

- [10] А. А. Вовк, А. В. Михалюк, та В. В. Рудаков, "Керування вибуховим імпульсом при селективному руйнуванні порід з розсіяними кристалічними включеннями", *Вісник академії наук Української РСР*. №1, с. 47- 59, 1984.
- [11] А. С. Баланкин, "Самоорганизация и диссипативные структуры в деформируемом теле", *Письма в ЖТФ*, т. 6, вып. 7, с. 14-20, 1990.
- [12] В. Н. Мосинец и А.В. Абрамов, *Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород*. Москва, Россия: Недра, 1982.
- [13] Г. П. Черепанов, *Механика хрупкого разрушения*. Москва, Россия: Наука, 1974.
- [14] Ю. М. Лахтин и В. П. Леонтьева. *Материаловедение*. Москва, Россия: Машиностроение, 1990.
- [15] Компании «Дау Кемикал» [Електронний ресурс] Доступно: <http://building.dow.com/europe/ru/prod/styrofoam/sfgeo350a.htm>
- [16] Дж. Конглтон и Б. Дентон, "Измерение быстрого роста трещин в металлах и неметаллах", *Механика разрушения. Быстрое разрушение, остановка трещин*, Москва, Россия: Мир, с. 172-198, 1981.
- [17] В. Т. Трощенко, А. Я. Красовский, В. В. Покровский, Л. А. Сосновский, и В. О. Стрижало, *Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочник*. Киев, Украина: Наукова думка, 1994.
- [18] О. О. Фролов, В. З. Ващук, В. Т. Моденко, та А. В. Куляпіна, "Встановлення закономірностей руйнування гірських порід вибухом свердловинних зарядів зі сповільненням", *Вісник Національного технічного університету "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво"*, № 32, с. 44 – 51, 2017.

*Стаття надійшла до редакції 28.04.2017 р.*

УДК 624.22

DOI 10.20535/2079-5688.2017.34.111124

**С.М. Стовпник**, к.т.н., доцент, **О.С. Осипов**, аспірант (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

## **ГЕОМЕХАНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ТЕКТОНІЧНО ПОРУШЕНОГО МАСИВУ НА ПЕРІОД СПОРУДЖЕННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНОГО ТУНЕЛЮ**

**S.N. Stovpnyk, A.S. Osypov** (National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute")

## **THE GEOMECHANICAL CONFIRMATION OF METHODS FOR STABILIZATION OF TECTONIC MASS ROCKS FOR PERIOD OF BUILDING THE TUNNEL OF BIGGEST DIMENSIONS**

*Обгрунтовані параметри ефективних способів закріплення приконтурного масиву, які відповідають на сучасному етапі розвитку тунелебудування: випереджувального кріплення «Екран з труб», комбінованої конструкції рамного кріплення в поєднанні з анкерами «Titan» та набрызкбетоном, запобіжне закріплення забою скловолоконистими анкерами. Результати математичного моделювання були підтверджені інструментальними спостереженнями при будівництві Бескідського тунелю.*

**Ключові слова:** Бескідський тунель; випереджувальне кріплення "екран з труб"; рамне кріплення; армування анкерами; набрызкбетонний шар; приконтурний масив.

*Обоснованы параметры эффективных способов закрепления приконтурного массива, которые соответствуют современному уровню тоннелестроения: опережающего крепления «Экран из труб», комбинированной конструкции рамного крепления в сочетании с анкерами «Titan» и набрызкбетоном, предохранительное закрепление забоя стекловолоконистыми анкерами. Результаты математического моделирования были подтверждены инструментальными наблюдениями при строительстве Бескидского тоннеля.*

**Ключевые слова:** Бескидский тоннель; опережающее крепление "экран из труб"; рамное крепление; армирование анкерами; набрызкбетонный слой; приконтурный массив.

*The parameters of effective methods of fastening the near-boundary massif that correspond to the modern level of the tunneling are justified: the leading fastening "Pipe Screen", combined with the mounting of the frame fastening in combination with the anchors "Titan" and nabrzkbeton, the security fixing of the face with spiked-hanging anchors. The results of mathematical modeling were confirmed by instrumental observations during the construction of the Beskid Tunnel.*

**Keywords:** The Beskid Tunnel; leading fastening "screen of pipes"; frame fastening; reinforcement by anchors; abrasive concrete layer; on - edge array.

**Вступ.** Для розвитку пан-європейського сполучення спільним рішенням Європейської Комісії та уряду України передбачено будівництво Бескідського залізничного тунелю в межах шостого транспортного коридору. Геологічні умови ділянки будівництва характеризуються складною та тектонічно порушеною побудовою масиву (рис. 1), який на припортальних ділянках представлений перемішаними відкладеннями зруйнованих материнських порід. Заглиблена ділянка тунелю почергово перетинає перешаровані ділянки пісковиків та аргілітів, які розділені трьома розламами, заповненими тектонічною глиною. Гірський масив вздовж осі тунелю має наближення до симетричного залягання, що підтверджує його походження у вигляді початкового складкоутворення з наступним руйнуванням порід поверхневими впливами та накопиченням решток у підніжжі схилів. Нашарування порід має переважно субвертикальне розташування, яке перетинається з віссю тунелю з кутами понад  $70^{\circ}$ . Масив має розвинуту тектонічну тріщинуватість, яка має зв'язок з поверхневими водами, що є причиною інтенсивних водопроявів у масиві.

