

© В.Г. Яковенко¹, В.І. Бондаренко², М.В. Петльований²,
І.А. Ковалевська², Д.В. Драгун²

¹ПрАТ «Шахтоуправління «Покровське», Покровськ, Україна

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИВАЛОУТВОРЕННЯ ПРИКОНТУРНИХ ПОРІД ВИЇМКОВИХ ВИРОБОК ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ СТІЙКОСТІ

© V. Yakovenko¹, V. Bondarenko², M. Petlovanyi²,
I. Kovalevska², D. Drahun²

¹PJSC “Mine Management “Pokrovske”

²Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ANALYSIS OF INRUSH FORMATION SPECIFICS OF BORDER ROCKS IN THE EXTRACTION WORKINGS AND WAYS TO INCREASE THEIR STABILITY

Мета. Виявлення та вивчення умов і особливостей вивалоутворення приконтурних порід при проведенні виїмкових виробок, а також висунення перспективних пропозицій щодо шляхів підвищення їх стійкості.

Методика. Для досягнення поставленої мети виконано збір, аналіз та систематизацію фактичних шахтних даних щодо вивалів порід при проведенні виїмкових виробок і виконанні очисних робіт, умов їх виникнення на ПрАТ «ШУ «Покровське». Для визначення гранулометричного складу порід вивалів відібрано зразки алевроліту та пісковіку після фактичних вивалів покрівлі й досліджено їх кусковатість із застосуванням фотозйомки та обробка зображень у спеціальному програмному продукті.

Результати. Визначено, що найбільша інтенсивність вивалів порід спостерігалась у зонах впливу геологічних порушень, причому найчастіші та найбільші за геометричними розмірами вивали характерні при наявності у покрівлі алевролітів. Досліджено гранулометричні характеристики алевроліту та пісковіку у результаті обвалення покрівлі під час проведення гірничих виробок та встановлено, що за характером їх фракційного складу й кусковатості найбільш ефективним способом зміцнення є ін'єкційне нагнітання у тріщинуватий масив поліуретанових смол. Сформована концепція попереднього ін'єкційного закріплення нестійкого приконтурного масиву на стадії проведення виїмкової виробки для подальшого збереження його цілісності при виконанні очисних робіт.

Наукова новизна полягає у виявленні особливостей та умов вивалоутворення приконтурних порід виїмкових штреків при проведенні виробок у складних геотехнічних умовах, що дало змогу обґрунтувати ін'єкційне закріплення поліуретановими смолами як перспективний захід підвищення стійкості виїмкової виробки.

Практична значимість. Вивчення умов та особливостей вивалоутворення нестійких приконтурних порід виїмкової виробки є основою обґрунтування технології ін'єкційного зміцнення, при здійсненні якої досягається цілісність масиву, ліквідуються технологічні простоти та досягається безпека ведення гірничих робіт.

Ключові слова: вивали, тріщинуватість, нестійкі породи, прохідницькі роботи, очисні роботи, ін'єкційне закріплення.

Вступ. Кам'яне вугілля, незважаючи на останні світові тренди декарбонізації є важливим енергетичним ресурсом багатьох розвинутих країн та країн, що розвиваються. Сьогодні швидкість впровадження «зелених» технологій у світі не встигає за світовою економікою, якій сьогодні потрібні енергоносії з викопного палива у значних обсягах [1–3]. В Україні з кам'яного вугілля генерується майже 30% електричної енергії, а його запаси кам'яного вугілля розробляються підземним способом та сконцентровані переважно у тонких вугільних пластах [4, 5]. Щорічний рівень видобутку забезпечується своєчасною підготовкою нових запасів і гармонійним функціонування основних технологічних процесів вугільних шахт.

Для успішного функціонування основних технологічних процесів вугільних шахт вагоме значення має збереження гірничих виробок в експлуатаційному стані протягом їх терміну існування [6, 7]. Особливо це важливо для забезпечення ефективної вентиляції та безпеки ведення гірничих робіт. Основними формами порушення масиву гірських порід навколо гірничих виробок є обвалювання порід покрівлі та здимання порід підшви [8–10]. Обвалювання порід покрівлі є більш негативною формою, оскільки призводить до небезпеки травмування підземних гірників та зупинки видобутку вугілля в очисних та прохідницьких вибоях (на ліквідацію вивалу витрачається 50 – 60% нетехнологічних простоїв лав).

Зі збільшенням глибини розробки закономірно підвищуються прояви гірського тиску і відбуваються складні процеси трансформації геологічного середовища в складних умовах якого здійснюється ведення гірничих робіт [11–13]. Це призводить до ускладнення геомеханічної ситуації, збільшення собівартості видобутку вугілля та загрози життю підземних гірничих робітників.

Для покращення геомеханічної ситуації навколо очисних та підготовчих виробок у складних геотехнічних умовах застосовуються різні методи. Так, сприятливі геомеханічні умови досягаються при застосуванні закладання виробленого простору, де сформований закладний масив сприяє плавному осіданню шарів гірських порід без порушення їх суцільності, знижуючи величини критичних напружень у зонах впливу очисних робіт [14–17]. Для зміцнення приконтурного масиву гірських порід досить поширеним є хімічне анкерування та використання канатних анкерів глибокого закладення [18–21]. При наявності підвищеної тріщинуватості гірських порід відомими є заходи ін'єкційного зміцнення масиву: цементації, силікатизації та смолізації [22–24].

