

© В.В. Руських¹, І.В. Філіппов¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ СИСТЕМИ КРІПЛЕННЯ ПІДГОТОВЧОЇ ВИРОБКИ В РІЗНІ ПЕРІОДИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

V. Ruskykh¹, <https://orcid.org/0000-0002-5615-2797>

I. Filippov¹ <https://orcid.org/0009-0009-3905-865X>

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A RESOURCE-SAVING SUPPORT SYSTEM FOR A DEVELOPMENT WORKING AT DIFFERENT STAGES OF OPERATION

Мета. Дослідження напружено-деформованого стану ресурсозберігаючої системи кріплення підготовчої виробки в різні періоди експлуатації.

Методика. Дослідження напружено-деформованого стану системи «гірський масив – кріплення» виконано методом скінченних елементів із використанням програмного комплексу SolidWorks Simulation для умов шахти Шахта «Самарська» ПрАТ ДТЕК Павлоградвугілля з урахуванням гірничо-геологічних умов, фізико-механічних властивостей порід і параметрів рамно-анкерного кріплення. Проаналізовано розподіл напружень у приконтурному масиві та елементах кріплення на різних етапах експлуатації виробки: поза впливом очисних робіт, у зоні опорного тиску та після проходження очисного вибою.

Результати. У результаті чисельного моделювання встановлено закономірності зміни напружено-деформованого стану системи «гірський масив – кріплення» на різних етапах експлуатації підготовчої виробки. Визначено, що на початковому етапі експлуатації породний масив перебуває переважно у пружному стані, а основні концентрації напружень локалізуються у бокових частинах виробки та в опорних вузлах рамного кріплення. При наближенні очисного вибою відбувається суттєве зростання вертикальних і приведених напружень, активізуються процеси розшарування порід покрівлі та підосви, а максимальні напруження в елементах рамного кріплення досягають 300 МПа. Після проходження лави спостерігається формування асиметричного поля напружень і часткове розвантаження елементів кріплення за рахунок роботи охоронної системи, що супроводжується зниженням напружень до 200–220 МПа.

Наукова новизна. Вперше встановлено закономірності зміни напружено-деформованого стану породного масиву навколо підготовчої виробки з ресурсозберігаючою системою кріплення на різних етапах її експлуатації, що дозволило визначити характер перерозподілу напружень та розвитку зон пластичних деформацій залежно від умов підтримання виробки.

Практична значимість. Результати досліджень дозволяють обґрунтувати раціональні параметри ресурсозберігаючої системи кріплення підготовчих виробок в умовах шахти «Самарська» та можуть бути використані при проектуванні й проведенні виробок у складних гірничо-геологічних умовах.

Ключові слова: гірництво, гірський масив, напружено-деформований стан, підготовча виробка, ресурсозберігаюче кріплення.

Вступ. Проблема забезпечення стійкості підготовчих виробок у складних гірничо-геологічних умовах залишається одним із ключових напрямів сучасної геомеханіки, як в Україні [1], так і в світі [2]. Основна увага дослідників зосереджується на вивченні напружено-деформованого стану (НДС) породного масиву навколо виробок, а також закономірностей перерозподілу напружень та взаємодії системи «масив – кріплення» за різного періоду експлуатації [3].

Особливої актуальності набуває застосування ресурсозберігаючих систем кріплення, які забезпечують підвищення стійкості виробок за одночасного зниження матеріалоємності та експлуатаційних витрат. Ефективність таких конструкцій значною мірою залежить від умов їх взаємодії з породним масивом [4], а також зміни напружено-деформованого стану навколо виробки в процесі її експлуатації [5].

Найбільш складні умови підтримання підготовчих виробок виникають у період впливу очисних робіт [6], коли в приконтурному масиві формуються зони підвищених концентрацій напружень та інтенсивних деформацій. За таких умов традиційні системи кріплення не завжди забезпечують необхідний рівень стійкості виробок, що обумовлює необхідність дослідження напружено-деформованого стану ресурсозберігаючих конструкцій кріплення та оцінки їх ефективності в різні періоди експлуатації.

Аналіз літературних джерел за темою дослідження. В роботах українських вчених [7–9] встановлено, що зі збільшенням глибини ведення гірничих робіт суттєво зростає нерівномірність розподілу вертикальних і горизонтальних напружень у приконтурній зоні виробок. Це призводить до інтенсивного деформування покрівлі, боків та підосви виробки, а також до втрати несучої здатності традиційних конструкцій кріплення.

Сучасні дослідження все частіше базуються на чисельному моделюванні методом скінченних елементів [10, 11], що дозволяє детально оцінювати зміну НДС породного масиву залежно від етапу експлуатації виробки. А у роботах [12, 13] відзначається, що в процесі тривалої експлуатації виробки відбувається накопичення залишкових деформацій, яке супроводжується зміною структури породного масиву та розвитком зон непружних деформацій. Це потребує застосування адаптивних систем кріплення, здатних забезпечувати стабільний стан виробки протягом усього терміну її служби [14].

Водночас аналіз літературних джерел [15–17] показує, що більшість наявних досліджень присвячені окремим етапам експлуатації виробки або окремим аспектам роботи кріплення без комплексного урахування зміни напружено-деформованого стану масиву впродовж усього періоду функціонування. Недостатньо дослідженими залишаються питання взаємодії ресурсозберігаючих конструкцій кріплення з породним масивом на різних етапах експлуатації виробки та закономірності перерозподілу напружень при зміні гірничотехнічних умов та у зв'язку з цим, дослідження напружено-деформованого стану ресурсозберігаю-

чої системи кріплення підготовчої виробки в різні періоди експлуатації є актуальним науковим завданням, спрямованим на підвищення стійкості гірничих виробок, забезпечення їх безпечної експлуатації та вдосконалення ефективності сучасних систем кріплення в складних гірничо-геологічних умовах.