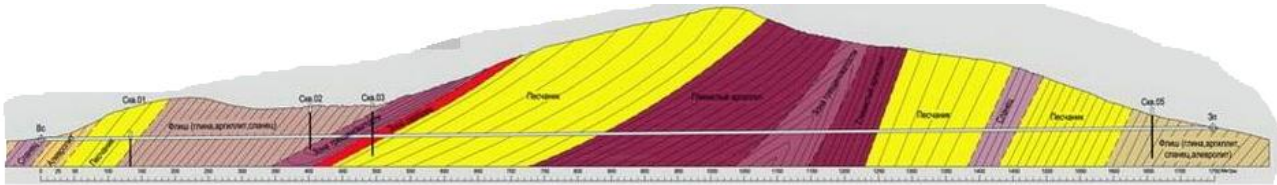


Рис. 1. Геологічний розріз масиву

**Метою роботи** є обґрунтування способів та технологій забезпечення стійкості тектонічно порушеного масиву з можливістю коригування параметрів засобів кріплення в залежності від реакції масиву на безпосереднє спорудження великогабаритного тунелю.

**Актуальність теми** полягає у нормативній невизначеності комбінування способів підтримання в залежності від змін гірничо-геологічних умов у тектонічно порушеному масиві при спорудженні великогабаритної споруди.

**Викладення основного матеріалу.** Головними геомеханічними особливостями спорудження Бескідського тунелю є тектонічно порушений природний стан масиву та штучні зміни, внесені при початковому будівництві одноколісного діючого тунелю, розташованого паралельно споруджуваному на відстані 30 м. Необхідно відзначити, що в період другої світової війни обробка діючого тунелю була зруйнована у трьох місцях підриванням та відновлена у повоєнний період заміною на монолітну залізобетонну конструкцію. Тому для припортальних ділянок і місць флішевого та брекчієвого складання порід запропонована технологія закріплення склепіння методом "захисного екрана з бурових труб" (рис. 2), як найбільш надійного підтримання порід порушеної та перем'ятої структури з повною або частковою втратою зчеплення [1].

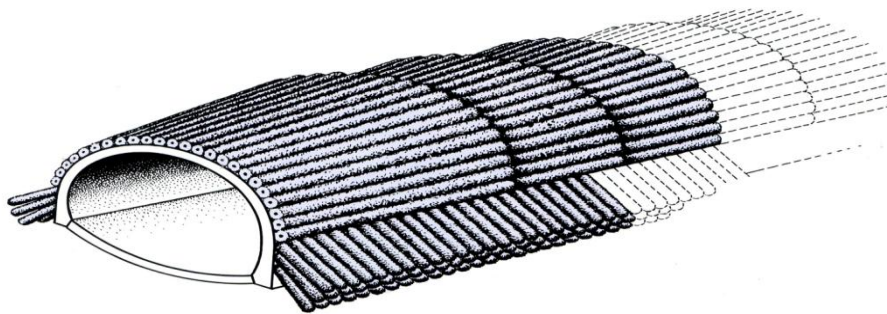


Рис. 2. Влаштування екранного перекриття верхнього склепіння тунелю

До початку виймання порід по контуру майбутньої виробки створюють суцільний захисний "екран" з протампованих бурових труб, під перекриттям якого здійснюється розробка породи та спорудження рамної конструкції. Використання випереджувальних захисних "екранів" дозволяє уникнути вивалювання та обрушення породи, стабілізувати оточуючий гірський масив, зменшити осадження та зсуви контуру.

Додатковими ускладнюючими обставинами, визначаючими стійкість масиву, є необхідність безперервної експлуатації діючого та значні габарити

нового двоколісного тунелю (понад 120 м<sup>2</sup> площі перерізу). Тому для розглянутих умов запропоновано геомеханічний підхід побудови підземної споруди у вигляді заощадливого поступового впливу на масив створенням перерізу тунелю по частинам: спочатку верхня (калотта), потім нижня (штросс), а відповідна реакція оточуючого масиву на кожному етапі порушення стійкості компенсується адаптованим регулюванням опору конструкції кріплення, що для умов слабких порід вперше було запропоновано авторами у роботі [2]. За результатами аналізу світового досвіду будівництва тунелів необхідний взаємозв'язок між технологічним впливом і компенсацією реакції масиву адаптованим кріпленням та може бути реалізований у вигляді різновиду відомого способу "New Austrian Tunneling Method" (NATM), який передбачає поєднання набризкбетону з анкерним кріпленням [3]. Новація полягає у комбінуванні приконтурного зміцнення набризкбетоном з анкерним армуванням масиву та опорними рамними елементами, що дозволяє регулювати опір комбінованої конструкції відповідно до реакції масиву зміною товщини набризкбетону, щільністю армування і глибиною анкерування та встановленням опорних рам з різним кроком, що вперше випробувано авторами в умовах слабких порід [4].

