

ЕВОЛЮЦІЯ СКРУЧУЮЧИХ І ЗГІНАЛЬНИХ МОМЕНТІВ СПЕЦПРОФІЛЮ РАМНИХ КРІПЛЕНЬ У ПРОЦЕСІ ЇХ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

¹Назимко В.В., ²Кусень О.Б., ¹Захарова Л.М.

¹Інститут фізики гірничих процесів НАН України, ²ЗАТ «Донецьксталь» - металургійний завод»

ЭВОЛЮЦИЯ КРУТЯЩИХ И ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ В СПЕЦПРОФИЛЕ РАМНЫХ КРЕПЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ.

¹Назимко В.В., ²Кусень А.Б., ¹Захарова Л.М.

¹Інститут фізики горних процесов НАН України, ²ЗАО «Донецксталь» - металлургический завод»

EVOLUTION OF TORSION AND BENDING MOMENTS IN A FRAME SUPPORT PROFILE DUE TO ITS PLASTIC DEFORMATION

¹Nazymko V.V., ²Kusen A.B., ¹Zakharova L.M.

¹Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine, ²CJSC Donetskstal - metallurgical plant

Анотація. Мета цього дослідження полягала в тому, щоб простежити еволюцію крутного моменту і згинальних моментів аркового піддатливого рамного кріплення при незворотних деформаціях профілю під час активних зрушень порід оточуючих виробку. Ця робота виконана відповідно до гранта 0117U002193 НАН України.

Попередні дослідження показали, що рамне кріплення широко використовується при підземній розробці, особливо при видобутку вугілля. Найбільш інтенсивні незворотні деформації рамного кріплення відбуваються в зоні опорного тиску в межах виїмкової виробки і при активних зсувах вміщуючих порід позаду виїмкової виробки. Найнебезпечніша деформація рамного кріплення - пластичне поздовжнє скручування профілю рами. Ця деформація супроводжується пластичним вигином як прямим, так і косим. Платформа FLAC3D використовувалася для моделювання незворотньої взаємодії рами і навколишнього масиву гірських порід. Основоположний закон Мора-Кулона був прийнятий для імітації поведінки гірського масиву, а модель Мізеса імітувала пластичну деформацію профілю рамного кріплення. Граничні умови представлені глибиною розробки 800 м. Початковий стан системи було розглянуто з використанням послідовних станів масиву гірських порід. Спочатку було встановлено геостатичний стан масиву гірських порід. По-друге, було змодельовано рух виїмкової виробки, а потім на його контурі було встановлено рамне кріплення. Вперше проведено спостереження, коли хаотичний розвиток скручуючих і згинальних моментів було зареєстровано під час початкових деформацій рами. Однак, стійкі зразки моментів були сформовані, коли необоротні зрушення вміщуючих порід розвивалися навколо виробки. Критичні точки на профілі, де були зареєстровані пластичні деформації, збігалися з максимумами градієнтів крутіння. Ці скручуючі деформації викликали розтинання рамних кріплень, що знизило несучу здатність рами на 20% і навіть більше. Таким чином, конкретне завдання полягає в тому, щоб запобігти деформацій у вигляді поздовжнього скручування профілю рамного кріплення.

Ключові слова: гірничий тиск, гірнича виробка, рамне кріплення, пластична деформація, скручування, згинання.

Вступ Проблема забезпечення енергетичної незалежності України є вирішальною для зміцнення нашої держави. Однією з критичних для стабільного розвитку вугільної галузі є проблема забезпечення стійкості гірничих виробок. При цьому переважна частина протяжності підготовчих виробок підтримується рамним піддатливим кріпленням з важкого спецпрофілю [1]. Разом з тим вказані кріплення часто відчувають пластичні деформації у вигляді повздовжнього скручування профілю, його поперечного і косого вигину [2], заклинювання замків податливості з розривом скоб [3,6].

В результаті навколо гірничих виробок утворюються складні дисипативні структури [4], які сприяють руйнуванню рамних кріплень і стійкості виробок в цілому [5].

Процес нелінійної взаємодії системи «рамне кріплення - навколишні породи» супроводжується переходом рамного профілю у пластичний стан, який вичений недостатньо, що перешкоджає вдосконаленню конструкцій рамного кріплення і повному використанню резервів їх несучої здатності. У зв'язку з цим у даній статті досліджується актуальна проблема нелінійного деформування спецпрофілю рамних кріплень при взаємодії їх з уміщувачими породами.

Методика виконання досліджень

У даній статті викладені результати досліджень еволюції скручуючих і згинальних моментів рамних кріплень, що дозволяє оцінити складний механізм непружного деформування цих конструкцій, які відіграють ключову роль у вирішенні зазначеної проблеми.

