

© О.Є. Григор'єв¹, О.В. Скобенко¹, В.В. Кулівар¹, Л.В. Куроп¹

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

МОДЕЛЬ ДЕФОРМУВАННЯ СТАЛЕВОГО АРКОВОГО КРІПЛЕННЯ У ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ПІДЗЕМНИХ ВИРОБКАХ ГЛИБОКИХ ШАХТ

© O. Hryhoriev¹, O. Skobenko¹, V. Kulivar¹, L. Kurop¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

MODEL OF DEFORMATION OF STEEL ARCH SUPPORT IN HORIZONTAL UNDERGROUND WORKINGS OF DEEP MINES

Мета. Розробка адекватної моделі сталевго аркового кріплення підземних виробок глибких вугільних шахт для оцінки його напружено-деформованого стану.

Методика. Дослідження деформування сталевго аркового кріплення капітальних виробок глибких вугільних шахт, порівняння їх з результатами аналітичних досліджень з урахуванням особливостей протікання у часі геомеханічних процесів у привибійній частині породного масиву, і побудова на цій основі нової механічної моделі деформування сталевго аркового кріплення в процесі його навантаження. В дослідженнях використані методи будівельної механіки, натурних досліджень та статистичної обробки результатів натурних вимірюв.

Результати. Приймаючи до уваги розвиток геомеханічних процесів при посуванні вибою виробки, запропоновано нову двохстадійну деформаційну модель сталевго аркового кріплення, яке на першому етапі працює в режимі заданих деформацій в результаті переміщення контуру виробки, а на другому – в режимі заданого навантаження після втрати стійкості породами підосви, що дозволить обґрунтовано підходити до проектування кріплення, обґрунтування його раціональної форми і забезпечення стійкості підземних виробок глибких шахт і рудників.

Наукова новизна. На основі закономірностей деформування сталевго кріплення капітальних виробок запропоновано нову двоетапну деформаційну модель сталевго аркового кріплення для капітальних підземних виробок вугільних шахт і рудників, яка відповідає умовам його роботи в реальних умовах. Шляхом аналізу напружено-деформованого стану аркового кріплення обґрунтовані його можливі форми, що мають пониженоу матеріалоємність і адаптовані до конкретних гірничо-геологічних умов.

Практична значимість. Нова модель деформування сталевго аркового кріплення в умовах вугільних шахт дозволить зменшити витрати сталевго прокатного спецпрофілю, який використовується для виробництва кріплення і який є дефіцитним в умовах, коли основні виробники спецпрофілю – металургійні комбінати «Ім. Ілліча» та «Азовсталь», розташовані у тимчасово окупованому Маріуполі – зруйновані. Дотично це також знизить собівартість копалини що видобувається підвищить ефективність виробництва.

Ключові слова: *сталеве аркове кріплення, підземні виробки, згинальні моменти, деформації, модель.*

Вступ. Експлуатаційна стійкість більшості протяжних виробок вугільних шахт і рудників забезпечується за допомогою сталевго кріплення, яке, зазвичай, має аркову форму [1, 2]. Виготовляється воно з спеціального взаємозаміняемого прокатного профілю типу СВП, поперечний переріз якого має жолобоподібну

форму [3, 4]. Основним постачальником на ринок такого прокатного профілю завжди були металургійні заводи Маріуполя – «Ім. Ілліча» та «Азовсталь», які на цей час зруйновані в результаті воєнної агресії Росії і знаходяться на тимчасово окупованій території [5, 6]. Така ситуація призвела до того, що спецпрофіль став дефіцитом, що призвело до суттєвого росту його вартості. В свою чергу така ситуація стала причиною вартості будівництва підземних виробок і, як наслідок, підвищення вартості вугілля, що видобувається, і електроенергії, яка генерується на теплових електростанціях.

Економічна ситуація, що склалася, призвела до пошуку шляхів зниження вартості будівництва підземних виробок вугільних шахт. Одним з них є вивчення умов роботи кріплення в процесі посування вибою виробки і розвитку геомеханічних процесів в породному масиві, що оточує виробку. В процесі навантаження кріплення з боку породного масиву, який знаходиться під впливом значних гравітаційних сил, в тілі арки виникають внутрішні силові фактори: згинальні моменти, перерізуючі і нормальні сили [7, 8]. На руйнування сталевих аркового кріплення, яке розглядається як тонкостінна конструкція, основний вплив (до 90-95%) мають згинальні моменти [9, 10]. Дослідження і виявлення умов, при яких величину цих моментів буде зменшено, являє собою актуальну наукову задачу, що має суттєву практичну цінність особливо в умовах післявоєнного відновлення економічного потенціалу України.