Для визначення початкової реакції масиву на створення калоттної частини тунелю проведено математичне моделювання умов будівництва у геомеханічному програмному комплексі "Abaqus" (модуль Simulia/Explicit) [5], результати якого показані на рис. 3.

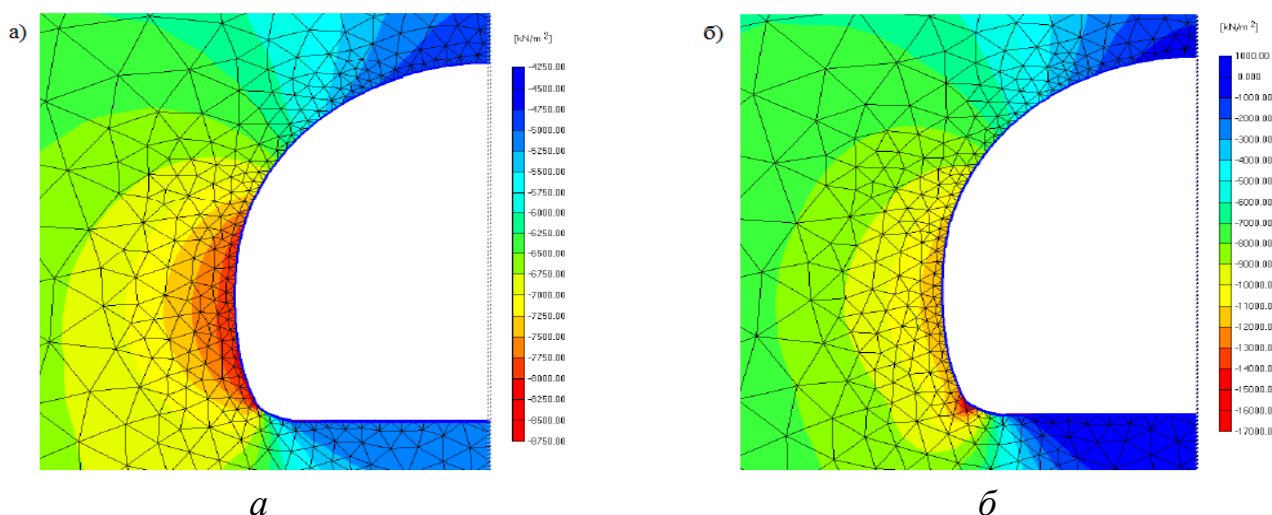


Рис. 3. Розподіл нормальних напруг навколо калотти у аргілітах (*а*) та пісковиках (*б*)

З високим ступенем достовірності (надійність понад 87%) визначено виникнення руйнування приконтурних порід у аргілітах (рис. 3, *а*), та локалізоване – у пісковиках (рис. 3, *б*). Окремо встановлено, що в аргілітах армування масиву виключно анкерами не попереджує вивалоутворення на контурі виробки (рис. 4), але додаткове нанесення зміцнювального шару набризкбетону суттєво його обмежує (рис. 5).