При цьому використано метод комп'ютерного моделювання на основі платформи FLAC3D [9], що дозволяє прямо враховувати час розвитку процесів пластичного деформування рамних кріплень спільно з непружними зрушеннями навколишнього масиву гірських порід [7,8]. Цей підхід вперше запропонований П. Кундалом [10], що дозволило розширити можливості чисельних методів і уникнути проблем збіжності рішення до стану статичної рівноваги. Це має принципово важливе значення, оскільки процес незворотних зрушень масиву гірських порід на контурі підготовчої виробки підпорядковується кінетичній теорії міцності і протікає в часі.

На підставі такого підходу групою проф. П. Кундала запропоновано новий алгоритм вирішення задач механіки руйнування гірських порід, заснований на вирішенні системи диференціальних рівнянь руху і рівнянь зв'язку напружень і деформацій гірських порід, які залежать від обраної теорії міцності [8].

Диференціальні рівняння руху масиву гірських порід записуються в наступному вигляді.

$$\frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_i} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \quad (1)$$

де $\sigma_{i,j}$ - нормальні і дотичні напруження, що діють у масиві гірських порід, Па; X_i - координати декартової системи, м; ρ - щільність гірських порід, кг / м³; b_i - питомі сили, що розвиваються у масиві гірських порід і приводяться до одиниці його маси H / кг; v_i - швидкість руху елементарних обсягів масиву гірських порід, м / сек; t - час, сек.

Якщо права частина дорівнює нулю (з точністю до похибки чисельних обчислень) - настає статична рівновага масиву гірських порід. В іншому випадку породи знаходяться в стані активних зрушень, що супроводжується кінцевою швидкістю зсувів на контурі виробки, яка, як показали інструментальні спостереження, змінюються в межах від 3 мм/добу до 72 мм/добу.

Система диференціальних рівнянь вирішується чисельним методом кінцевих різниць. При вирішенні системи диференціальних рівнянь

використовується сучасна модель міцності гірських порід, заснована на теорії Кулона-Мора [7]. Це дає можливість реалістично моделювати процес нелінійного деформування порід, включаючи ділянку позамежного деформування і розуцільнення порід.

Для моделювання напружено-деформованого стану рамних кріплень і анкерів використовувався метод кінцевих елементів. При цьому рами і анкери задавалися у вигляді набору балкових елементів, які взаємодіють із зонами, на які розбивається товща гірських порід. Таким чином застосовувалася гібридна модель, що з'єднує переваги методу скінченних різниць та методу кінцевих елементів. Це дало можливість вирішувати тривимірні завдання з детальною розбивкою розрахункової схеми і прийнятним машинним часом.

Для економії машинного часу моделювалася симетрична половина перетину горизонтальної виробки. Перетин приймався арочної форми, а його площа дорівнювала 20м^2 . При цьому ширина виробки становила 5,78 м, а висота 3,7 м. Межі розрахункової області вниз від підлоги, вгору від покрівлі і вбік від стінки виробки розташовувалися на відстанях 10м, 15м і 10м відповідно. Це забезпечило можливість завдання простих граничних умов, оскільки вплив виробки на напружено-деформований стан масиву гірських порід на таких відстанях не перевищує 15%.

Глибина розробки приймалася рівною 800м, міцність порід на однісіне стискання становила 45МПа. Модуль об'ємного стиснення порід приймався рівним 5ГПа, модуль зсуву 3ГПа, кут внутрішнього тертя порід 35° , зчеплення 1МПа. Межа міцності на розтягнення 1МПа. Щільність порід становила 2500кг/м^3 , вертикальна компонента гірського тиску 20МПа, горизонтальні 10МПа. Розрахункова область розбита на 9000 зон і 11 тисяч вузлів.

Товща гірських порід розбивалася на горизонтальні шари, у межах яких можна було ставити властивості осадових порід. На вертикальних границях обмежувалися нормальні переміщення. На нижній межі розрахункової області обмежувалися вертикальні переміщення, а до верхньої границі розрахункової області прикладалось напруження відповідно до глибини закладення виробки. Саме такий прийом дозволяв моделювати процес зрушень порід у часі, а фронт руйнування порід навколо виробки переміщався в часі і просторі так, як це встановлено в натурних умовах за допомогою глибинних реперів [11].

Для того, щоб правильно врахувати початковий стан модельованої системи «кріплення - навколишній масив гірських порід», використовувалася реальна черговість процесів виїмки і кріплення гірничої виробки. Спочатку здійснювалося навантаження блоку з гірських порід компонентами нормальних напружень, які відповідали глибині закладення виробки. При цьому забезпечувалося статична рівновага усієї системи, оскільки саме в такому стані знаходиться масив гірських порід до проведення гірничих робіт. Статична рівновага досягалася демпфуванням розбалансування внутрішніх сил у моделі після її навантаження. Забезпечення зазначених умов гарантувало реальний шлях навантаження оточуючих виробку порід, що забезпечувало адекватну їх поведінку.