Досвід ведення гірничих робіт в умовах потужного вугледобувного підприємства України ПрАТ «ШУ «Покровське» показує, що незважаючи на застосування ефективних комбінованих систем кріплення, хімічного анкерування та випереджального штангового кріплення при глибинах розробки понад 1000 м не вдається у повному обсязі попередити та уникнути вивалів порід при веденні прохідницьких та очисних робіт. Геомеханічна ситуація погіршується наявністю інтенсивної тріщинуватості порід, яка має місце у зоні впливу численних дрібно-амплітудних геологічних порушень, значно поширених за площею шахтного поля. Низька стійкість масиву сприяє вивалоутворенню порід з покрівлі вугільного пласта при прохідницьких і очисних роботах (сполучення «лава – виїмковий

штрек), що створює загрозу безпеці гірників та виникненню технологічних простоїв у прохідницьких та очисних вибоях.

Таким чином, потребує виконання аналізу особливостей і причин вивалоутворення приконтурних порід та формування ефективного напрямку підвищення їх стійкості для стійкого та ритмічного функціонування вугледобувного підприємства ПрАТ «ШУ «Покровське» в умовах сьогодення.

Основна частина. Аналіз гірничо-геологічних умов шахтного поля, яке відпрацьовується ПрАТ «ШУ «Покровське», показує, що має місце значне поширення геологічних порушень, представлених двома типами – диз'юнктивні та плікативні. В межах шахтного поля пласт d_4 має просту та складну будови. У першому тектонічному блоці пласт переважно простої будови, у висячому крилі Котлінського насуву – складної будови. Протягом тривалого терміну відпрацювання запасів у процесі ведення гірничих робіт виявлено значну кількість дрібноамплітудних порушень загалом скидного характеру, з амплітудами не більше 1,0 м. У виїмковому стовпі кількість геологічних порушень може сягати 30% його площі [25]. Особливості та будова геологічних порушень вугільного пласта частково визначаються попередньою геологічною розвідкою ділянки виїмкового стовпа майбутньої лави, але детально уточнюються у процесі проведення виїмкових виробок. На рис. 1 наведено викопіювання з плану гірничих робіт по пласту d_4 , де відпрацьовувалась 5 південна лави блока 10.



Рис. 1. Викопіювання з плану гірничих робіт по пласту d_4 (5 південна лави блока 10)

З рис. 1 за довжиною виїмкового стовпа можна спостерігати наявність густої мережі дрібноамплітудних геологічних порушень ($H = 0,15\text{--}0,7$ м), які пересікались при веденні очисних і підготовчих робіт та значно ускладнили інтенсивність і якість ведення гірничих робіт. Це обумовлено наступними особливостями:

- аномально високим напружено-деформованим станом масиву гірських порід навколо геологічного порушення, наслідком яких є обвалення порід при веденні як прохідницьких, так і очисних робіт у майбутньому;
- підвищення рівня зольності видобутого вугілля при переході геологічних порушень, яке у 5-й південній лаві блока 10 (рис. 1) сягнуло понад 48%.

Як показує досвід ведення гірничих робіт на ПрАТ «ШУ «Покровське», при відпрацюванні запасів вугілля в очисних, підготовчих і капітальних виробках мають місце вивали порід покрівлі висотою від 0,2–0,3 до 4–6 м, причому, в зонах вивалів породи дуже ослаблені й представлені слабкими алевролітами, іноді пісковиками. Вивали у прохідницьких та очисних вибоях, в основному, приурочені до зон впливу дрібноамплітудних геологічних порушень, під дією яких формується високий ступінь тріщинуватості масиву гірських порід з ослабленими

міцнісними властивостями, що, в цілому, обумовлює його низьку стійкість. Проте, як відмічається геологічною службою шахти, вивали також траплялись через наявність у породах покрівлі численних площин притирання і слюдисто-вуглисто-матеріалу по нашаруванню. Також зони розмивів порід у більшості випадків вміщують вуглисті матеріал, по якому трапляється відшарування покрівлі на висоту до 0,5–1,0 м.

У виробках було зафіксовано численні випадки вивалів порід покрівлі. Довжина вивалів у гірничих виробках коливається від 3–5 до 30–60 м, при середньому значенні 10–15 м. Об'єм вивалів знаходився у діапазоні від 9 до 320 м³, при середньому значенні 70–100 м³. Природа утворення вивалів порід пов'язана, перш за все, з їх ослабленими зонами, що виникають внаслідок розущільнення, перем'ястості та інтенсифікації тріщинуватості у зоні впливу геологічного порушення й підвищення напружень при розкритті послаблених порід прохідницьким вибоєм. Фіксація та спостереження за цими ослабленими зонами дозволяє встановити контури розвитку тріщинуватих і механічно слабких порід у покрівлі вугільного пласта, що має важливе значення для прогнозування стійкості гірничих виробок і розробки заходів щодо її підвищення протягом всього терміну існування.

При проведенні виїмкових виробок для підготовки запасів виїмкового стовпа здійснюється геологічна дорозвідка вуглепородного масиву пласта d_4 , внаслідок чого виявляються дрібноамплітудні геологічні порушення і фіксуються випадки вивалів порід покрівлі по контуру виїмкових виробок. Для попередження вивалоутворення й травмування робітників прохідницької бригади на шахті здійснюються наступні заходи. При виявленні непрогнозованого гірничо-геологічного порушення проведення виробки зупиняється. При підвищеній тріщинуватості порід покрівлі, для недопущення обвалення порід, здійснюється установка випереджального штангового кріплення по периметру виїмкової виробки. Крок основного кріплення в зоні підвищеної тріщинуватості порід непрогнозованого гірничо-геологічного порушення і після нього становить 5 м і повинен бути не більше 0,67 м. При підвищеній тріщинуватості порід покрівлі, для недопущення обвалення порід, слід зробити установку випереджального штангового кріплення по периметру виробки.