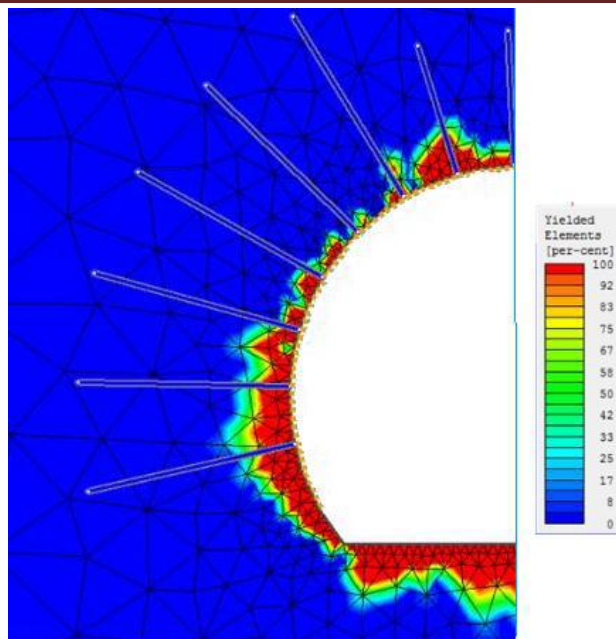


Рис. 4. Зони руйнування приконтурного шару при анкеруванні

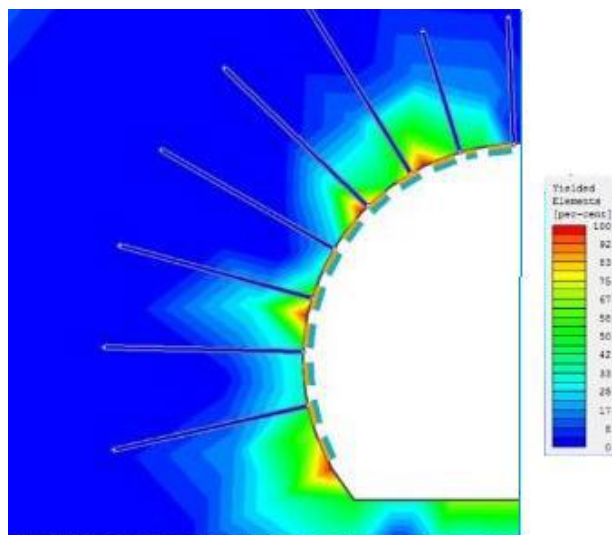


Рис. 5. Зони локалізації руйнувань при комбінованому застосуванні анкерів та набризкбетону

За результатами моделювання визначені показники глибини анкерування (4-6 м), щільності армування масиву (0,8-1,1 анкер/м<sup>2</sup>) та товщини набризкбетону (70-120 мм), які забезпечують стійкий стан породного контуру відповідно для пісковиків та аргілітів. За несучою здатністю обрана конструкція анкерів "Titan" [6], які встановлюються безшпуровим способом (рис. 6). При переході тектонічних зон додається випереджуюче анкерування зі скловолокнистих елементів за методом "Analysis of Controlled Deformations in Rocks and Soils" (ADECO) [7], конструкція яких наведена на рис. 7.

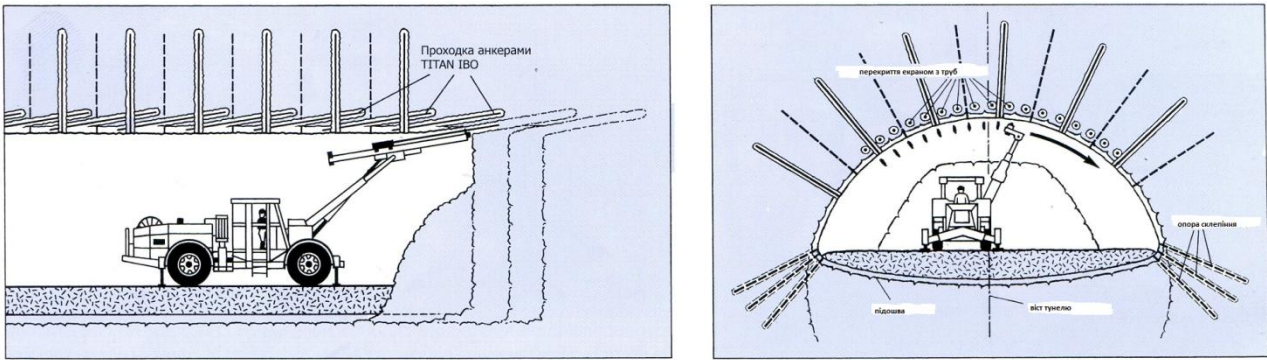


Рис. 6. Встановлення анкерів "Titan" безшпуровим способом та випереджаючого анкерування за методом "ADECO"

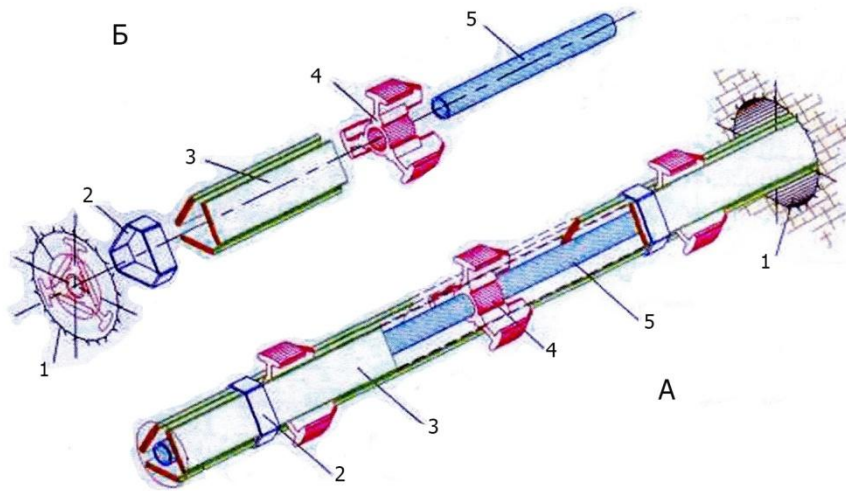


Рис. 7. Конструкція скловолокнистих анкерів "ADECO"

У випадку виходу на контур оголення порід перем'ятої структури, тектонічної тріщинуватості та поверхонь ковзання (рис. 8) перед нанесенням набризкбетону додатково встановлюється решітчатє міжрамне огороження з круглої катанки діаметром 4 мм і віконцем чарунку 100x100 мм, яке покривається бетоном товщиною не менше 30 мм.