Результати моделювання

На рис. 1 показаний характер руйнування порід та їх зрушення на контурі виробки. Найбільш інтенсивні деформації спостерігаються в площині підготовчого вибою, де відбувається віджимання порід 1 і руйнування масиву попереду вибою на відстані 0,5-1,0 м. У покрівлі виробки реєструється інтенсивне осідання порід 2, яке призводить до збільшення вертикального навантаження на рамне кріплення і анкери, що встановлені вертикально.

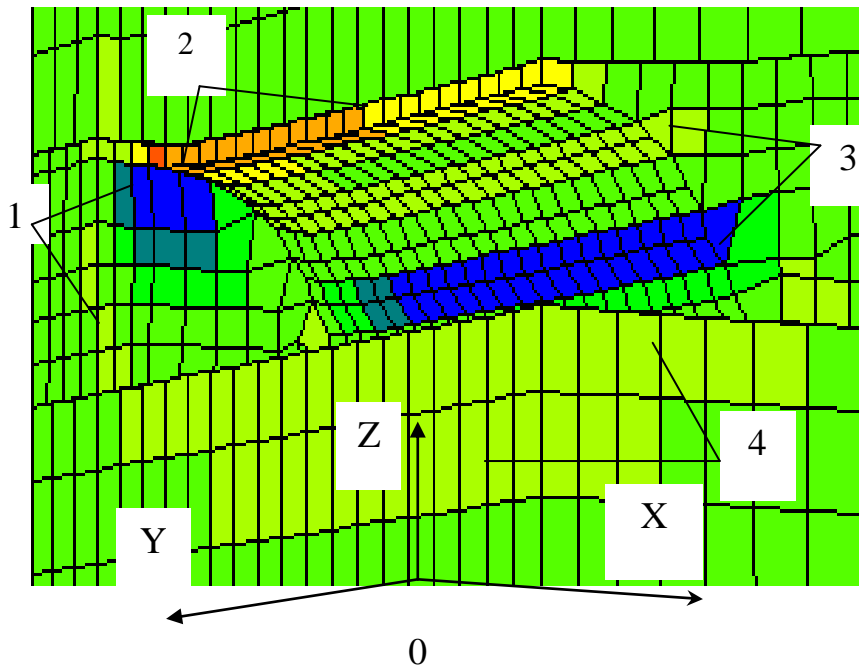


Рисунок 1- Характер інтенсивного деформування порід на контурі виробки в міру відходу підготовчого вибою (16 тис циклів)

Бічні стінки виробки здійснюють віджимання 3 і зміщуються у її порожнину. Спостерігається також підняття підшви 4 у вигляді зворотного склепіння. Швидкості вертикальної конвергенції на контурі виробки максимальні позаду підготовчого вибою і знаходяться у межах 10-20мм/добу. Швидкість зближення бічних стінок виробки становить 6-2мм/добу.

Спостерігається тенденція зменшення швидкостей конвергенції покрівлі й підшви, а також зближення бічних стінок з віддаленням підготовчого вибою, хоча в самому вибої виражений тривимірний характер зрушень.

Зазначені швидкості конвергенції відповідали виміряним у натурі на контурі уклону блоку 10 ш/у Покровське, який підтримувався на глибині 825м у вміщуючих породах, властивості яких були близькі до заданих у моделі. Адекватні натурні швидкості конвергенції і характер деформування порід отримували шляхом налаштування параметрів моделі.

У процесі проведення підготовчу виробку кріпили рамно-анкерним кріпленням. При цьому використовували триланкове рамне кріплення типу КМП з спецпрофілю СВП-33. Рами встановлювалися з кроком 1м. Шахтні інструментальні спосереження засвідчили, що найбільше навантаження зафіксоване на верхняк рам, що добре узгоджується з характером зсувів порід на контурі виробки, яке обговорювалося вище і зображене на рис. 1.

Отримані розрахункові розміри зони зруйнованих порід навколо підготовчої виробки задовільно узгоджуються з даними інструментальних спосережень,

причому розбіжність розмірів розвантажених зон не перевищує 28%.

Розміри зони зруйнованих порід в натурних умовах отримані навколо уклону блоку 10 за допомогою радіоінтроскопічного методу. Ступінь тріщинуватості порід контролювали за величиною загасання електромагнітного поля у вимірювальних шпурах.

У результаті руйнувань вміщуючих порід навколо виробки виникають інтенсивні деформації, які призводять до зсувів порід у порожнину виробки на величину 120мм. За умови ідеальної забутовки закріпного простору, яка імітувалась в даній моделі, спільне обтиснення рам з боків і з покрівлі, а також з боку ґрунту, повинно створювати поздовжні зусилля у профілі рами.