Аналіз останнього досвіду проведення виїмкових виробок у блоках № 10 та № 11 в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське» показує, що мали місце часті вивали за їх довжиною протягом терміну всього проведення. У пустотах вивалів здійснюється викладка клітей з негорючих матеріалів із забутуванням боків виїмкової виробки. Для аналізу особливостей вивалоутворення порід ПрАТ «ШУ «Покровське» були проаналізовані фактичні геологічні розрізи проведення 4 виїмкових виробок та гірничо-геологічних умов відпрацювання цих 4-х лав ПрАТ «ШУ «Покровське», де зафіксовані випадки вивалів:

- 1-й півн. конв. штрек ц.п. блока № 11 та гірничо-геологічні умови відпрацювання 1-ї північної лави ц.п. блока № 11;
- 1-й півд. конв. штрек ц.п. блока № 11 та прогноз гірничо-геологічних умов відпрацювання 1-ї південної лави лави ц.п. блока № 11;

– 9-й півн. конв. штрек блока № 10 та гірничо-геологічні умови відпрацювання 9-ї північної лави блока № 10;

– конвеєрний штрек 2-ї лави півд. пан. блока № 10 та гірничо-геологічні умови відпрацювання 2-ї лави півд. пан. блола № 10.

Найбільш типові форми вивалів порід, що фіксувались при проведенні вищезазначених виробок виїмкових штреків, наведено на рис. 2.

Для виявлення глибоких механізмів та закономірностей вивалоутворення при проведенні виробок необхідно проводити комплекс лабораторних та багатостатистичних шахтних спостережень за станом і властивостями порід, геометрією вивалів, швидкістю посування й організацією робіт прохідницьких вибоїв. Проте, збір та систематизація шахтних даних щодо вивалів порід (табл. 1) при проведенні виїмкових виробок дозволяє сформулювати основні тенденції та особливості їх проявів. Аналіз даних табл. 1 дозволив сформулювати основні особливості вивалоутворення:

– вивалоутворення порід приконтурного масиву спостерігається, незважаючи на спеціальні заходи, що застосовуються для їх попередження (буріння штангового кріплення), що, вірогідно, свідчить про надто знеміцнений стан порід при їх розкритті прохідницьким вибоєм;

– частіше спостерігаються потужні вивали (висотою до 5 м), коли у покрівлі порід залягають алевроліти, адже їх міцність та природна тріщинуватість є гіршою за пісковик, і присутня властивість шаруватості у структурі алевроліту. Форма вивалів, зазвичай, є трикутною або кососпрямованою у бортах виробки;

– рідше відбувається вивалоутворення (висотою 0,3–1,0 м), коли покрівля представлена пісковиком, який є міцнішим в 1,7–2,0 рази та з меншою інтенсивністю природної тріщинуватості;

– відмічається вплив на вивалоутворення збільшення потужності вугільного пласта у прохідницькому вибої. При максимальній потужності пласта 3,1 м зафіксовано найбільший за геометричними розмірами вивал, хоча відсутнє у зоні вивалу геологічне порушення та розмиви порід покрівлі вугільними прошарками;

– при заляганні в покрівлі алевроліту міцністю 40–50 МПа у зоні впливу геологічних порушень та їх розмивів вугільними прошарками за довжиною виїмкової виробки спостерігаються протяжні вивали з висотою обвалень 0,5–5,0 м. Так, при проведенні 1-го північного конвеєрного штреку центральної панелі блока № 11 утворилась зона вивалів порід у пікетах ПК 38–44, протяжність якої сягнула 60 м;

– вагомим фактором на розміри вивалоутворення є вплив кута падіння зміщувача геологічного порушення: при збільшенні кута падіння зміщувача, зміщення гірських порід зменшуються, адже зменшується протяжність зони послаблення порід. Наявний масив шахтних даних щодо вивалів є недостатньо варіативним щодо аналізу впливу кута зміщувача;

– вплив глибини розробки на вивалоутворення не прослідковується, оскільки у масиві наданих шахтних даних вивали відбулись на приблизно однаковій глибині – 950–980 м.

Таблиця 1
Систематизація умов проявів вивалоутворень порід в аналізованих виїмкових виробках