Методика досліджень. Для дослідження напружено-деформованого стану системи «гірський масив – кріплення» використано метод скінченних елементів, який є одним із найбільш ефективних підходів до розв’язання складних задач геомеханіки [18, 19]. Застосування чисельного моделювання дозволяє враховувати складну геологічну будову масиву, нелінійні властивості порід та взаємодію елементів кріплення з приконтурним середовищем [20].

Чисельне моделювання виконувалось у програмному комплексі SolidWorks Simulation, який забезпечує реалізацію пружно-пластичних моделей деформування та аналіз просторового напружено-деформованого стану породного масиву.

Об’єктом дослідження є гірничо-геологічні умови пласта С₅ шахти «Самарська» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». Геологічна модель сформована на основі даних геологорозвідувальних свердловин №2216 та №3352, дані яких представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості порід за даними шахти «Самарська»

№	Тип породи	Товщина шару, м	Масова густина, кг/м ³	Опір стиску, МПа	Опір розтягу, МПа	Модуль Юнга, МПа
1	Алевроліт	2,6	2340	13,5	2,8	3000
2	Аргіліт	2,3	2200	18,8	1,5	1000
3	Пісковик	12,3	2530	25,0	3,3	15000
4	Алевроліт	3,5	2340	13,5	2,8	3000
5	Вугільний пласт С ₅	1,2	1480	40,0	1,0	3000
6	Алевроліт	0,4	2340	13,5	2,8	3000
7	Пісковик	12,1	2530	25,0	3,3	15000
8	Вугільний проша-рок	0,2	1480	40,0	1,0	3000
11	Алевроліт	2,2	2340	13,5	2,8	3000
12	Пісковик	2,5	2530	25,0	3,3	15000
13	Аргіліт	2,1	2200	18,8	1,5	1000
14	Алевроліт	1,2	2340	13,5	2,8	3000
15	Пісковик	1,0	2530	25,0	3,3	15000

Геометричні параметри розрахункової моделі становлять 26 м по ширині, 44 м по висоті та 5 м по глибині. Кут падіння вугільного пласта прийнято 2°, що відповідає реальним умовам залягання та дозволяє врахувати асиметрію розподілу напружень.

Граничні умови моделі задано відповідно до глибини ведення гірничих робіт 450 м. На верхню та нижню межі моделі прикладено навантаження 10 МПа, бічні межі обмежені умовами симетрії, нижня поверхня жорстко закріплена.

У моделі враховано ресурсозберігаючу конструкцію кріплення. Основні елементи кріплення представлені профілем СВП-19. Для опису взаємодії між кріпленням і породним масивом використано контактний прошарок зі зниженими міцнісними характеристиками, що імітує сітку затягування. Анкерна система включає сталеполімерні та канатні анкери довжиною 6 м і діаметром 26 мм із кроком встановлення 1,0 м.

У розрахунках враховано фізико-механічні властивості вугілля, аргілітів, алевролітів та пісковиків. Для опису поведінки порід застосовано пружно-пластичну модель із білінійною діаграмою «напруження – деформація». Оцінку стійкості приконтурного масиву виконано за критерієм Кулона-Мора.

Аналіз результатів здійснювався за розподілом вертикальних, горизонтальних та еквівалентних напружень, а також величин деформацій приконтурного масиву. Це дозволило оцінити зміну напружено-деформованого стану системи «масив – кріплення» на різних етапах експлуатації підготовчої виробки.

Конструкція ресурсозберігаючої системи кріплення гірничої виробки.

Розроблена конструкція кріплення (рис. 1) [21, 22] призначена для підтримання підготовчої виробки площею поперечного перерізу 11,7 м² у світлі з напівеліпсною формою контуру.

Верхня частина системи представлена дворівневим рамно-анкерним кріпленням, яке включає металеву сітку, окремі елементи якої з'єднані між собою гачками. Сітка виконує функцію несучого елемента конструкції та притискається до породного масиву за допомогою притискної планки, виготовленої з профілю СВП-19.

Конструкція системи кріплення забезпечує спільну роботу рамних та анкерних елементів, що сприяє рівномірному перерозподілу навантаження в приконтурному масиві. Завдяки цьому підвищується стійкість виробки, зменшуються локальні деформації порід та забезпечується ефективне утримання нестійких ділянок покрівлі й боків виробки.

Основними несучими елементами системи є штангові та канатні анкери, що проходять крізь притискну планку та фіксуються гайками. Використання профілю СВП-19 як притискного елемента обумовлено можливістю адаптації конструкції до різних етапів експлуатації підготовчої виробки.

Запропонована система кріплення, заглиблюючись у породний масив на глибину до 6 м, забезпечує протидію процесам розшарування порід та підвищує стійкість приконтурної зони виробки. Притиснута анкерними елементами металева сітка обмежує розвиток деформацій і запобігає відшаруванню порід покрівлі в міжанкерному просторі. Верхня частина системи представлена дворівневим рамно-анкерним кріпленням, яке включає металеву сітку, окремі елементи якої з'єднані між собою гачками. Сітка виконує функцію несучого елемента конструкції та притискається до породного масиву за допомогою притискної планки, виготовленої з профілю СВП-19.