Аналіз скручуючих і згинальних моментів і обговорення результатів

Під час взаємодії рам з навколишнім масивом гірських порід був зареєстрований стохастичний характер зміни крутних і згинальних моментів під час навантаження рамного кріплення. На рис. 2 наведені графіки зміни всіх моментів: крутного M_x і згинальних M_y і M_z протягом перших 9200 циклів розрахунку. На графіках можна бачити, як всі розглянуті моменти хаотично змінюють величину і знак, що свідчить про складність процесу деформування рамного кріплення у реальних умовах.

У міру збільшення зсувів на контурі виробки і деформування рамного кріплення відбувається відбір стійких форм деформування профілю і розподіл поперечних, поздовжніх сил, а також згинальних і скручуючих моментів. У такому положенні кріплення деформується до моменту, коли відбудеться її руйнування у вигляді пластичного вигину в критичному місці (або у декількох місцях відразу або послідовно).

Момент настання пластичного вигину сегментів рамних кріплень перевірявся за сучасною енергетичною теорією міцності сталі.

На розподілах напружень і зміщень навколо перетину підготовчої виробки на кінцевому етапі помітна сильна деформація перерізу виробки та істотний перерозподіл вертикальної компоненти нормальних напружень. Так, розміри зони руйнувань навколо виробки збільшилися у кілька разів, про що можна судити за величиною зони розвантаження. Максимум розвантаження спостерігається у породах ґрунту і бічних стінках виробки. У склеповій частині перетину розвантаження менше, оскільки аркова форма перетину сприяє самозаклинюванню раніше зруйнованих порід.

Величина осідання порід покрівлі досягла у центрі перетину 350мм або 11% від початкової висоти виробки. Порода ґрунту піднялася на 600мм, що становить 18%. В цілому вертикальний розмір перерізу виробки зменшився на 52%, а зона підвищених напружень у боках виробки відсунулася майже на 3 м углиб масиву.

Такі інтенсивні деформації перерізу виробки призвели до збільшення поздовжніх зусиль у рамі по всьому її периметру і збільшення скручуючих моментів. Характерно, що зростання як скручуючих, так і згинальних моментів сталися узгоджено, що видно на графіках рис. 3.