Основна частина. Дослідження стійкості підземних протяжних виробок, як правило, пов'язане з забезпечення цілісності кріплення, яке сприймає навантаження з боку оточуючого породного масиву. На великих глибинах навколо таких виробок утворюється зона непружних деформацій, породі в межах якої пластично розпушені [9–12]. Цей факт сприяє тому, що обсяг цих порід, які є крихкими за своєю природою і генезисом, збільшується і переміщується в бік кріплення, формуючи таким чином навантаження на сталеві арки від нуля до якоїсь кінцевої величині, яка може стати критичною за відповідних умов [10–12]. Напружено-деформований стан такого кріплення, як правило, оцінюється в режимі заданого навантаження, яке прикладається до арки відомої геометричної форми. що є статично один раз невизначеною конструкцією. Існують стандартні методики розрахунку таких конструкцій, що дозволяють визначити внутрішні силові фактори такі, як згинальні моменти, продольні і перерізуючі сили. У спеціальній літературі (О.П. Максимов, І.В. Баклашов, Б.А. Картозия) можна знайти епюри цих величин [3, 4]. Цей факт оставався настільки усталеним, що останні роки сорок ніхто не займався проблемою розподілу внутрішніх силових факторів в сталевих арках кріплення, вважаючи її вичерпано доведеною.

Але за цей час були виконані натурні виміри деформацій сталевих арок кріплення на деяких глибоких шахтах Донбасу, які показали суттєву відмінність реальних епюр розподілу згинальних моментів від теоретичних. А оскільки з величинами згинальних моментів функціонально пов'язані перерізуючі і нормальні сили, то, відповідно, і розподіл цих силових факторів також повинен відрізнятися від теоретичних.

Великий обсяг натурних досліджень, пов'язаних з вивченням напружено-деформованого стану сталевих кріплень аркової форми був виконаний у капітальних виробках шахти «Алмазна» ВО «Добропіллявугілля». Експериментальні ділянки були облаштовані у чотирьох штреках пласта l_1 поза зони впливу вибою лави та у двох квершлагах горизонту 107 м. Всі виробки закріплено сталевим кріпленням аркової форми типу АП з спецпрофіля СВП-27 з кроком установки 0,5 м і залізобетонними затяжками. У виробках вибирались ділянки з 10–20 рам, що були достатньо обтиснуті вміщуючими породами, але не втратили несучу здатність, тобто на них піддатливість замків було вичерпано, але пластичні деформації кріплення були відсутні.

Методика вимірювань наступна. На внутрішню поверхню рам наносилися фіксовані точки, що розташовувались на відстані 0,4 м одна від одної. Залежно від типорозміру кріплення наносилися від 19 до 25 точок. З допомогою кривизномера [3] в цих точках виконувалися заміри радіусу кривизни до навантаження арок (на поверхні) і після навантаження, яке відповідало моменту вичерпання піддатливості в замках кріплення (рис. 1).

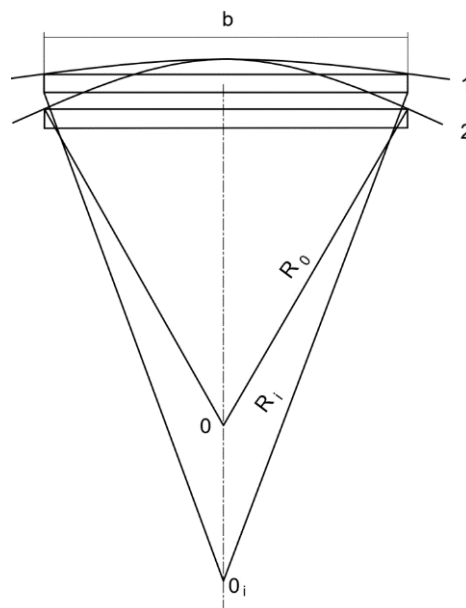


Рис. 1. Схема виміру кривизни арки у фіксованій точці: 1 – до навантаження; 2 – після навантаження; R_0 – радіус кривизни до навантаження; R_i – радіус кривизни після навантаження; b – ширина площадки кривизноміру

Зміна радіусу кривизни пропорційна величині згинального моменту в точці вимірювання:

$$\frac{M_i}{EI} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_i}, \quad (1)$$

де: E – модуль пружності сталі; I – момент інерції перерізу прокатного профіля; R_0 – початковий замір радіусу кривизни арки кріплення до її навантаження; R_i – поточний замір радіусу кривизни.