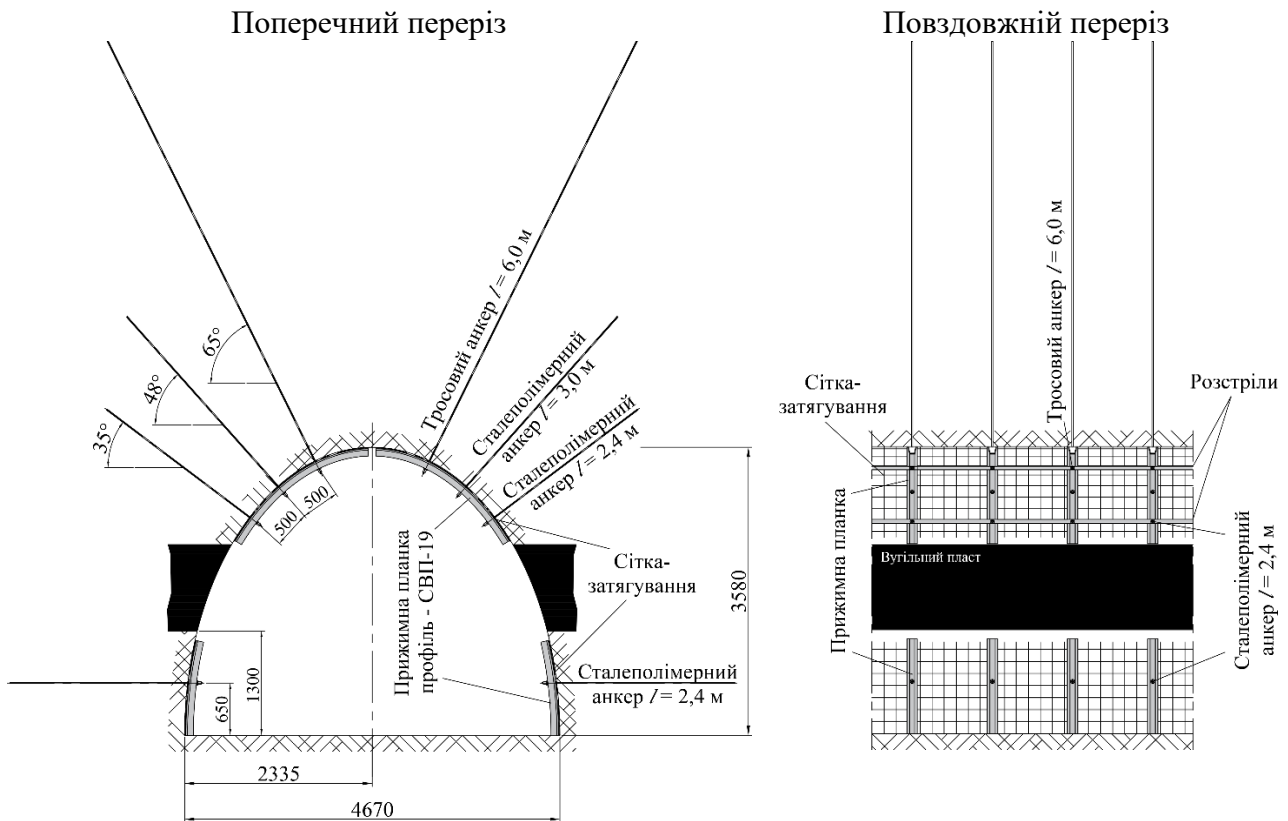


Рис. 1. Конструкція ресурсозберігаючого кріплення виробки

Основними несучими елементами системи є штангові та канатні анкери, що проходять крізь притисну планку та фіксуються гайками. Використання профілю СВП-19 як притискного елемента обумовлено можливістю адаптації конструкції до різних етапів експлуатації підготовчої виробки.

Запропонована система кріплення, заглиблюючись у породний масив на глибину до 6 м, забезпечує протидію процесам розшарування порід та підвищує стійкість приконтурної зони виробки. Притиснута анкерними елементами металева сітка обмежує розвиток деформацій і запобігає відшаруванню порід покрівлі в міжанкерному просторі.

Результати дослідження. Обчислювальний експеримент виконувався для трьох етапів експлуатації виробки: кріплення СВП-19 (без впливу видобувних робіт), СВП-19 зі стояками посилення (в зоні впливу видобувних робіт) та СВП-19 зі стояками посилення та охоронним рядом (після проходження очисного вибою).

На першому етапі експлуатації у покрівлі та підшві виробки формується зона розвантаження, конфігурація якої відповідає склепінню природної рівноваги. У боках виробки спостерігається концентрація стискальних напружень, що обумовлює розвиток бічного тиску на кріплення. При цьому горизонтальні напруження мають переважно рівномірний характер, за винятком локальних приконтурних зон у боках та підшві виробки.

Аналіз приведених напружень (рис. 2) показав, що на початковій стадії підтримання виробки породний масив працює переважно у пружному режимі. У приконтурній зоні покрівлі та підшви формуються області розвантаження з незначними величинами напружень, тоді як у боках виникають локальні зони їх концентрації.

Максимальні значення напружень мають обмежений характер і не призводять до розвитку стійких зон руйнування порід. Вплив опорного тиску у цей період є незначним, що підтверджується малими переміщеннями контуру виробки.

Дослідження напружено-деформованого стану елементів кріплення (рис. 2, б) показало нерівномірний характер їх навантаження. Верхня частина рамного кріплення та анкерна система залишаються відносно недовантаженими, тоді як основне навантаження сприймають стояки рами. Найбільші значення напружень формуються в опорних вузлах стояків унаслідок концентрації контактного тиску.