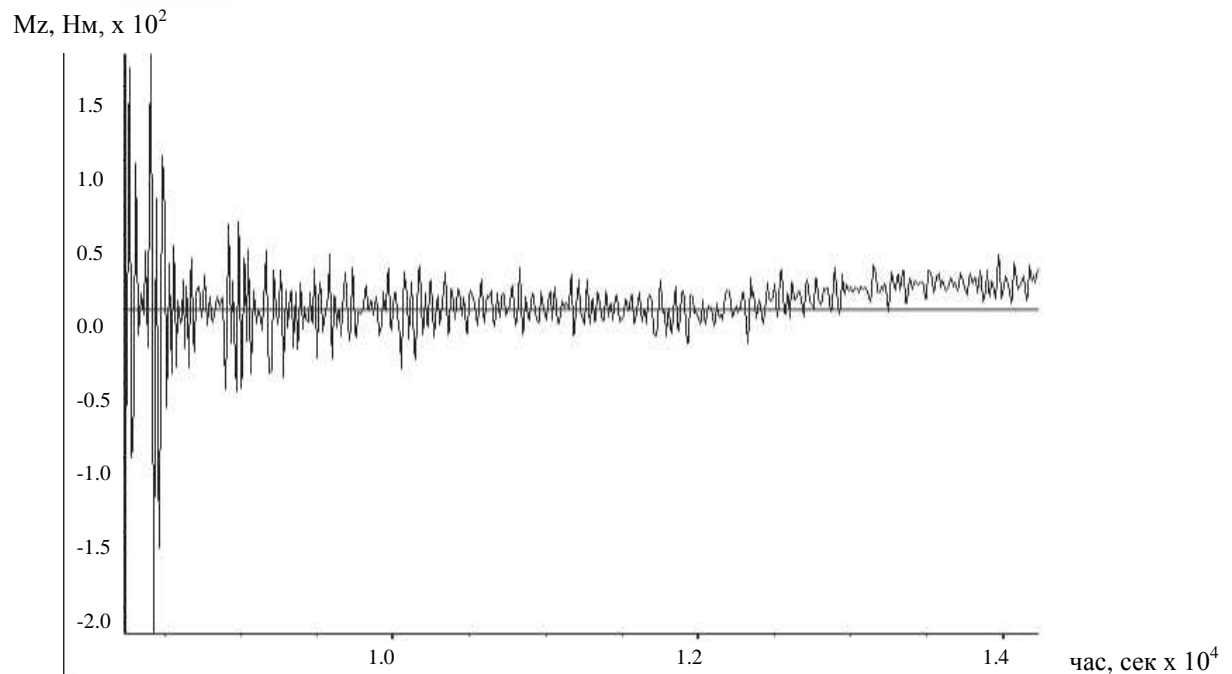
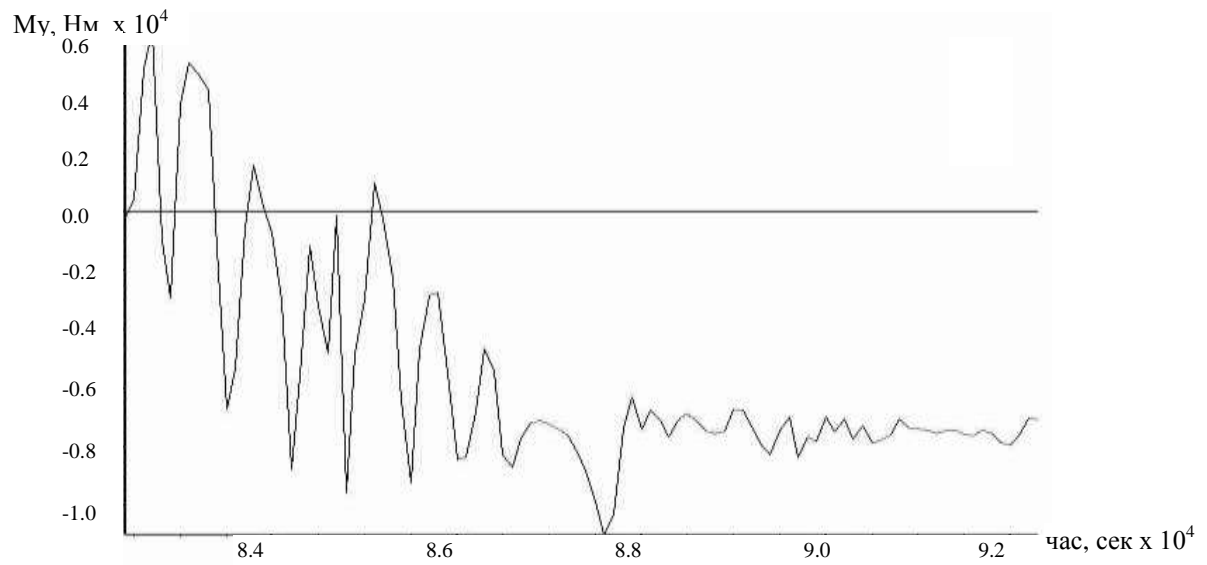
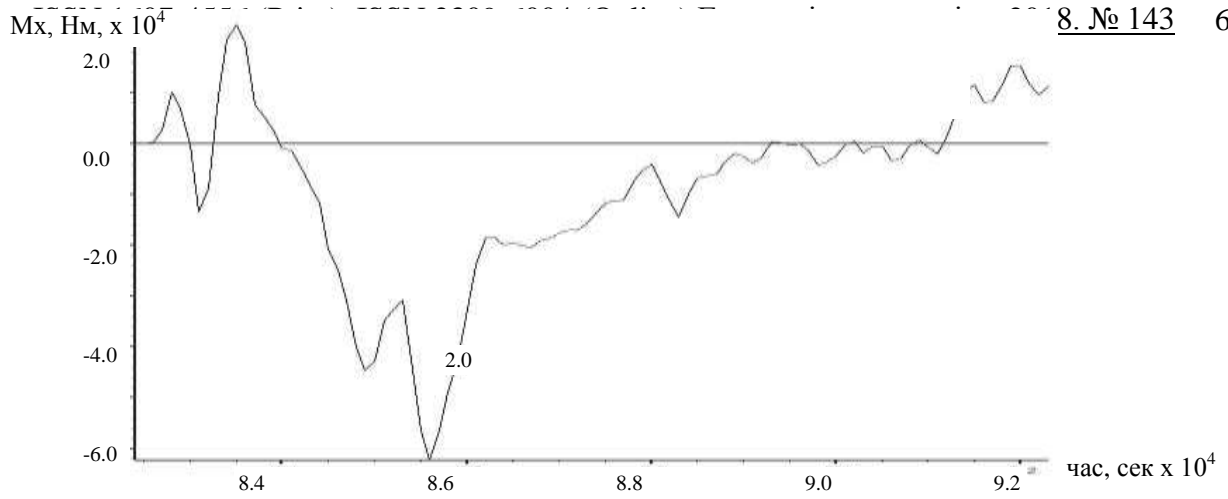


Рисунок 2 - Графіки зміни скручуючого M_x і згинальних моментів M_y і M_z в рамному сегменті у замку податливо-сті на початковому етапі навантаження рами (9200 циклів)