З урахуванням показників кривизноміра відносні значення згинальних моментів у довільній точці арки будуть дорівнювати:

$$\frac{M_i}{EI} = \frac{\alpha}{b^2} (h_0 - h_i), \quad (2)$$

де b – ширина площадки кривизноміру; h_0 – початковий показник індикатору часового типу; h_i – поточний показник індикатору часового типу.

Використовуючи залежність (2), було побудовано фактичні епюри згинальних моментів для арок кріплення на експериментальних ділянках. Типову фактичну епюру згинальних моментів наведено на (рис. 2).

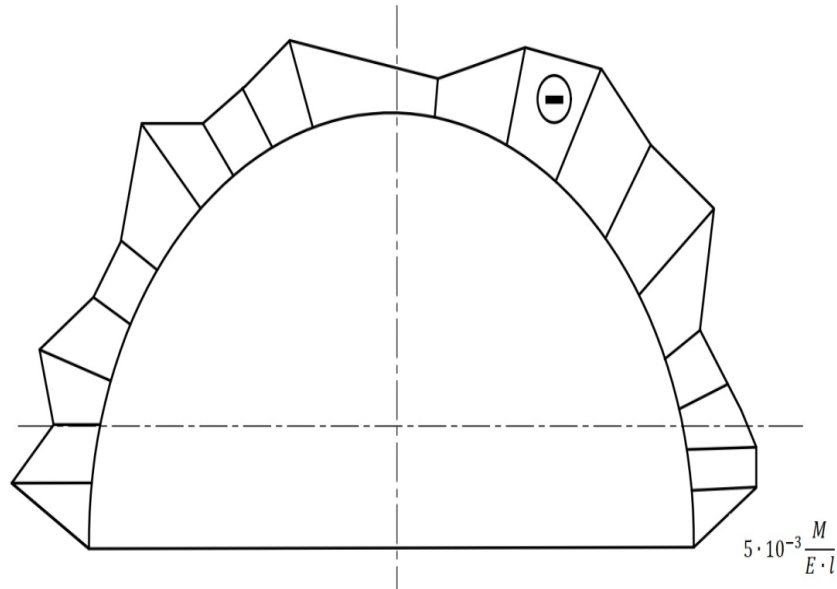


Рис. 2. Фактична епюра згинальних моментів (арка №1, замірна станція ПК25)

Типову ж епюру згинальних моментів, яку отримано за умови заданого навантаження, наведено на рис. 3.

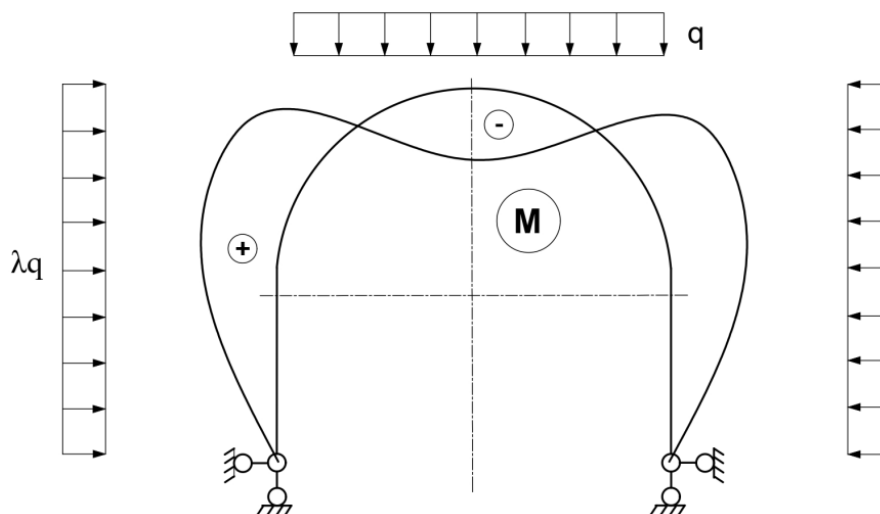


Рис. 3. Епюра розподілу згинальних моментів для сталеві арки кріплення, що працює в умовах заданого навантаження

Порівнюючи обидві епюри, можна відмітити їх суттєву різницю.

