). The role of geomechanics in integrated reservoir modeling. *The Leading Edge*, 26(5), 622–627. <https://doi.org/10.1190/1.2737102>.
15. Nguyen, V.U. (1985). Some fuzzy set applications in mining geomechanics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22(6), 369–379. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)90002-6).

ABSTRACT

Purpose. Geomechanical analysis of rock mass conditions to justify the stability of open-pit slopes and underground workings during the transition from open-pit to combined mining.

The methods. A comprehensive approach was applied, which included: analytical summarization and systematization of existing scientific works on geomechanics, mining engineering, and mathematical modeling; analysis of the physical and mechanical properties of heterogeneous rock masses; the finite element method for model creation; and regression analysis.

Findings. A study established that the chosen methodology for analyzing the stress-strain state during combined mining effectively models and visualizes tasks for engineering decision-making. It was proven that it is appropriate to analyze the stress-strain state of rock masses using classical mathematical modeling methods, specifically the finite element method. Presenting the results as contour lines is a clear way to quickly identify the boundaries of stress zones, locate the most stressed and unstressed areas of the rock mass, and evaluate the mutual influence of open-pit and underground workings. This is key for assessing stability and making design-related engineering decisions.

The originality. Quantitatively, the studies conducted justified the relationship between the magnitude of maximum stresses in the rock mass beneath the open-pit floor and the depth of the future underground stopes. For the first time under these conditions, an exponential relationship with a high coefficient of determination was established. A pattern was identified where the dense arrangement of principal compressive stress isolines around the stope contour, particularly at the corners and in the center of the roof, is a result of the formation of “stress arches”.

Practical implementation. The research findings allow for the scientific substantiation of mining operation parameters and sequencing during the transition from open-pit to underground mining. This minimizes collapse risks, ensures the stability of pit walls, and enhances work safety in the transition zone.

Keywords: *open-pit, combined, underground, integrated mining, ore, magnetite quartzites, stress-strain state.*

дата першого надходження статті до видання	01.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	02.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	03.09.2025