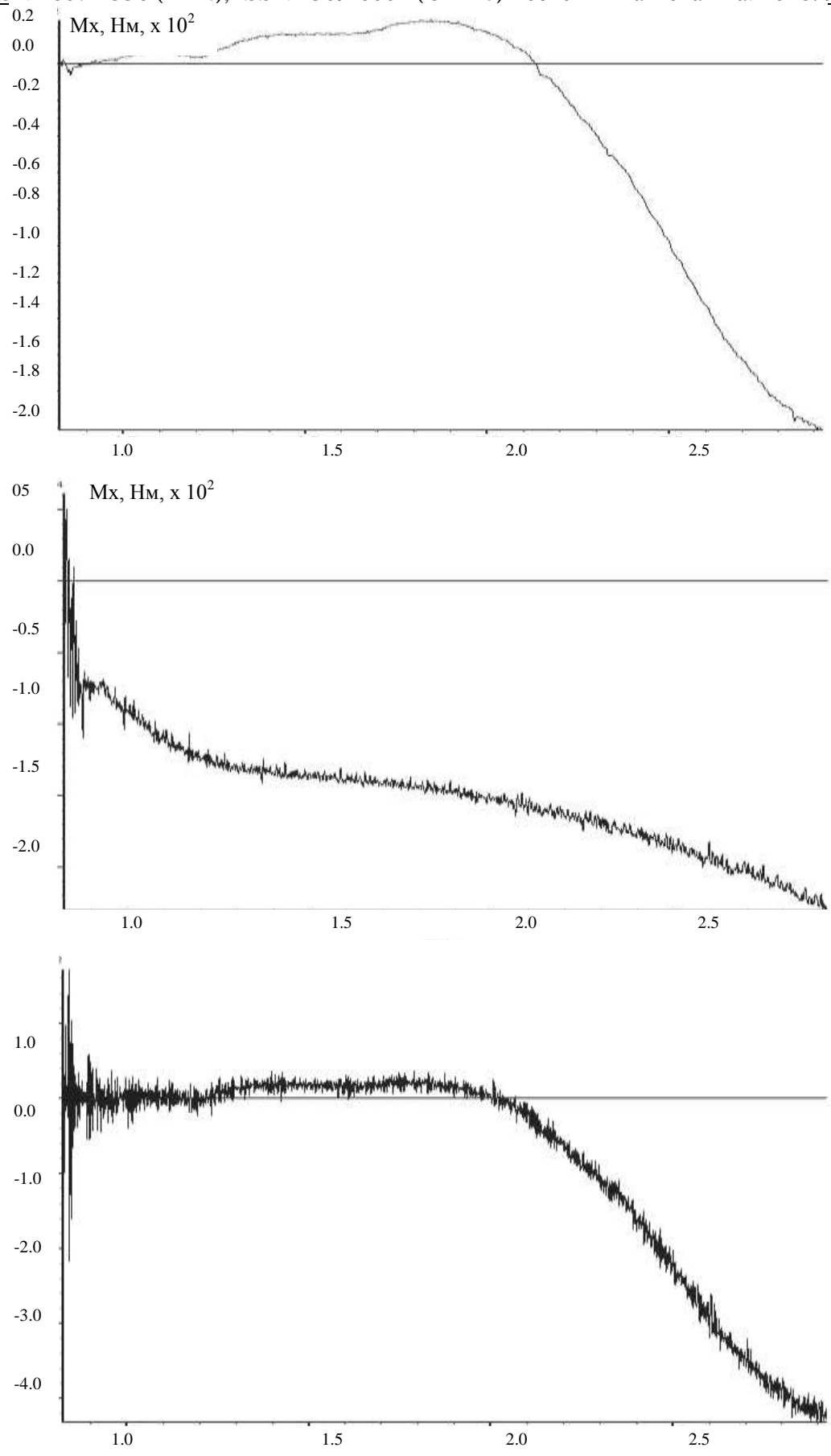


Рисунок 3- Характер зміни скручуючих M_x і згинальних моментів M_y і M_z в рамному сегменті у замку податливості на кінцевому етапі

Це підтверджує факт відбору системою кріпильних рам певної моди деформування, яка є відносно стабільною і в кінцевому рахунку призводить до втрати стійкості рами. Виконане моделювання підтвердило важливу роль поздовжнього скручування профілю рами в механізмі втрати її стійкості і несучої здатності. Розклинювання рам дерев'яними клинами не дає принципового вирішення проблеми обмеження третього ступеня свободи. Як показує практика експлуатації рам, при використанні замків підвищеного опору рами вивертаються з площини перерізу виробки незважаючи на розклинювання, що призводить до косоного вигину профілю.

Висновок

Вперше вирішено задачу про спільне руйнування вміщуючих підготовчу виробку порід і деформації анкерного і рамного кріплення з урахуванням реальних розмірів анкерів і рам, а також просторового їх деформування. При цьому використання тривимірної постановки задачі і коректне дотримання початкового стану системи дозволило забезпечити задовільну збіжність результатів моделювання і натурних спостережень.

У процесі зсуву зруйнованих порід і навантаження рамних кріплень в рамному профілі генеруються скручуючі і згинальні моменти, а також поздовжні і поперечні сили. При цьому розподіл вказаних силових характеристик на початковому етапі має знакозмінний характер по периметру рамного кріплення, а зміна розподілів відбувається хаотично у часі у процесі навантаження.