Виробка	Місце вивалу	Орієнтація, розмір вивалу	Форма вивалу	Тип порід	Міцність, МПа	Тріщинуватість	Глибина розробки, м	Потужність пласта, м	Амплітуда зміщувача, м	Наявність розмивів у покрівлі
1 півн. конв. штр. ц.п. бл. № 11	ПК 31-32	Борт виробки до 1,4 м	Бокова купольна	Алевроліт	40	Закриті тріщини різного орієнтування під кутом 70 – 80°, 8 – 15 тр. на 1 п.м.	980	1,76 – 2,3	–	Розмив, вугільний прошарок
	ПК 38-40	Покрівля, правий і лівий борти 3,0×2,0×1,6 м	Трикутна	Алевроліт з прошарками пісковика	40		980	1,3 – 2,5	$H = 0,6$ м $\alpha < 20^\circ$	Розмив, вугільний прошарок
	ПК 42	Покрівля, правий і лівий борти 3,0×2,5×2,0 м	Трикутна	Алевроліт з прошарками пісковика	40		980	1,3 – 2,5	–	–
	ПК 43	Борт виробки до 2,5 м	Косо-спрямована, купольна	Алевроліт	40		980	1,6 – 3,1	–	Розмив, вугільний прошарок
	ПК 43-44	Покрівля, правий і лівий борти 5,0×3,0×3,0 м	Трикутна	Алевроліт з прошарками пісковика	40		980	1,76 – 3,1	–	–
1 півд. конв. штр. ц.п. бл. № 11	ПК 5	Покрівля, правий і лівий борти 0,7×2,0×1,2 м	Трикутна	Алевроліт	50	Одиничні відкриті тріщини під кутом 70 – 90°	950	1,85 – 2,15	$H = 1,0$ м $\alpha < 20^\circ$	Розмив, вугільні прошарки
	ПК 5	Борт виробки 1,4×2,0 м	Бокова сводчаста	Алевроліт	50		950	2,0	–	Розмив, вугільні прошарки
9 півд. конв. штр. ц.п. бл. № 11	ПК 9-10	Покрівля виробки 1,0 м	Пряма, купольна	Пісковик	70	Закриті тріщини різного орієнтування під кутом 70 – 80°, 8 – 15 тр. на 1 п.м.	960	0,8 – 0,88	$H = 0,8 – 0,9$ м $\alpha < 75-85^\circ$	–
конв. штр. 2 лави півд. пан. бл. № 10	ПК 214	Покрівля виробки 1,0 м	Пряма, купольна	Вугілля Алевроліт	15 40		752	Пусті породи	$H = 2,5$ м $\alpha < 50^\circ$	–

Для прогнозування вивалів та розробки заходів щодо їх попередження і зміцнення порід важливим аспектом є прогнозування геометричних зон (ширини й довжини інтенсивної тріщинуватості та механічного послаблення порід під впливом геологічного порушення). На сьогодні відома низка нормативних документів в основному, складених ще у радянський час, де на підставі досвіду кількох вугледобувних басейнів встановлювались аналітичні вирази, які мають кореляційний зв'язок лише за декількома основними факторами – амплітудою

зміщувача та кутом падіння зміщувача, а інші фактори для конкретних гірничо-геологічних умов визначаються поправочними коефіцієнтами, методика яких детально не представляється.

Більш сучасний нормативний документ України [26] надає формулу зони підвищеної тріщинуватості при впливі геологічного порушення таким чином:

$$B = \frac{10N}{\sin V}, \text{ м}, \quad (1)$$

де N – амплітуда зміщувача, м; V – двогранний кут між площиною зміщувача та напластуванням.

Однак, зазвичай дані з практики вугільних шахт показують, що розміри зон, які встановлюються на підприємстві для малоамплітудних порушень, у більшості випадків менші за розрахункові, а для середньоамплітудних – більше розрахункових. Це вірогідно пояснюється тим, що у практиці визначення меж небезпечних зон біля розривних порушень здійснюється геолого-маркшейдерською службою, з накопиченого досвіду, методом аналогій з раніше виявленими порушеннями. На наш погляд, відомі з нормативних документів аналітичні вирази з визначення геометричних розмірів впливу на масив гірських порід геологічних порушень є узагальненнями, і не враховують вплив комплексу таких факторів як глибина розробки, міцність порід, інтенсивність тріщинуватості, швидкість посування прохідницького вибою, площа відслонення порід, відстань до кріплення та час її встановлення. Однозначного варіанту визначення ширини впливу зони геологічних порушень на сьогодні немає і єдиним ефективним інструментом є статистичні дані фактичних вивалів порід, тобто найбільш цінним є здобутий практичний досвід на конкретній шахті щодо визначення величини впливу геологічного порушення вглиб масиву і прогнозування його нестійких зон протягом виконання виїмковою виробкою технологічної функції.

Слід зауважити, що, незважаючи на виникнення сприятливих факторів до вивалоутворення при підготовці запасів в умовах ШУ «Покровське», таких як наявність дрібноамплітудних геологічних порушень і зон розмивів порід покриті вугільними прошарками, факти вивалів порід не завжди відбуваються, що прослідковується на фактичних продольних геологічних розрізах по виїмкових виробках. Зазвичай вивали трапляються, коли розбиті тріщинами породи обвалюються у виїмкову виробку під дією власної ваги і ця сила більше, ніж сила зчеплення зі стійким шаром порід [27]. Проте, якщо зазначена сила менше, порушення приконтурного масиву може не відбутись на стадії проведення виїмкової виробки, але інтенсифікація вивалів можлива у випадку стрімкого зростання напружень у масиві, що може бути пов'язано, наприклад, із зоною опорного тиску при веденні вже в подальшому очисних робіт. Як відомо, у зоні опорного тиску попереду лави величина напружень зростає у 2–5 разів залежно від потужності пласта, міцності порід та глибини розробки.

Отже, можна констатувати, що потенціал вивалів на етапі проведення виїмкової виробки повністю не розкрито. У такому випадку з'являється небезпека вивалів порід у подальшому призначенні виїмкової виробки – обслуговувати

очисні роботи. У майбутньому, при відпрацюванні запасів вугілля зберігається виникнення небезпеки вивалів у масиві гірських порід на сполученні «лава – виїмковий штрек».

Для підтвердження цих припущень було порівняно факти вивалів в умовах певних визначених ділянок виїмкових виробок при їх проведенні та при подальшому веденні гірничих робіт (табл. 2).