Однак врахування додаткових впливів (послаблення несучої здатності глинистих порід при обводненні, буровибуховий спосіб проведення, рух великовагових потягів по існуючому тунелю та ймовірні сейсмічні впливи), які охоплюють значні ділянки масиву (25 м – зона розповсюдження граничних коливань від руху потягів, 120 м – вплив динамічного імпульсу вибуху, 3-6 км – довжина різноамплітудної сейсмічної поверхневої хвилі), визначили необхідність посилення розглянутої конструкції.

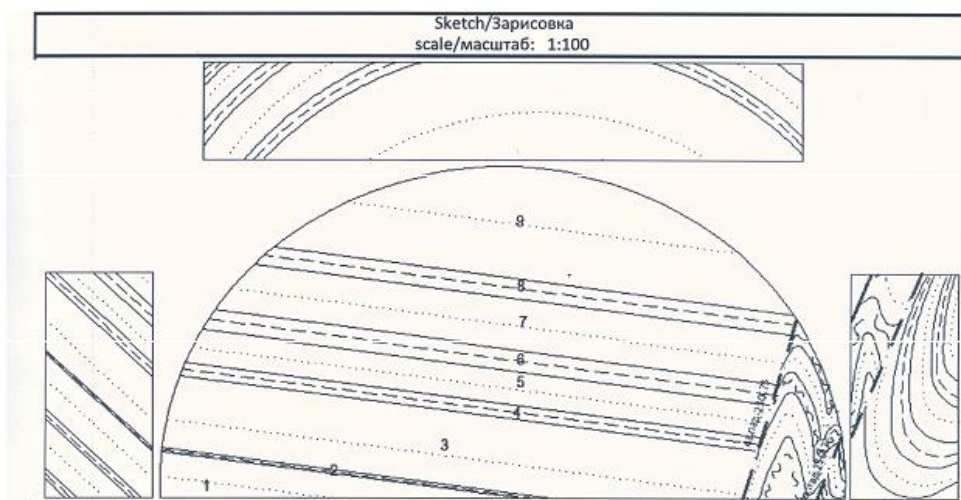


Рис. 8. Геологічний розріз по призабійним поверхням (ПК16364+25 м)

Оцінка ступеня впливу комбінації збурень від буровибухових робіт (одночасне підривання до 60 кг амоніту №6ЖВ), короткочасових (рух потягів вагою 1500-1700 т зі швидкістю 30-40 км/год.) та сейсмічних коливань (4-8 балів від зони Вранча у 100 км) складає 0,2...0,8 МПа [8]. Це однозначно вказує, що несучої здатності системи "набризкбетон-анкер" (0,3-0,6 МПа) для збереження стійкості оточуючого масиву недостатньо. Тому розглянуто посилення кріплення додаванням рамної конструкції з двотаврового профілю №24 для аргілітів та арматурного каркасу (3x36 мм) для пісковиків, що надає можливість жорсткого закріплення хвостових частин анкерів на рамі і, тим самим, створити спільну опорну поверхню для анкерів, забезпечуючи їх інтегральну реакцію навантаженням від гірського тиску з додаванням регульованого опору рамної конструкції на повну глибину зони армування оточуючого масиву. Розрахунки такої конструкції виконано у програмному комплексі "PLAXIS" [9]. Розрахункова схема конструкції комбінованого кріплення, що забезпечує сумісне деформування системи "масив-конструкція", наведена на рис. 9. Результати розрахунків наведені на рис. 10-12.