У міру збільшення зсувів на контурі виробки і деформування рамного кріплення відбувається відбір стійких форм деформування профілю і розподіл поперечних, поздовжніх сил, а також згинальних і скручуючих моментів відносно початкового стану. У такому положенні кріплення деформується до тих пір, поки не настане її руйнування у вигляді пластичного вигину у критичному місці. Критична ділянка рами збігається з місцем, де відбувається максимальне поздовжнє скручування профілю з відгином однієї або обох полиць його перетину, що призводить до різкого (на 20% і більше) зменшення моменту опору. Таким чином необхідно вдосконалити конструкцію рамних податливих кріплень так, щоб нейтралізувати розвинення небезпечних деформацій поздовжнього скручування їх спецпрофілю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kang H. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review // *International Journal of Coal Sciences Technology*. 2014. № 1(3). Pp. 261–277.
2. Ma R., Li G., Zhang N. Analysis on mechanism and key factors of surrounding rock instability in deeply inclined roadway affected by argillation and water seepage // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. № 25(3). Pp. 465–471.
3. Khalimendik U.M., Khalimendik V.U., Zakharova L.M. Bench testing of a steel yielding frame support // *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. № 4. Pp. 86–91.
4. Zakharova L.M. Generating of dissipative structures during ground irreversible movement // *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2017. № 4(105). Pp. 118–123.
5. Zacharov V.S., Hohotva A.I., Nazimko V.V., Zakharova L.M., Sazhnev V. P. Ground behavior investigation during roof fall in a roadway // *30th International Conference of Safety in Mines Research Institutes*. Johannesburg: The South African Institute of mining and metallurgy. (2003, October). Pp. 173–185.
6. Farmani M.A., Ghassemieh M. Steel beam-to-column connections equipped with SMA tendons and energy dissipating devices including shear tabs or web hourglass pins // *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. № 135. Pp. 30–48

7. Zakharova, L.M. Modeling of the Irreversible Deformation of Soils and Rock Masses by the Methods of the Theory of Elasticity // *Materials Science*. 2018. № 53. Pp. 1-8.
8. Griniov V., Zakharova L., Diedich I., Nazymko V. Distant interaction of rock mass clusters around underground opening // *Min. miner. depos.* 2017. № 11(2). Pp.79-83.
9. *FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*. 2015. Itasca. 213 p.
10. Cundall P.A. Explicit Finite Difference Methods in Geomechanics. Numerical Methods in Engineering // *Proceedings of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, 1976. Blacksburg, Virginia. Vol. 1. Pp. 132-150.
11. Zakharova L.M. Close interaction of rock fragments in underground roadway during irreversible movement of surrounding rock mass // *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. 6. Pp. 40 - 43.

REFERENCES

1. Kang H. (2014), "Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review", *International Journal of Coal Sciences Technology*, no.1(3), pp. 261-277.
2. Ma R., Li G. and Zhang N. (2015), "Analysis on mechanism and key factors of surrounding rock instability in deeply inclined roadway affected by argillation and water seepage", *International Journal of Mining Science and Technology*, no. 25(3), pp. 465-471.
3. Khalimendik U.M., Khalimendik V.U. and Zakharova L.M. (2018), "Bench testing of a steel yielding frame support", *Naukovyi Visnyk NHU*, no.4, pp. 86-91.
4. Zakharova L.M. (2017), "Generating of dissipative structures during ground irreversible movement", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 4(105), pp. 118-123.
5. Zacharov V.S., Hohotva A.I., Nazimko V.V., Zakharova L.M. and Sazhnev V. P. (2003), "Ground behavior investigation during roof fall in a roadway", *30th International Conference of Safety in Mines Research Institutes*, Johannesburg: The South African Institute of mining and metallurgy, October 2003, pp. 173-185.
6. Farmani M.A., Ghassemieh M. Steel beam-to-column connections equipped with SMA tendons and energy dissipating devices including shear tabs or web hourglass pins // *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. #135. Pp. 30-48
7. Zakharova, L.M. (2018), "Modeling of the Irreversible Deformation of Soils and Rock Masses by the Methods of the Theory of Elasticity", *Materials Science*, no. 53, pp. 1-8.
8. Griniov V., Zakharova L., Diedich I. and Nazymko V. (2017), "Distant interaction of rock mass clusters around underground opening", *Min. miner. depos.*, no. 11(2), pp. 79-83.
9. *FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions* (2015), Itasca, US.
10. Cundall P.A. (1976), "Explicit Finite Difference Methods in Geomechanics. Numerical Methods in Engineering", *Proceedings of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Blacksburg, Virginia, Vol. 1, pp. 132-150.
11. Zakharova L.M. (2017), "Close interaction of rock fragments in underground roadway during irreversible movement of surrounding rock mass", *Metallurgical and Mining Industry.*, no. 6, pp. 40 - 43.