Таблиця 2

Фіксація випадків вивалоутворення приконтурних порід суто під впливом очисних робіт

Досліджувана виїмкова виробка	Ділянка, що вивчалась	Особливі умови масиву	Фіксація вивалу на етапі експлуатації виробки	
			Проведення	Очисні роботи
Конв. штрек 4 лави півд. панелі бл. 10	ПК №75	Геологічне порушення $H = 0,4 \text{ м}, > 35^\circ$	–	Сполучення «лава – штрек» $h_{обв} = 0,4 \text{ м}$
9 північний конв. штрек бл. 10	ПК №161	Незначний розмив пласта	–	Сполучення «лава – штрек» $h_{обв} = 1,0 \text{ м}$
9 півд. «біс» конв. штрек бл. 10	ПК №161	Геологічне порушення $H = 0,4 \text{ м}, > 35^\circ$	–	Сполучення «лава – штрек» $h_{обв} = 0,5 \text{ м}$

Аналіз даних табл. 2 показує, що при проведенні виїмкових виробок вивали можуть не спостерігатись, незважаючи на вплив негативних факторів – геологічних порушень й розмивів. Якщо при формуванні відслонення масиву прохідницьким вибоєм ступінь порушеності масиву не набула критичних значень до утворення вивалів, то їх інтенсифікація ймовірно відбувається далі у часі, вже під впливом очисних робіт при підвищених напруженнях у масиві, що спостерігається на сполученнях «лава – штрек».

Таким чином, розкриті прохідницькими вибоями зони геологічних порушень з високим ступенем ймовірності вплинуть на можливість вивалів порід при функціонуванні майбутньої лави, особливо на сполученні «лава – штрек», що загрожує безпеці робітників очисного вибою та ритмічності його роботи. Звертаючи увагу на факти вивалів порід як при проведенні виробки, так і при веденні очисних робіт, очевидно, що її приконтурний масив потребує зміцнення протягом всього терміну експлуатації.

В умовах ПрАТ «ШУ «Покровське» для кріплення сполучення «лава – штрек» та управління покрівлею при відпрацюванні виїмкових ділянок застосовується випереджальне зміцнення покрівлі пласта зі сторони лави. Це викликано тим, що при виконанні кінцевих операцій і зніманні стійок рамного кріплення при відслоненні тріщинуватих порід покрівлі існує небезпека їх вивалювання і травмування гірничих робітників.

Для попередження цих негативних геомеханічних явищ сьогодні на шахті застосовується випереджальне встановлення штангового кріплення. Для

запобігання висипу та обвалення нестійких порід покрівлі здійснюється установка випереджального штангового кріплення. Випередження від вікна лави складає не менше 20 м, довжина штангового кріплення – 4,0 м. Шпури довжиною 3,8 м та діаметром 30 мм на відстані 100 мм бурять від вугільного пласта у бік масиву, з невеликим підйомом 10° та розворотом від осі виробки 60° . Відстань між шпурами 0,65 м (1 шт/раму). Очевидно, що в існуючих умовах, випереджальне штангове кріплення не завжди проявляє ефективність, про що свідчить наявність явищ вивалів порід на сполученнях «лава – штрек». Якщо породи є тріщинуватими або знеміцненими, створюються небезпечні умови їх вивалоутворення. Природна тріщинуватість порід, що підсилена впливом геологічного порушення, призводить до розбиття масиву на блоки й утворення кусків певних розмірів. Так, наприклад, при інтенсивності тріщинуватості 5–10 шт/м масив порід може бути розділений на куски розміром 0,1–0,2 м, а крок встановлення штангового кріплення складає 0,65 м, що для таких умов ймовірно є недостатнім й не протидіє вивалам.

Отже, зазначені обставини спонукали до дослідження гранулометричного складу порід при вивалах. Для дослідження гранулометричних характеристик породних фракцій використані породи вивалів покрівлі виробок, що передані ПрАТ «ШУ «Покровське»:

- алевроліт – вивал з покрівлі при проведенні 1-го південного конвеєрного штреку центральної панелі блока 11, район ПК 5–8;
- пісковик – вивал з покрівлі при проведенні 9-го північного конвеєрного штреку блока 10, район ПК 7 + 5 – 10 + 5.

Для визначення гранулометричного складу порід вивалів використовувалась фотозйомка розсипаних фракцій порід алевроліту та пісковіку з масштабною лінійкою, а результати оброблялись програмному забезпечення в області масштабування різних зображень WipFrag. Результати гранулометричних характеристик порід наведена на рис. 3.