Характер фактичних епюр згинальних моментів свідчить, по-перше, про неоднорідність, несиметрію навантаження кріплення з боку породного масиву. По-друге, виміряні величини згинальних моментів утворюють епюри, характер яких суттєво відрізняється від класичних епюр згинальних моментів (див. рис. 2, 3).

Ця обставина викликала багато питань, які торкнулися, перш за все, звичної початкової фізичної моделі формування навантаження на кріплення. Аналіз отриманих результатів натурних вимірів дозволив розробити нову, більш складну фізичну модель формування навантаження на сталеве аркове кріплення, яке є переважним на вугільних шахтах.

В результаті було запропоновано двоетапну модель процесу зростання навантаження від моменту встановлення арки у вибої виробки, до моменту досягнення механічної рівноваги системи «кріплення-породний масив» (рис. 4).

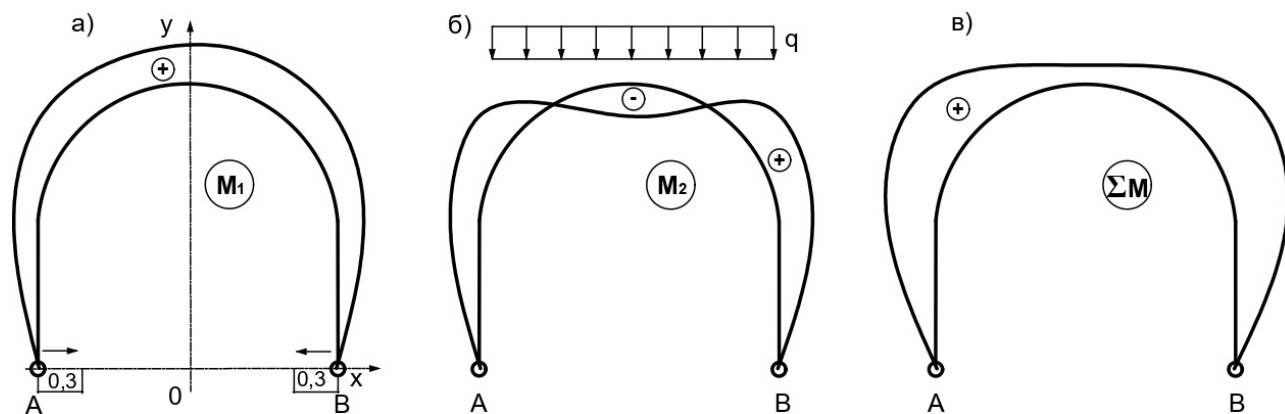


Рис. 4. Двоетапна геомеханічна модель формування напружено-деформованого стану сталевго аркового кріплення: а) – епюра згинальних моментів; б) – епюра згинальних моментів від заданого навантаження; в) сумарна епюра згинальних моментів

На першому етапі навантаження відбувається в режимі заданих деформацій до вичерпання вертикальної піддатливості в замках. Цей етап триває поки вибій виробки не посунеться на деяку відстань, яка в залежності від конкретних гірничо-геологічних умов може коливатись від декількох до десятків метрів.

Як показує досвід [10], переміщення контуру виробки в процесі формування зони непружних деформацій можуть досягати величини 0,3 м, що є критичним значенням з точки зору пружнопластичної стійкості приконтурного породного масиву.

На другому етапі, як правило, при досягненні критичних переміщень відбувається раптове підняття порід підосви, що трактується, як втрата пружнопластичної стійкості приконтурного породного масиву. Це явище отримало назву пучіння порід підосви і описується біфуркаційною моделлю [3]. Виміри показують, що після цього припиняються переміщення контуру виробки, окрім порід підосви, а у сформованій області непружних деформацій в породах покрівлі формується зона обвалення, яка переводить механічну систему «кріплення-породний масив» в режим заданого навантаження.

Цей процес в залежності від гірничо-геологічних умов триває від декількох діб до декількох місяців. В результаті відбувається сумування епюр згинальних моментів, і завершальна епюра має вигляд, що є близьким до виміряної в натурних умовах. При цьому сталеве аркове кріплення може або витримати сумарне навантаження, або не витримати і буде зруйноване, тобто отримає незворотні пластичні деформації. Якщо при цьому замкові елементи не будуть зруйновані, то кріплення, не зважаючи на втрату форми, продовжує виконувати своє призначення, зберігаючи таким чином для виробки можливість нормального функціонування.