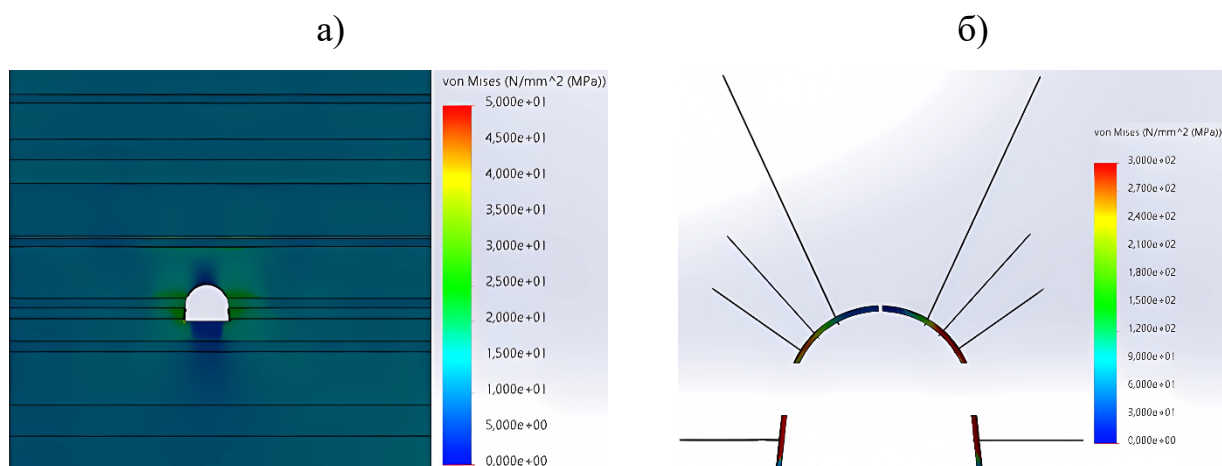


Рис. 2. Епюра приведених напружень поза зоною впливу видобувних робіт (а) та розподіл приведених напружень σ в елементах кріплення (б)

Для анкерної системи характерний низький рівень приведених напружень, що свідчить про достатній запас міцності та обмежену участь анкерів у роботі системи на початковому етапі експлуатації виробки. При цьому периферійні анкери сприймають більші навантаження порівняно з центральними, що пояснюється особливостями просторового перерозподілу напружень у приконтурному масиві.

Отримані результати свідчать, що на початковому етапі експлуатації виробки напружено-деформований стан системи «масив – кріплення» характеризується переважно пружним режимом роботи породного масиву та локальним характером концентрації напружень. Основне навантаження сприймають стояки рамного кріплення, тоді як анкерна система працює з істотним запасом несучої здатності. Це забезпечує стабільний стан виробки та обмежений розвиток деформацій у приконтурній зоні.

На другому етапі експлуатації виробки при наближенні очисного вибою структура напруженого стану загалом зберігає характер, типовий для початкового етапу експлуатації, однак спостерігається суттєве зростання інтенсивності напружень та розмірів зон їх локалізації. У покрівлі та підшві виробки збільшуються області розвантаження і активізуються процеси розшарування порід, тоді як у бокових частинах формується виражена асиметрична зона концентрації стискальних напружень. Найбільші значення напружень спостерігаються з боку наближення очисного вибою, що свідчить про перерозподіл гірничого тиску в масиві.

Аналіз приведених напружень σ (рис. 3, а) показав, що на початковій ділянці зони опорного тиску породний масив ще зберігає переважно пружний режим деформування. У приконтурних зонах покрівлі та підшви формуються області розвантаження з низьким рівнем напружень, тоді як у боках виробки виникають локальні концентрації σ . Максимальні значення напружень мають обмежене поширення, однак свідчать про поступове ускладнення геомеханічних умов підтримання виробки.

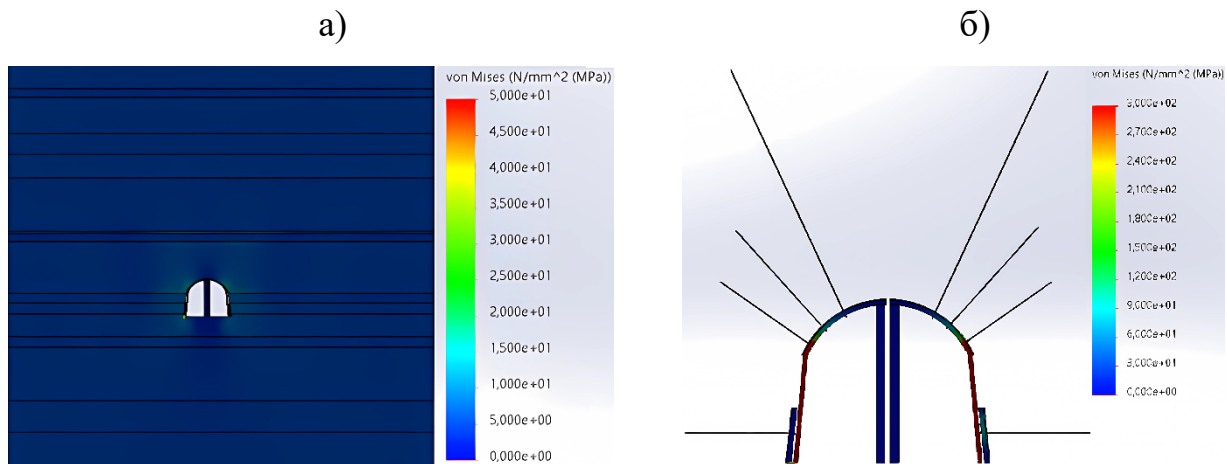


Рис. 3. Епюра приведених напружень в зоні впливу видобувних робіт (а) та розподіл приведених напружень σ в елементах кріплення (б)

Дослідження роботи системи кріплення (рис. 3, б) показало суттєве зростання навантаження на стояки рамного кріплення. У найбільш навантажених ділянках рівень вертикальних і приведених напружень наближається до межі текучості сталі, що свідчить про роботу стояків у граничному режимі. У вузлах контакту рам із елементами підсилення формуються локальні концентрації напружень та проявляються вигинні деформації.