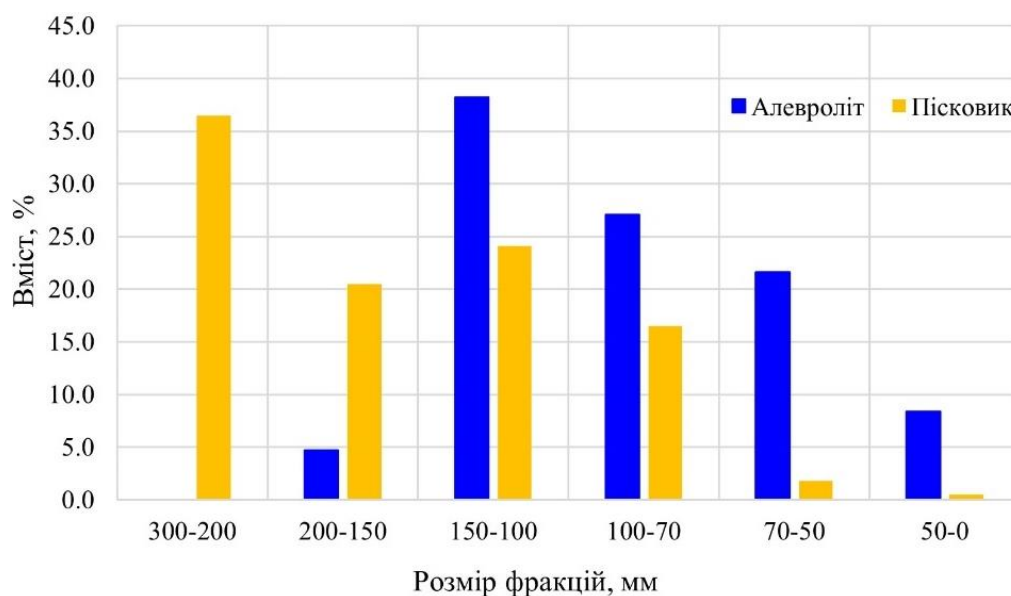


Рис. 3. Гранулометрична характеристика порід вивалів, що утворились при проведенні виїмкових виробок

Результатами досліджень встановлено, що фракційний склад вивалу покрівлі 1-го конвеєрного штреку південної лави блоку 11, що представлений алевролітом, знаходиться в межах 0...200 мм, при цьому, основні фракції порід (87%) знаходяться в межах -150...+50 мм. Фракційний склад вивалу покрівлі 9-го штреку північної лави блоку 10, що представлений пісковиком знаходиться в межах 0...300 мм, а основні фракції порід (97%) знаходяться в межах -300...+70 мм. Різниця між фракційним складом вивалу пояснюється структурою та морфологією порід, міцнісними характеристиками і наявною природною тріщинуватістю.

Аналіз кусковатості порід вивалів вказує на те, що для ефективного сполучення «лава – штрек» використання сталеполімерних анкерів у комбінації зі штанговим кріпленням є недостатньо ефективним, які запобігають вивалам крупних блоків масиву.

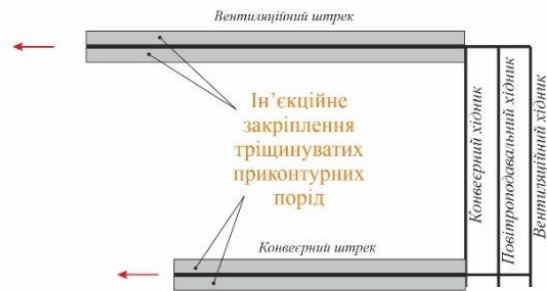
В умовах дрібнокускового типу вивалів ефективним заходом зміцнення приконтурного масиву може з успіхом бути застосоване ін'єкційне закріплення шляхом нагнітання полімерних смол у тріщанні пустоти з подальшим твердінням й омонолічуванням конгломерату.

Згідно світової практики при веденні гірничих робіт або проведенні тунелів в умовах тріщинуватих порід у складних гірничо-геологічних умовах ефективно себе проявило використання полуретанових смол, завдяки досягненню високих міцнісних властивостей масиву, швидкого твердіння та сильних адгезійних властивостей [28, 29]. Основною ідеєю ін'єкційного закріплення полімерними смолами повинно стати скріплення та зміцнення тріщинуватого масиву порід покрівлі в єдину стійку армопородну піддатливу конструкцію, яка витримує достатні відселонення у часі без втрати суцільності, при цьому в'язкопластично деформуючись. Виходячи з цього, для попередження вивалів порід, підвищення стійкості й цілісності виїмкової виробки протягом всього терміну експлуатації при її проведенні доцільно застосувати випереджальне ін'єкційне закріплення порід полуретановими смолами, що дозволить у майбутньому досягти безаварійної експлуатації сполучень «лава – штрек» при виконанні очисних робіт (рис. 4).

Необхідність застосування спеціальних заходів зі зміцнення масиву гірських порід викликана випадками порушення його цілісності у процесі ведення очисних та підготовчих робіт при використанні прийнятих сучасних і прогресивних видів кріплення – комбінації застосування рамного кріплення зі встановленням сталеполімерних та канатних анкерів глибокого закладення.

Порушення цілісності масиву гірських порід призводить до небезпеки виникнення ситуацій травматизму підземних гірничих робітників та створення аварійних ситуацій, що веде до зупинки ведення очисних і прохідницьких робіт, й, відповідно, затримки у виконанні запланованих бізнес-планом показників. Подальші дослідження будуть спрямовані на наукове обґрунтування технологічних параметрів технології нагнітання поліуретанових смол у тріщинуваті породи приконтурного масиву на основі лабораторних та натурних шахтних досліджень.

А. Прохідницькі роботи



Б. Очисні роботи

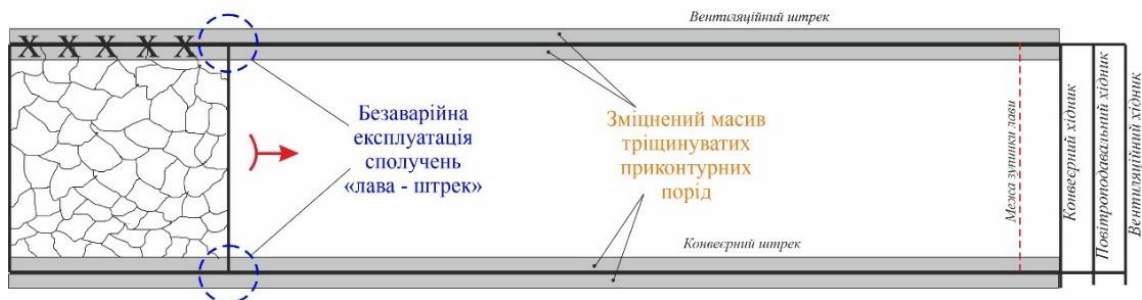


Рис. 4. Ілюстрація концепції випереджального ін'єкційного закріплення тріщинуватих порід

Висновки. Основні результати, отримані в процесі виконання досліджень:

1. Визначено, що вивали порід у прохідницьких та очисних вибоях в основному приурочені до зон впливу дрібноамплітудних геологічних порушень, під впливом яких формується високий ступінь тріщинуватості масиву гірських порід з ослабленими міцнісними властивостями, що обумовлює в цілому низьку його стійкість.