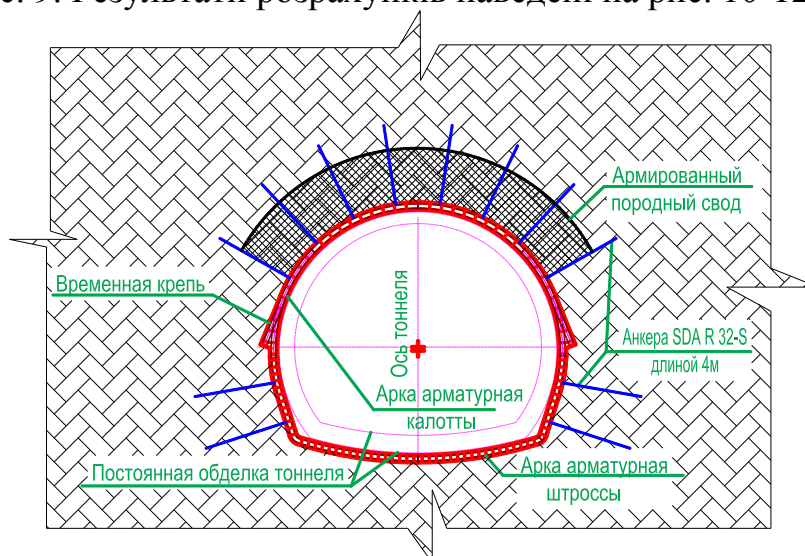


Рис. 9. Розрахункова схема комбінованої конструкції кріплення

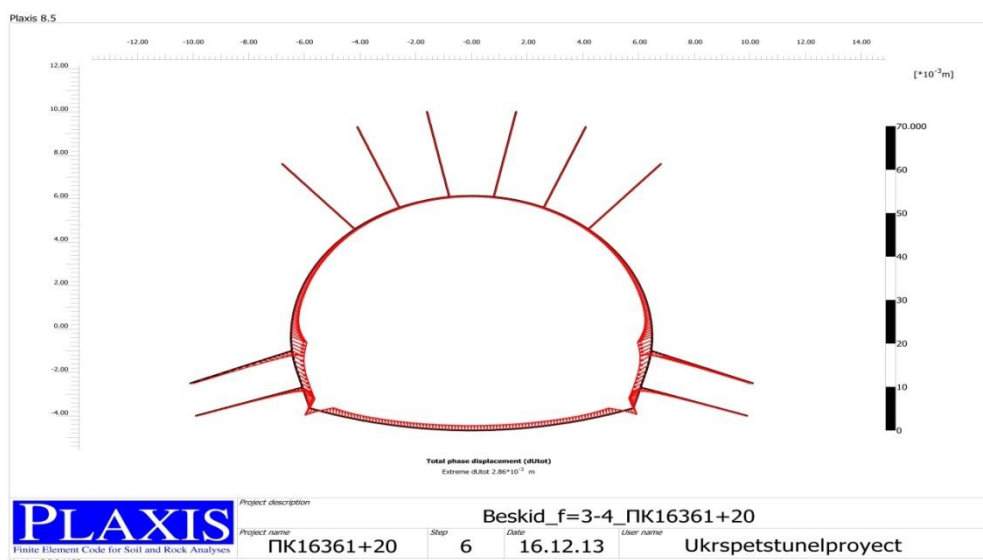


Рис. 10. Загальні переміщення закріпленого контуру на ПК 16361+20 м

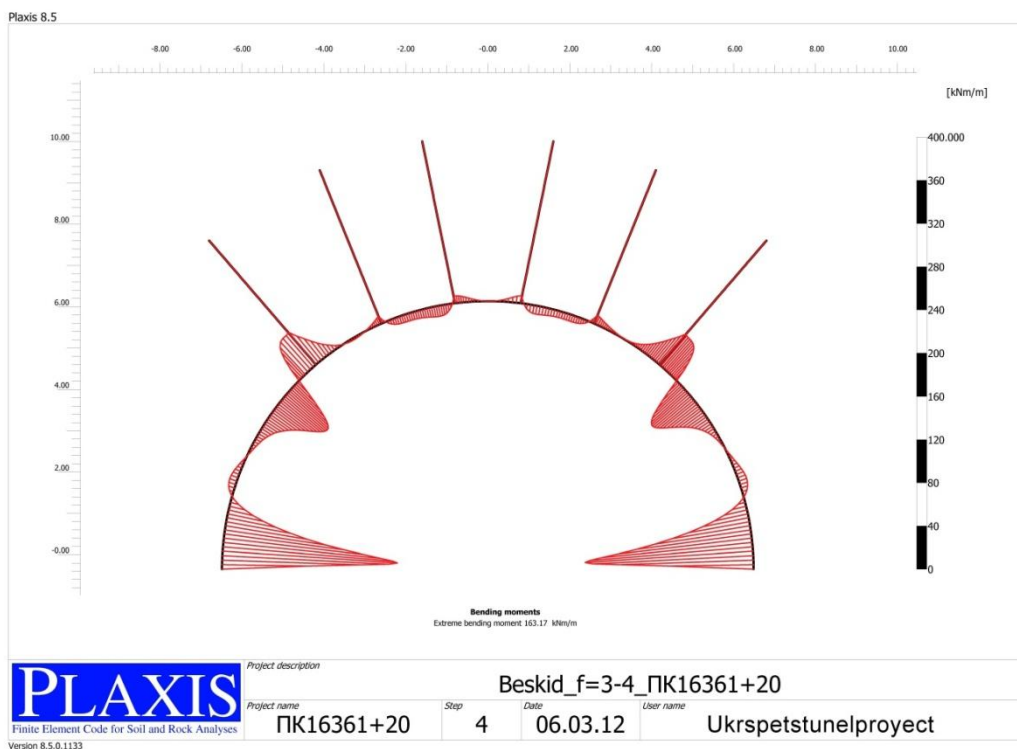


Рис. 11. Епюра моментів для кріплення калотти на ПК 16361+20 м

Загальна несуча здатність комбінованої конструкції при замкнутому обрисі рами складає 1,1...1,8 МПа для кроку 0,7...1,2 м, що перекриває можливі впливи вибухових робіт та коливань від руху потягів. Довготермінова дія послаблення порід від зволоження врахована створенням будівельного зазору між тимчасовою і постійною обробкою на період будівництва в межах 200 мм. Потужні сейсмічні коливання можливі у районі тунелю із ймовірністю один раз на тисячу років, тому в період будівництва (до 5 років) їх прояви малоімовірні, для захисту від проявів середньої потужності (до 5 балів) в залізобетонній конструкції постійної обробки передбачено створення трьох "пластичних шарнірів" (в склепінні та п'ятах) [10].