Анкерна система працює більш рівномірно та зберігає запас несучої здатності. Найбільш навантаженими є анкери з боку наближення очисного вибою, де спостерігається зростання розтягувальних і приведених напружень у приконтурній зоні. Це свідчить про активну участь анкерів у стримуванні процесів розшарування покрівлі та перерозподілі навантаження між елементами кріплення.

Отримані результати свідчать, що при наближенні очисного вибою відбувається інтенсифікація проявів гірничого тиску, яка супроводжується зростанням напружень у приконтурному масиві та елементах кріплення. Основне навантаження сприймають стояки рамного кріплення, тоді як анкерна система забезпечує стабілізацію приконтурних порід і зменшення розвитку деформаційних процесів у покрівлі виробки.

На третьому етапі, після проходження очисного вибою відбувається суттєва перебудова напружено-деформованого стану породного масиву, що супроводжується формуванням асиметричних зон концентрації напружень та перерозподілом гірського тиску між непорушеним масивом і виробленим простором.

У покрівлі та підшві виробки спостерігаються локальні області розшарування порід, однак їх розвиток має обмежений характер унаслідок переважання стискального напруженого стану.

У бокових частинах виробки формуються інтенсивні зони концентрації стискальних напружень. З боку непорушеного масиву зона опорного тиску характеризується значною шириною поширення та зростанням напружень до критичних значень, що призводить до розушцілення приконтурних порід і збільшення бічного навантаження на стояки рамного кріплення. З боку виробленого простору напружений стан має більш локальний, але інтенсивніший характер із розвитком концентрацій у покрівлі та підшві.

Розподіл приведених напружень σ (рис. 4, б) свідчить про концентрацію навантаження у приконтурних породах покрівлі, підшви та в межах дії охоронної системи. Найбільш небезпечні ділянки локалізуються поблизу елементів підсилення, де формуються локальні області підвищених напружень. При цьому основна частина приконтурного масиву ще не досягає суцільного руйнування, однак виникають потенційні осередки розвитку деформаційних процесів.

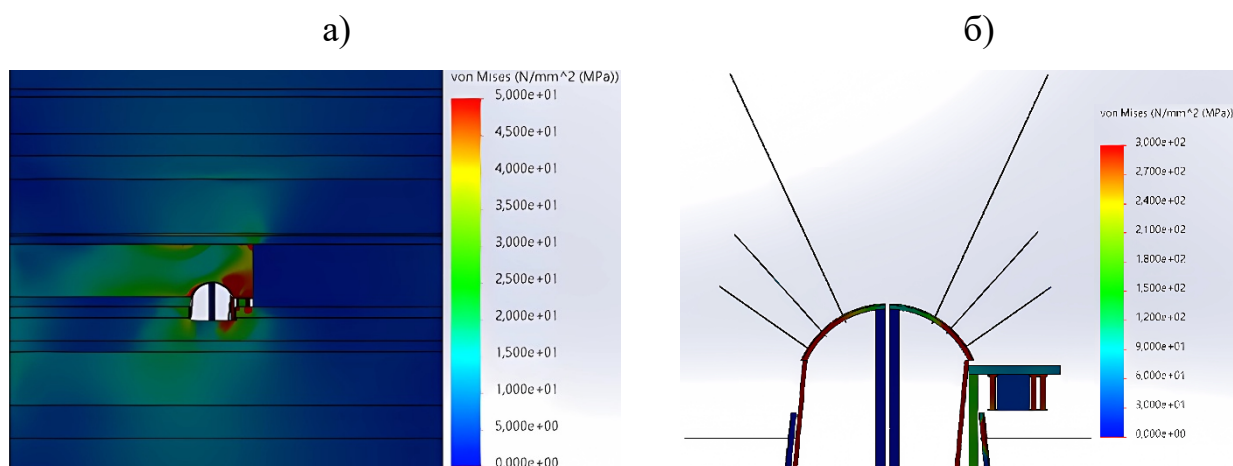


Рис. 4. Епюра приведених напружень після проходу очисного вибою (а) та розподіл приведених напружень σ в елементах кріплення (б)

Дослідження роботи системи кріплення (рис. 4, б) показало, що після проходження лави основне навантаження сприймають стояки рамного кріплення, які працюють у режимі, близькому до граничного. У стояках розвиваються вигинні деформації та локальні концентрації напружень, особливо з боку виробленого простору. Водночас анкерна система забезпечує стабілізацію покрівлі та ефективно обмежує процеси розшарування приконтурних порід.

Отримані результати свідчать, що після проходження очисного вибою геомеханічні умови експлуатації виробки суттєво ускладнюються. Формуються неоднорідні поля напружень і локальні зони концентрації навантаження. При цьому анкерна система зберігає несучу здатність та забезпечує стабілізацію приконтурного масиву, тоді як стояки рамного кріплення працюють у найбільш напружених умовах.

Аналіз роботи кріплення на різних етапах експлуатації. Результати отриманих результатів свідчать про суттєву зміну характеру напружено-деформованого стану системи «кріплення–масив» залежно від відстані до очисного вибою.

На першому етапі поза зоною впливу очисних робіт (понад 20 м попереду вибою) основні елементи кріплення сприймають базове гірниче навантаження. У найбільш навантажених ділянках конструкції формуються локальні зони концентрації напружень, при цьому максимальні значення в елементах верхньої частини рами досягають 250–260 МПа.