2. Визначено, що розкриті прохідницькими вибоями зони геологічних порушень з високим ступенем ймовірності вплинуть на можливість вивалів порід при функціонуванні майбутньої лави, особливо на поєднанні «лава – штрек», що загрожує безпеці робітників очисного вибою та ритмічності його роботи. Виявлені факти вивалоутворення порід як при проведенні виробки, так і під час ведення очисних робіт вказують на те, що приконтурний масив потребує заходів ефективного зміцнення протягом всього терміну експлуатації.

3. Встановлено, що фракційний склад порід вивалу покрівлі, який представлений алевролітом, знаходиться в межах 0...200 мм, а фракційний склад вивалу порід покрівлі, який представлений пісковиком, знаходиться в межах 0...300 мм. Аналіз кусковатості порід вивалів та умов застосування способів зміцнення порід покрівлі вказують на доцільність в умовах ПрАТ ШУ «Покровське» зміцнення порід покрівлі ін'єкційним нагнітанням поліуретанових смол.

4. Запропоновано для попередження вивалів порід покрівлі пласта протягом всього терміну експлуатації виїмкової виробки здійснювати на стадії її проведення здійснювати ін'єкційне закріплення приконтурних тріщинуватих порід,

що дозволить покращити ефективність та безпеку як прохідницьких робіт, так й уникнути вивалоутворення при веденні очисних робіт на сполученнях «лава-штрек». Це досягається шляхом нагнітанням у сильно тріщинуватий масив високоефективних поліуретанових смол для консолідації порушених порід, зміни фізичного стану приконтурного масиву та переведення його з режиму крихкого до в'язко-пластичного руйнування.

Вдячність. Дослідження виконано у рамках проєкту (№ держреєстрації 0123U101808), що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Перелік посилань

1. Wang, Q., Song, X., & Liu, Y. (2020). China's coal consumption in a globalizing world: Insights from multi-regional input-output and structural decomposition analysis. *Science of the Total Environment*, 711, 134790. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134790>
2. Spencer, D. (2019). BP statistical review of world energy statistical review of world. *World Energy*, 68, 1–69.
3. Bondarenko, V., Salieiev, I., Kovalevska, I., Chervatiuk, V., Malashkevych, D., Shyshov, M., & Chernyak, V. (2023). A new concept for complex mining of mineral raw material resources from DTEK coal mines based on sustainable development and ESG strategy. *Mining of Mineral Deposits*, 17(1), 1–16. <https://doi.org/10.33271/mining17.01.001>
4. Griadushchiy, Y., Korz, P., Koval, O., Bondarenko, V., & Dychkovskiy, R. (2007). Advanced experience and direction of mining of thin coal seams in ukraine. technical, technological and economical aspects of thin-seams coal mining. *International Mining Forum*, 2–7. <https://doi.org/10.1201/noe0415436700.ch1>
5. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Fomychova, L. (2020). Research into optimization model for balancing the technological flows at mining enterprises. *E3S Web of Conferences*, 201, 01030. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101030>
6. Lu, G., & Ni, P. (2023). Support control design of mining roadway under goaf of close-distance coal seam. *Sustainability*, 15(6), 5420. <https://doi.org/10.3390/su15065420>
7. Bondarenko, V., Symanovych, H., Kicki, J., Barabash, M., & Salieiev, I. (2019). The influence of rigidity of the collapsed roof rocks in the mined-out space on the state of the preparatory mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 13(2), 27–33. <https://doi.org/10.33271/mining13.02.027>
8. Malkowski, P., & Ostrowski, L. (2019). Convergence monitoring as a basis for numerical analysis of changes of rock-mass quality and Hoek-Brown failure criterion parameters due to longwall excavation. *Archives of Mining Sciences*, 64(1), 93–118. <https://doi.org/10.24425/ams.2019.126274>
9. Sakhno, I., Liashok, Ia., Sakhno, S., & Isaienkov, O. (2022). Method for controlling the floor heave in mine roadways of underground coal mines. *Mining of Mineral Deposits*, 16(4), 1–10. <https://doi.org/10.33271/mining16.04.001>
10. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, H., Barabash, M., & Snihur, V. (2018). Assessment of parting rock weak zones under the joint and downward mining of coal seams. *E3S Web of Conferences*, 66, 03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186603001>
11. Xie, J., Xu, J., & Wang, F. (2018). Mining-induced stress distribution of the working face in a kilometer-deep coal mine – A case study in Tangshan coal mine. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(5), 2060-2070. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aabc6c>
12. Petlovanyi, M., Ruskykh, V., Zubko, S., & Medianykh, V. (2020). Dependence of the mined ores quality on the geological structure and properties of the hanging wall rocks. *E3S Web of Conferences*, 201, 01027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101027>
13. Zhang, J., Yang, W., Lin, B., Zhang, J., & Wang, M. (2019). Strata movement and stress evolution when mining two overlapping panels affected by hard stratum. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(5), 691–699. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.07.001>