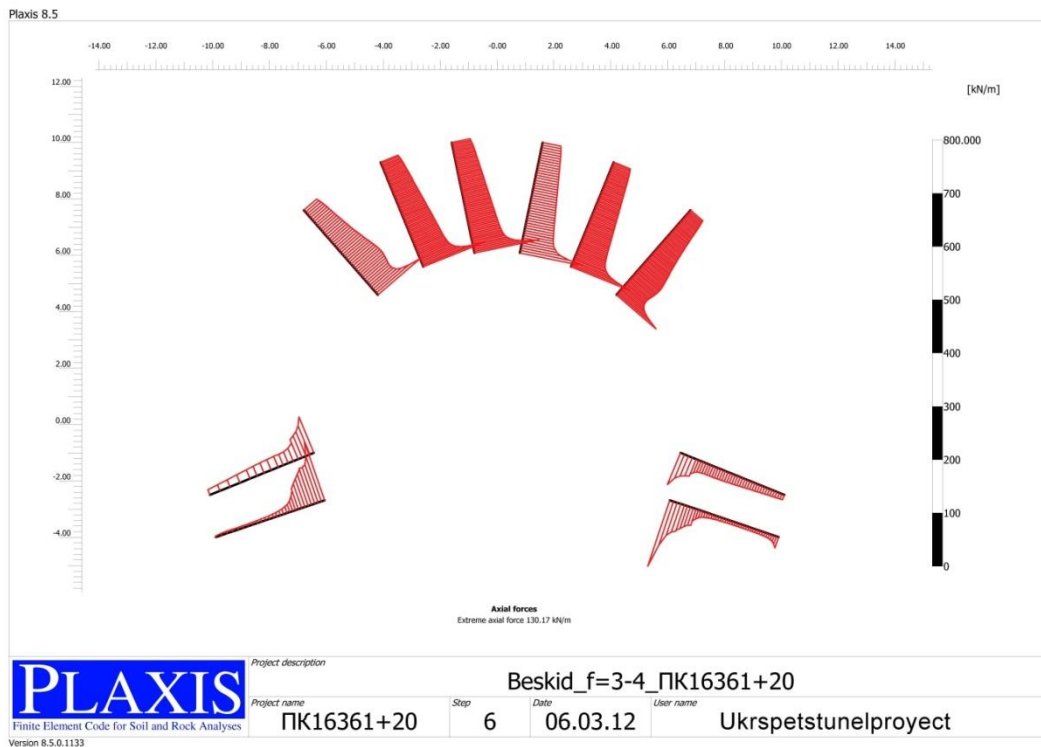


Рис. 12. Епюра поздовжніх сил анкерного армування на ПК 16361+20 м

В процесі спорудження тунелю виконувався геомоніторинг поведінки масиву та конструкцій кріплення, який забезпечувався інструментальними спостереженнями за зрушеннями закріпленого контуру (у світлі) на 5-ти спеціально обладнаних замірних станціях (рис. 13), періодичні зйомки на яких виконувались з високою точністю лазерними тахеометрами. Результати спостережень наведені на рис. 14.