На другому етапі в зоні впливу очисного вибою у межах зони опорного тиску спостерігається максимальна інтенсивність навантаження на систему кріплення. Незважаючи на встановлення додаткових елементів підсилення у вигляді центральних стояків і бокових опор, основні елементи кріплення працюють у режимі, близькому до граничного стану. Рівень напружень у верхній частині рами досягає 300 МПа, що відповідає межі текучості матеріалу.

На третьому етапі після проходження очисного вибою підтримання виробки здійснюється за рахунок охоронної системи. У зоні розташування охоронного ряду спостерігається часткове розвантаження елементів рамного кріплення, що супроводжується зниженням рівня напружень до 200–220 МПа. Це свідчить про перерозподіл гірського тиску між охоронною системою та приконтурним породним масивом. Результати представлено на рис. 5.

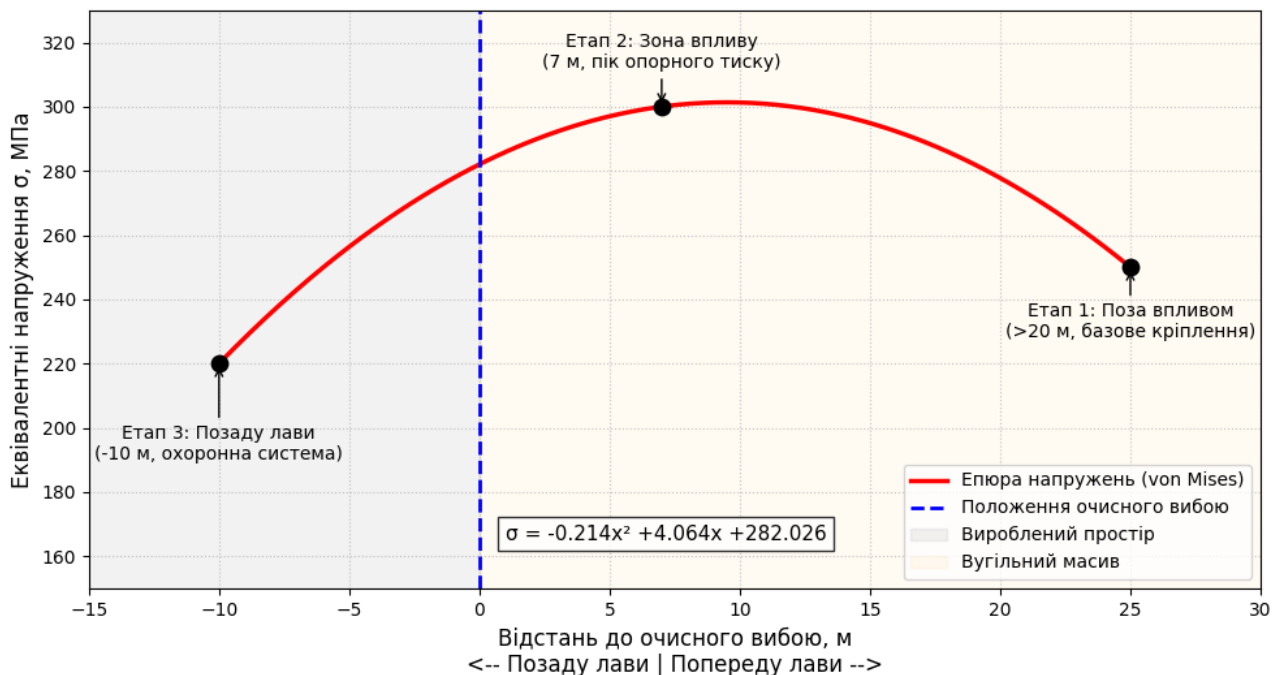


Рис. 5. Залежність напружень в елементах кріплення від відстані до очисного вибою

Графік показує, що максимальні напруження у елементах кріплення формуються в зоні опорного тиску попереду лави, де їх величина досягає близько 300 МПа. Це обумовлено інтенсивним перерозподілом гірничого тиску та зростанням навантаження на стояки рамного кріплення при наближенні очисного вибою.

Водночас у приконтурному породному масиві спостерігається протилежна тенденція (рис. 6). Найбільші значення напружень у масиві характерні для ділянки після проходження лави, де формується складний асиметричний напружений стан під впливом виробленого простору. У зоні опорного тиску попереду вибою рівень напружень у масиві знижується, що свідчить про активне включення системи кріплення у процес сприйняття навантаження.

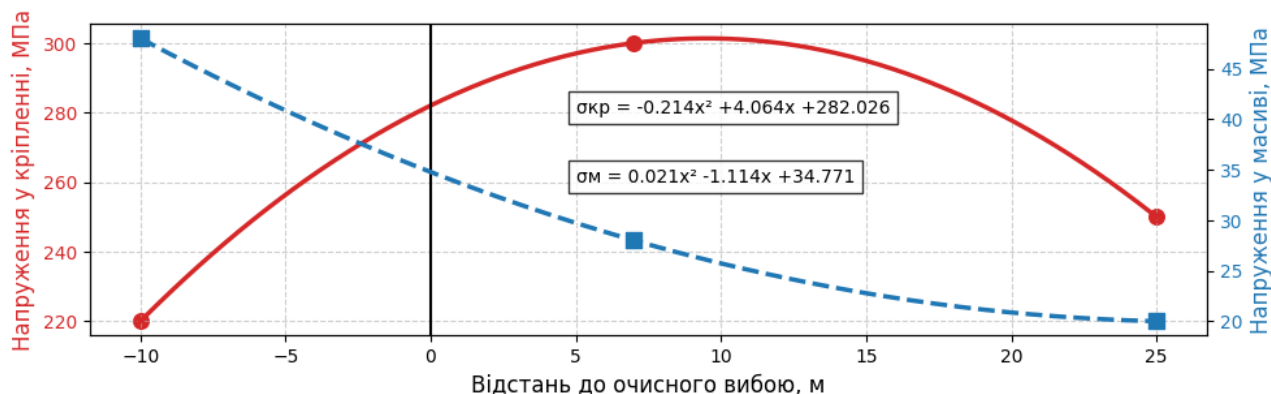


Рис. 6. Порівняльний аналіз напружень у системі «кріплення-масив»

Отримані результати підтверджують ефективність сумісної роботи системи «кріплення-масив», при якій зі збільшенням навантаження на елементи кріплення відбувається часткове розвантаження приконтурних порід. Після проходження лави напруження у кріпленні зменшуються, однак залишаються вищими порівняно з ділянками поза впливом очисних робіт, що вказує на тривалий вплив виробленого простору на геомеханічний стан виробки.