14. Ma, C., Guo, X., Zhang, L., Lu, A., Mao, X., & Li, B. (2021). Theoretical analysis on stress and deformation of overburden key stratum in solid filling coal mining based on the multilayer winkler foundation beam model. *Geofluids*, 2021, 6693888. <https://doi.org/10.1155/2021/6693888>
15. Petlovanyi, M., Malashkevych, D., Sai, K., Bulat, I., & Popovych, V. (2021). Granulometric composition research of mine rocks as a material for backfilling the mined-out area in coal mines. *Mining of Mineral Deposits*, 15(4), 122–129. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.122>
16. Li, M., Zhang, J., Wu, Z., & Sun, K. (2019). Calculation and monitoring analysis of stress distribution in a coal mine gob filled with waste rock backfill materials. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(14), 418. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4584-9>
17. Malashkevych, D., Petlovanyi, M., Sai, K., & Khalymendyk, O. (2022). Influence of rock leaving in the longwall face goaf on the extraction drift stability. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 17(21), 1924–1934.
18. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Cawood, F., Husiev, O., Snihur, V., & Jimu, D. (2021). Development and testing of an algorithm for calculating the load on support of mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 15(1), 1–10. <https://doi.org/10.33271/mining15.01.001>
19. Masny, W., Nita, L., & Ficek, J. (2023). Case study of rock bolting in a deep coal mine in Poland. *Archives of Mining Sciences*, 67(1), 79–94. <https://doi.org/10.24425/ams.2022.140703>
20. Krykovskiy, O., Krykovska, V., & Skipochka, S. (2021). Interaction of rock-bolt supports while weak rock reinforcing by means of injection rock bolts. *Mining of Mineral Deposits*, 15(4), 8–14. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.008>
21. Pivnyak, G., Bondarenko, V., Kovalevs'ka, I., & Illiashov, M. (2013). *Mining of mineral deposits*. London, United Kingdom: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16354>
22. van Eldert, J., Funehag, J., & Schunnesson, H. (2021). Drill monitoring for rock mass grouting: Case study at the Stockholm Bypass. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 501–511. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02279-w>
23. Xiang, Z., Zhang, N., Zhao, Y., Pan, D., Feng, X., & Xie, Z. (2022). Experiment on the silica sol imbibition of low-permeability rock mass: With silica sol particle sizes and rock permeability considered. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(5), 1009–1019. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.07.003>
24. Wang, J., Xu, J., Nie, Z., Liu, L., Qin, M., & Ou, R. (2021). Creep fracture characteristics of fractured rock mass strengthened with toughened epoxy resin. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1582745. <https://doi.org/10.1155/2021/1582745>
25. Баранов, В.А., & Янжула, А.С. (2016). Горно-геологические условия поля ШУ «Покровское». *Геотехнічна Механіка*, 129, 75–81.
26. КД 12.06.204-99. *Геологічні роботи на вугледобувних підприємствах України: Інструкція. Керівний документ Міністерства палива та енергетики України*. (1999). Київ, Україна: Міністерство палива та енергетики України.
27. Булат, А.Ф., Бунько, Т.В., Шейко, А.В., & Кокоулін, І.Є. (2018). Зниження ризику обвалень під час проведення гірничих виробок. *Геотехнічна Механіка*, 141, 134–142.
28. Hao, M., Li, X., Zhong, Y., Zhang, B., & Wang, F. (2021). Experimental study of polyurethane grout diffusion in a water-bearing fracture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003612](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003612)
29. Arndt, B., DeMarco, M., & Andrew, R. (2008). *Polyurethane resin (PUR) injection for rock mass stabilization (No. FHWA-CFL/TD-08-004)*. United States. Federal Highway Administration. Central Federal Lands Highway Division.

ABSTRACT

Purpose. The research aims to identify and study the conditions and peculiarities of border rock inrush formation when conducting extraction workings, as well as to make promising proposals to improve extraction working stability.

Methods. To achieve the purpose set, actual mine data on rock inrushes and conditions of their occurrence during extraction workings and stope operations at PJSC “Mine Management “Pokrovske” were collected, analyzed and systematized. To determine the granulometric inrush rock composition, siltstone and sandstone samples were taken after actual roof inrushes and their lumpiness was examined using photography and image processing in a special software product.

Findings. It has been determined that the greatest intensity of inrushes is observed in zones influenced by geological faults, and the most frequent and largest in terms of geometric dimensions inrushes are characteristic of the presence of siltstones in the roof. When studying the granulometric characteristics of siltstone and sandstone as a result of the roof failure during mine workings, it has been found that, due to the nature of their fractional composition and lumpiness, the most effective method of strengthening is the polyurethane resin injection into the fractured mass. The concept of proactive injection strengthening of an unstable border rock mass at the stage of conducting extraction working has been formed to further maintain its continuity during stope operations.

Originality. The novelty consists in revealing the peculiarities and conditions of border rock inrush formation in extraction drifts during mining operations in difficult geotechnical conditions, which made it possible to substantiate injection strengthening with polyurethane resins as a promising measure to improve the extraction working stability.

Practical implications. The study of the conditions and peculiarities of the inrush formation of unstable border rocks in the extraction working is the basis for substantiation of injection strengthening technology, which, when implemented, achieves the mass continuity, eliminates technological downtime and ensures the safety of mining operations.

Keywords: *inrushes, fracturing, unstable rocks, tunneling operations, stope operations, injection strengthening, polyurethane resins.*