Про авторів

Назимко Віктор Вікторович, доктор технічних наук, головний науковий співробітник Інституту фізики гірничих процесів НАН України, м. Дніпро, Україна, victor.nazimko@gmail.com

Кусень Олексій Богданович, магістр, Закрите акціонерне товариство «Донецьксталь металургійний завод», м. Покровськ, Україна, kusenab@gmail.com

Захарова Людмила Миколаївна, доктор технічних наук, науковий співробітник Інституту фізики гірничих процесів НАН України, м. Дніпро, Україна, zakharovaln@gmail.com

About the authors

Nazimko Victor Victorovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Chief Researcher of Institute of Physics of Mine Processes NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine, victor.nazimko@gmail.com

Kusen Oleksii Bohdanovych, Master of Science, Closed Joint Stock Company "Donetskstal Metallurgical Plant", Pokrovsk, Ukraine, kusenab@gmail.com

Zakharova Lyudmyla Mykolaivna, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Researcher of Institute of Physics of Mine Processes NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine, zakharovaln@gmail.com

Аннотация. Цель этого исследования состояла в том, чтобы проследить эволюцию крутящего момента и изгибающих моментов рамной арочной податливой крепи при необратимых деформациях профиля во время активных сдвижений пород окружающих выработку. Эта работа выполнена согласно гранта 0117U002193 НАН Украины.

Предыдущие исследования показали, что рамное крепление широко используется при подземной разработке, особенно при добыче угля. Наиболее интенсивные необратимые деформации рамного крепления происходят в зоне опорного давления в пределах выемочной выработки и при активных смещениях вмещающих пород позади выемочной выработки. Самая опасная деформация рамного крепления - пластическое продольное скручивание профиля рамы. Эта деформация сопровождается пластическим изгибом как прямым, так и косым. Платформа FLAC3D использовалась для моделирования взаимодействия рамы и окружающего массива горных пород. Основополагающий закон Мора-Кулона был принят для имитации поведения горного массива, а модель Мизеса имитировала пластическую деформацию профиля рамного крепления. Граничные условия

представлены глубиной разработки 800 м. Начальное состояние системы было рассмотрено с использованием последовательных состояний массива горных пород. Сначала было установлено геостатистическое состояние массива горных пород. Во-вторых, было смоделировано движение выемочной выработки, а затем на её контуре было установлено рамное крепление.

Впервые проведено наблюдение, когда хаотическое развитие скручивающих и изгибающих моментов было зарегистрировано во время начальных деформаций рамы. Однако, устойчивые образцы моментов были сформированы, поскольку необратимое движение вмещающих пород развивалось вокруг выработки. Критические точки на профиле, где были зарегистрированы пластические деформации, совпадали с максимумами градиентов кручения. Эти скручивающие деформации вызвали расхождение рамных крепей, что снизило несущую способность рамы на 20% и даже больше. Таким образом, конкретная задача заключается в том, чтобы предотвратить деформаций в виде продольного скручивания профиля рамного крепления.

Ключевые слова: горное давление, горная выработка, рамная крепь, пластическая деформация, скручивание, изгиб.

Annotation. The purpose of this research was to trace evolution of torque and bending moments in a frame support profile during irreversible interaction of the frames and surrounding rock mass and plastic deformation of the profile. This work was accomplished according grant 0117U002193 NAS of Ukraine.

Previous studies indicated that the frame supports were widely used for underground mining, especially coal extraction. The most intensive irreversible deformation of the frames occurred in the abutment zone outby of the longwall and active subsiding inby or behind it. The most dangerous deformation of the frames was plastic torsion of the frame profile. This deformation was followed by plastic bending both direct and skew. The FLAC3D platform was employed to simulate irreversible interaction of the frame and surrounding rock mass. The Mohr-Coulomb constitutive law was accepted to simulate overpeak behavior of the ground and the Mises model imitated plastic deformation of the steel frame profile. Boundary conditions represented depth of mining operations of 800 m. Initial state of the system was considered by using serial states of the rock mass. First, the geostatic state of the rock mass was established. The second was simulation of the roadway driving and then a frame support was installed in the roadway face.

It was for the first time when chaotic evolution of torsion and bending moments were registered during initial state of the frame loading. However, steady patterns of the moments were formed as irreversible ground movement was developing around the roadway. Critical points on the profile where plastic hinges were registered coincided with maximums of the torsion gradients. These torsion deformations caused divergence of the profile boards that reduced bearing capacity of the frame by 20% and even more. Therefore, a specific task is to prevent torsion deformations of the frame support profile.

Key words: ground pressure, underground roadway, steel frame support, plastic deformation, torsion, bending.

Стаття надійшла до редакції 2.11. 2018

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Курносовим С.А..