Таким чином, найбільш небезпечним етапом експлуатації підготовчої виробки є зона наближення очисного вибою, у межах якої елементи рамного кріплення працюють у режимі, близькому до граничного, а ефективність анкерної системи набуває визначального значення для забезпечення стійкості приконтурного масиву.

Висновки. У роботі досліджено закономірності формування напружено-деформованого стану системи «гірський масив – кріплення» на різних етапах експлуатації підготовчої виробки. На основі чисельного моделювання методом скінченних елементів встановлено особливості перерозподілу напружень у приконтурному масиві та елементах ресурсозберігаючої системи кріплення.

Встановлено, що на початковому етапі експлуатації виробки породний масив перебуває переважно у пружному стані, а основні концентрації напружень локалізуються у бокових частинах виробки та в опорних вузлах рамного кріплення. При цьому анкерна система працює з істотним запасом несучої здатності та виконує функцію стабілізації приконтурних порід. Найбільш складні геомеханічні умови формуються у зоні опорного тиску попереду очисного вибою. У цей період відбувається інтенсивне зростання вертикальних і приведених напружень, активізуються процеси розшарування порід покрівлі та підшви, а стояки кріплення працюють у режимі, близькому до граничного. Максимальні напруження в елементах кріплення досягають 300 МПа.

Після проходження лави відбувається суттєва перебудова напруженого стану масиву з формуванням асиметричних зон концентрації напружень у покрівлі, підшві та бокових частинах виробки. При цьому застосування охоронної системи забезпечує часткове розвантаження елементів рамного кріплення та зниження рівня напружень до 200-220 МПа.

Встановлено, що зі збільшенням навантаження на кріплення відбувається часткове розвантаження приконтурних порід, що свідчить про ефективну сумісну роботу системи «кріплення–масив».

Отримані результати підтверджують ефективність комбінованої ресурсозберігаючої системи кріплення, у якій основне навантаження сприймається рамними елементами, тоді як анкерна підсистема забезпечує обмеження процесів розшарування та стабілізацію приконтурного масиву. Результати досліджень можуть бути використані при обґрунтуванні параметрів ресурсозберігаючих систем кріплення та розробці заходів щодо підвищення стійкості підготовчих виробок у складних гірничо-геологічних умовах.

Вдячність. Представлені результати отримано в рамках виконання науково-дослідної роботи ДТ-532 «Геомеханічні та технологічні основи видобутку та переробки критичної сировини на принципах циркулярної економіки» (проект №0126U001137) за підтримки Міністерства освіти і науки України.

Перелік посилань

1. Salieiev, I., Bondarenko, V., Kovalevskaya, I., Malashkevych, D., & Galkov, R. (2025). Principles of mining-geological classification for maintaining mine workings in conditions of weakly metamorphosed rocks. *Mining of Mineral Deposits*, 19 (1), 26, 36. <https://doi.org/10.33271/mining19.01.026>
2. Yuan, W. H., Li, C. J., Liu, M., Zhang, A. X., & Zhang, W. (2026). An implicit stabilized smoothed particle finite element method for dynamic large-deformation analysis in geomechanics. *Computers and Geotechnics*, (197), 108211. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2026.108211>
3. Шека, І.В. (2023). Результати дослідження впливу надпрацювання на гірничі виробки, що закріплені композитним кріпленням. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*, (25), 67–79. <https://doi.org/10.37101/ftpgv25.01.006>
4. Symanovych, H., Salieiev, I., Shyshov, M., & Odnovol, M. (2022). Substantiating the optimization solutions for the mine working fastening system interaction with the enclosing rock mass. *Mining of Mineral Deposits*, 16(3), 54–60. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.054>
5. Mehtiyev, R. K., & Tanriverdiyev, Y. A. (2025). Numerical solutions of elastoplastic problems with application to underground mining stability. *Nafta-Gaz*, (7), 482–489. <https://doi.org/10.18668/NG.2025.07.07>
6. Demin, V., Zhumabekova, A., Zhurov, V., Belomestny, D., & Kainazarov, A. (2025). Study and rationale of tectonic fault crossing technology parameters by the mine face of a preparatory mine excavation. *Acta Montanistica Slovaca*, 30(2). <https://doi.org/10.46544/AMS.v30i2.11>
7. Снігур, В. Г. (2022). Методологічні принципи та рекомендації з розробки інноваційних технологій підтримки виробок, що повторно використовуються, на шахтах Західного Донбасу. *Збірник Наукових Праць НГУ*, (68), 67–80. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/68.067>
8. Хоменко, О. С., Кононенко, М. М., & Косенко, А. В. (2023). Аналітичні дослідження об'ластей деформації масиву порід навколо очисних камер. *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*, (25), 56–66. <https://doi.org/10.37101/ftpgv25.01.005>
9. Хорольський, А. О., Виноградов, Ю. О., Косенко, А. В., & Чоботько, І. І. (2023). *Ресурсозберігаючі способи кріплення гірничих виробок*. Монографія. ПП «Ліра-ЛТД».