Висновки. Запропонована геомеханічна модель формування деформацій і навантажень на сталеве аркове кріплення протяжних виробок глибоких вугільних шахт дає можливість оптимізації його форми при якій можна суттєво знизити його металоємність, що на часі є актуальною задачею. Її актуальність викликана тим, що основні металургійні заводи, такі як «Азовсталь» та «Ім. Ілліча», що знаходились в Маріуполі, зруйновані в результаті воєнної агресії Росії, і тепер сталевий прокат типу СВП виготовляється в умовах виробництва, яке менше пристосоване до таких технологічних операцій. Це привело до збільшення вартості такого прокату і, як наслідок, до збільшення вартості проходки підземних виробок на шахтах, збільшенню собівартості вугілля.

Перелік посилань

1. Хоменко, О.Є., Кононенко, М.М., & Савченко, М.В. (2018). *Технологія підземної розробки рудних родовищ*. Дніпро : НТУ «ДП».
2. Кононенко, М.М. (2009). Технологія кріплення бурових виробок в зонах впливу очисних камер. *Геотехнічна механіка*, 81, 127–133.
3. Шашенко, А.Н., Пустовойтенко, В.П., & Сдвижкова, Е.А. (2018). *Геомеханіка*. Київ : Новий друк.
4. Гелескул, М.М., & Каретніков, В.М. (1982). *Довідник з кріплення капітальних та підготовчих гірничих виробок*. Надра.
5. Янковський, О., & Бадюк, О. (2023). «Будівлі склалися та сипалися від авіаударів». Як обгорялися та виживали на заводі імені Ілліча в Маріуполі. *Радіо Свобода*. <https://www.radiosvoboda.org/a/novyny-pryazovya-oborona-mariupolya-zavod-ilicha/32387151.html>
6. Мазуренко, А. (2022). Завод "Азовсталь" знищений практично повністю – "Азов". *Українська Правда*. <https://www.pravda.com.ua/news/2022/04/19/7340745/>
7. Тимошенко, С.П., & Гуд'єр, Дж. (1975). *Теорія пружності*. Наука.
8. Ржаніцин, О.Р. (1982). *Будівельна механіка*. Вища школа.
9. Максимов, О.П. (1973). *Гірський тиск і кріплення виробок*. Надра.
10. Виноградов, В.В. (1983). *Геомеханіка управління станом масиву навколо гірничих виробок*. Наукова думка.
11. Tajduś, A., Cała, M., & Tajduś, K. (2012). *Geomechanika w budownictwie podziemnym i tunelowaniu*. Wydawnictwa AGH, Krakow.
12. Majcherczyk, T., Szaszenko, A., & Sdwiżkowa, E. (2006). *Podstawy geomechaniki*. Wydawnictwa AGH, Krakow.

ABSTRACT

Purpose. Development of an adequate model of steel arch support for underground workings of deep coal mines to assess its stress-strain state.

Methodology. The study of the deformation of steel arch supports in main workings of deep coal mines, comparing them with the results of analytical studies, considering the peculiarities of the time-dependent geomechanical processes in the rock mass near the face, and development a new mechanical model of the deformation of steel arch support during its loading based on this. The research employed methods of structural mechanics, field studies, and statistical processing of field measurement results.

Results. Considering the development of geomechanical processes during the advance of the face, a new two-stage deformation model of steel arch support has been proposed, which operates in the first stage under a regime of specified deformations due to the movement of the contour of the workings, and in the second stage under a regime of specified loading after the loss of stability of the rock at the bottom, which will allow for a reasoned approach to the design of support, justification of its rational form, and ensuring the stability of underground workings in deep mines and quarries.

Scientific novelty. Based on the patterns of deformation of steel support in capital workings, a new two-stage deformation model of steel arch support for capital underground workings in coal mines and quarries has been proposed, which corresponds to the conditions of its operation in real conditions. By analyzing the stress-strain state of the arch support, its possible forms have been justified, which have reduced material consumption and are adapted to specific mining and geological conditions.

Practical significance. The new model of deformation of steel arch support in coal mines will allow for a reduction in the consumption of steel rolled special profiles used for support production, which is scarce under conditions where the main producers of special profiles – metallurgical plants named after Illich and Azovstal, both located in temporarily occupied Mariupol – have been destroyed. This will also reduce the cost of the extracted mineral resources and increase production efficiency.

Keywords: *steel arch support, underground workings, bending moments, deformations, model.*