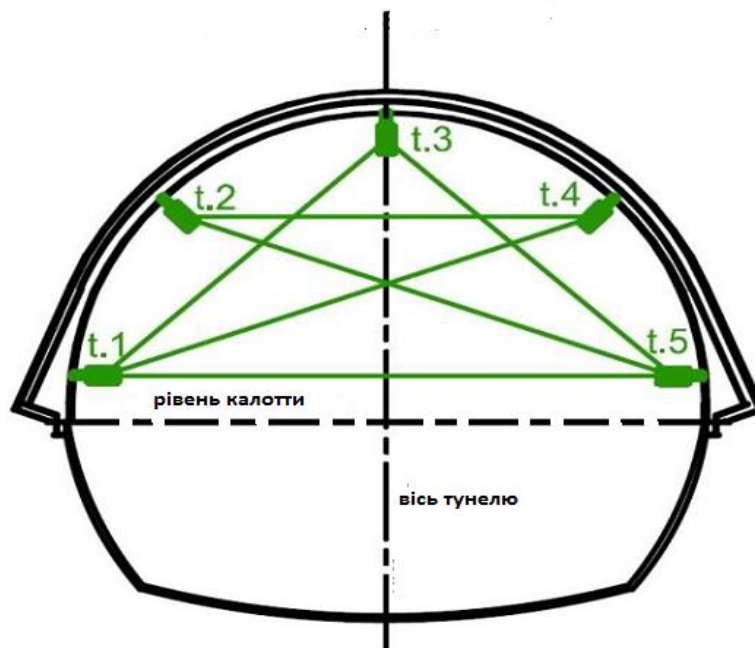


Рис. 13. Розташування деформаційних марок та схема вимірів у перерізі

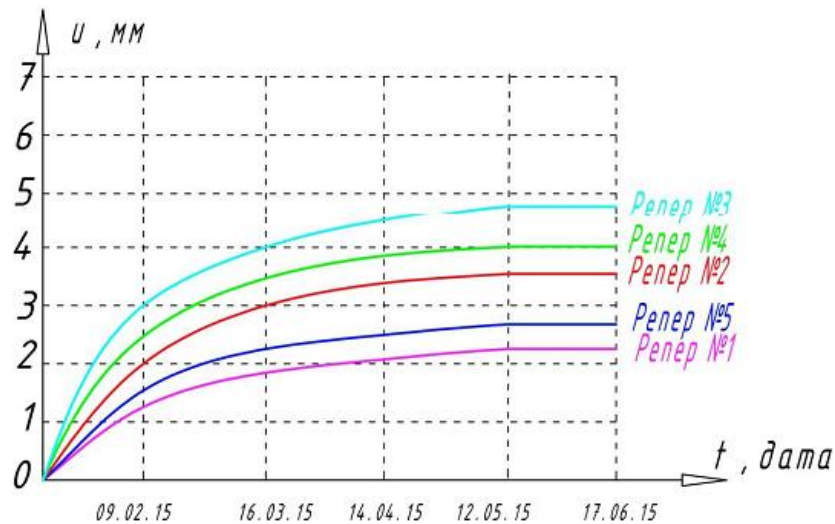


Рис. 14. Зміщення контуру кріплення калотти на ПК 16361+20 м

Аналіз результатів спостережень показує, що навантаження гірського тиску сформувалися впродовж 3 місяців від спорудження тунелю та сприйняті конструкцією кріплення в межах пружного режиму деформування, що забезпечило стійкий стан оточуючого масиву до моменту спорудження постійної обробки (впродовж 2017 року). Загальні зрушення внутрішнього контуру тимчасової конструкції не перевищили 14-27 мм (без врахування початкових переміщень контуру оголення порід до моменту монтування кріплення).

В цілому, застосована комбінована конструкція "рама-анкер-набризкбетон" забезпечила геомеханічну стійкість тектонічно порушеного масиву на період будівництва великогабаритного тунелю.

### Висновки

Для складних гірничотехнічних умов будівництва Бескідського тунелю обґрунтовано засоби забезпечення стійкості масиву:

- поетапне створення перерізу тунелю поділом на калоттну та штроссову частини;
- застосування комбінованої конструкції "рама-анкер-набризкбетон" для створення адаптованого опору кріплення на реакцію масиву при оголенні;
- випереджуюче кріплення «Екран із бурових труб» для нестійких порід, в зонах тектонічних розламів та скидів, при оголенні порід з порушеним зчепленням;
- закріплення масиву в забої проведення використанням скловолокнистої арматури (метод ADECO);
- висновки моделювання сумісного деформування комбінованої конструкції з масивом підтверджені результатами інструментальних спостережень

---

**Посилання**

- [1] О. М. Львова, и К. Ю. Павлович «Применение защитных экранов из труб при строительстве подземных сооружений в Санкт-Петербурге» *Инженерно-строительный журнал*, №7, с. 6-9, 2009.
- [2] С. М. Стовпник «Поэтапное возведение замкнутых крепей на шахтах Западного Донбасса» *Уголь Украины*, №4, с. 7-8, 2006.
- [3] W. Wittke, V. Pierau, and C. Erichsen *New Austrian Tunneling Method (NATM) — Stability Analysis and Design*. Germany: Aachen, 2002.
- [4] С. М. Стовпник «Создание армопородных конструкций вокруг выработок, поддерживаемых в неустойчивых породах», *Уголь Украины*, №11, с. 12-16, 2007.
- [5] Y. I. Xiaodong, and L. I. Yuanyuan «Simulation and Measurement Analysis of NATM Tunnel Construction Method», *Mining and Underground Engineering Surveyin*, P. 10, 2012.
- [6] Atlas Copco Rock Reinforcement Products. [Online]. Available: [www.dywidag.co.uk](http://www.dywidag.co.uk).
- [7] L. Pietro *Design and construction of tunnels Analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS)*. Germany, Berlin: Springer, 2008.
- [8] В. Е Меркин, В. В. Чеботаев, и И. В. Гиренко *Временные технические условия по проектированию и строительству перегонного тоннеля НАТМ*. Россия, Москва: НИЦ ТМ ОАО ЦНИИС, 1998.
- [9] N. El. Houari, M. A. Allal, and N. Abou Bekr «Numerical Simulation of the Mechanical Response of the Tunnels in the Saturated Soils by Plaxis», *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 5, №1, P. 31, 2011.
- [10] И. И. Улицкий, и А. А. Ривкин *Железобетонные конструкции. Расчет и конструирование*. Украина, Киев: Будівельник, 1972.

Стаття надійшла до редакції 01.08.2017 р.