10. Bondarenko, V.I., Sheka, I.V., Khorolskyi, A.O., Salieiev, I.A., Kovalevska, I.A., & Stoliarska, O.V. (2025). Substantiation of rational parameters for composite support in mine workings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 58–64. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-1/030>
11. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Symanovych, H.A., Sachko, R.M., & Sheka, I.V. (2023). Integrated research into the stress-strain state anomalies, formed and developed in the mass under conditions of high advance velocities of stope faces. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254(1), 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012062>
12. Bondarenko, V. I., Kovalevska, I. A., Malashkevych, D. S., Sachko, R. M., & Snihur, M. V. (2026). Geomechanical principles and specifics of modeling a complex method for de-stressing gas-dynamically active rock massif *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 25–33. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2026-1/025>.
13. Symanovych, H., Krasnyk, V., Odnovol, M., Snihur, M., & Sheka, I. (2025). Optimization of rational parameters for fastening and protection systems of mine workings in conditions of occurrence of unpredictable rock pressure manifestations. *Mining of Mineral Deposits*, 19(2), 107–120. <https://doi.org/10.33271/mining19.02.107>
14. Скіпочка, С. І., Сергієнко, В. М., Амелін, В. А., & Ситниченко, О. Ю. (2021). Геомеханічні ризики при підземному видобутку гіпсу. *Геотехнічна механіка*, (156), 88–99. <https://doi.org/10.15407/geotm2021.156.088>
15. Бондаренко, В. І., Ковалевська, І. А., Галков, Р. А., Мамайкін, О. Р., & Шека, І. В. (2025). Обґрунтування методів прогнозування раннього виявлення зон підвищених деформацій для забезпечення повторного використання гірничих виробок. *Збірник Наукових Праць НГУ*, (81), 7–17. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/81.007>
16. Tsivka, Y. (2024). Determination of the type of arched carbon fiber reinforced fastening of the preparatory opening for the conditions of the «Dniprovsk» mine in weakly metamorphized rocks. *Technology audit and production reserves*, 3(1 (77)), 35–40. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.306879>
17. Шека, І. В., Пойманов, С. М., Демченко, Ю. І., Рухлова, Н. Ю., & Малова, О. К. (2024). Визначення раціонального перерізу композитного кріплення в умовах ШУ «Покровське». *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*, (26), 19–42. <https://doi.org/10.37101/ftpgv26.01.002>
18. Qin, Q., Guan, W., Zhang, X., He, M., & Jia, H. (2026). Geomechanics model test research on mechanical mechanism of the self-formed roadway by bilateral roof-cutting technology. *Results in Engineering*, 108988. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.108988>.
19. Троханяк, В. І., & Богдан, Ю. О. (2015). Застосування методу кінцевих елементів при побудові сітки в ANSYS Meshing для CFD моделей. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, 2(30), 181–189.
20. Шека І.В. (2022). Методика проведення обчислювального експерименту з обґрунтування взаємодії композитного кріплення з гірським масивом. *Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Геотехнології гірництва та промислова екологія»*, 26 травня 2022 р.: тези доп. – Житомир, 2022. – С. 200
21. Бондаренко, В. І., Ковалевська, І. А., Руських, В. В., Гайдай, О.А., Пойманов, С.М. & Філіппов, І. В. (2026). *Спосіб комбінованого кріплення підготовчої виробки* (Патент України № 162420). Бюлетень № 12. Опубл. 25.03.26 р.
22. Руських, В.В., Гайдай, О.А., Філіппов, І.В. & Пойманов, С.М. (2025). Конструкція ресурсозберігаючої системи кріплення підготовчих виробок. *Збірник наукових праць НГУ*, (82). 55–64. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/82.055>

ABSTRACT

Purpose. Study of the stress-strain state of a resource-saving support system for a development drift during various stages of operation.

The methods. An analysis of the stress-strain state of the “rock mass–support” system was performed using the finite element method with the SolidWorks Simulation software package for conditions at the Samarska Mine PJSC DTEK Pavlogradvugillya, taking into account the mining and geological conditions, the physical and mechanical properties of the rock, and the parameters of the frame-anchor support. The stress distribution in the surrounding rock mass and support elements at various stages of the working face’s operation was analyzed: outside the influence of mining operations, in the zone of bearing pressure, and after the mining face has been passed through.

Findings. Numerical simulations have revealed patterns in the evolution of the stress-strain state of the “rock mass–support” system at various stages of the development drift’s operation. It was determined that at the initial stage of operation, the rock mass is predominantly in an elastic state, and the main stress concentrations are localized in the lateral parts of the drift and in the support nodes of the frame support. As the working face approaches, there is a significant increase in vertical and equivalent stresses, processes of rock stratification in the roof and floor intensify, and maximum stresses in the frame support elements reach 300 MPa. After the longwall has passed, the formation of an asymmetric stress field and partial unloading of the support elements due to the operation of the safety system are observed, accompanied by a reduction in stresses to 200–220 MPa.

The originality. For the first time, patterns of change in the stress-strain state of the rock mass surrounding a development drift equipped with a resource-saving support system have been established at various stages of its operation, which has made it possible to determine the nature of stress redistribution and the development of plastic deformation zones depending on the conditions of drift support.

Practical implications. The results of these studies provide a basis for determining optimal parameters for a resource-efficient support system for development drifts at the Samarska Mine and can be applied in the design and construction of drifts under complex mining and geological conditions.

Keywords: *mining, rock massif, roadway support, stress-strain state, preparatory mining, resource-saving support.*

дата першого надходження статті до видання	02.04.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	04.05.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.06.2026