

УДК 624.21 + 624.19(066)

**С. В. Зайченко, к. т. н., доц., Є. А. Загоруйко, к. т. н., асс., С. М. Стовпник, к. т. н., доц., (НТУУ «КП»)**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЛИКОВОГО УЩІЛЬНЕННЯ ПРИ  
БУДІВНИЦТВІ ТУНЕЛЮ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
(MSE)**

---

---

**S. V. Zaichenko, cand. sc. (tech.), ass. prof., Ye. A. Zahoruiko, cand. sc. (tech.)  
ass., S. M. Stovpnyk, cand. sc. (tech.), ass. prof. (NTUU «KPI»)**

**RESEARCH OF EFFICIENCY ROLLER COMPACTION DURING  
CONSTRUCTION OF THE TUNNEL BY FINITE ELEMENT METHOD  
(FEM)**

*Досліджено напружено-деформований стан ґрунтового масиву прилеглого до контуру виробки при різних способах зведення кріплення з метою встановлення ефективності запропонованих нових технологічних схем будівництва. При дослідженні використано програмні модулі PLAXIS і SOLIDWORKS, що дозволило розглянути поведінку елементів кріплення в пружній і пластичній постановці. В якості варіантів, які пройшли порівняння, використано типову схему зведення збірною залізобетонного кріплення, схему збірною кріплення з ущільненням бетону закріпного простору і схему будівництва з формування геотехнічних властивостей прилеглого ґрунтового контуру тунелю. Аналіз отриманих числових рішень MCE дозволив підтвердити високу ефективність запропонованих способів зведення тунелю.*

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, категорія стійкості породи, роликовий метод ущільнення.

*Исследовано напряженно-деформированное состояние ґрунтового массива прилегающего к контуру выработки при различных способах возведения крепи с целью установления эффективности предложенных новых технологических схем строительства. При исследовании использованы программные модули PLAXIS и SOLIDWORKS, что позволило рассмотреть поведение элементов крепления в упругой и пластической постановке. В качестве вариантов прошедших сравнения, использовано типичную схему возведения сборного железобетонного крепления, схему сборного крепления с уплотнением бетона и схему строительства с формированием геотехнических свойств прилегающего ґрунтового контура тоннеля. Анализ полученных числовых решений МКЭ позволил подтвердить высокую эффективность предложенных способов возведения тоннеля.*

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, категория устойчивости породы, роликовый метод уплотнения.

*The stress -strain state of rock mass adjacent to the contour generation at various ways of lining construction to determine the effectiveness of the proposed construction of new technological schemes. In the study of software modules used PLAXIS i SOLIDWORKS, that allowed us to consider the behavior of fastening elements in the elastic and plastic formulation. As variants of previous comparison, the typical scheme used precast concrete erection fixing, fixing scheme with precast concrete and seal construction scheme with the formation of geotechnical properties of soil*

*adjacent loop tunnel. Analysis of the numerical solutions of the FEM has confirmed the high efficiency of the proposed method of construction of the tunnel.*

**Key words:** *stress-strain state, category stability rock, roller compaction method.*

**Вступ.** При вирішенні транспортних і комунікаційних завдань сучасного міста зведення кріплення тунелю щитовим способом представляє складний процес, який складається з цілого ряду взаємопов'язаних технологічних операцій, що виконуються в складних інженерно-геологічних умовах. Передумовою істотного розширення застосування щитового способу зведення тунелів є використання тунелепрохідницьких агрегатів з роторним робочим органом. Застосування останніх дозволяє проводити спорудження тунелів у нашаруваннях ґрунтів без зміни загальної технології будівництва, забезпечити безперервний високопродуктивний цикл робіт, високий рівень автоматизації, зведення до мінімуму впливу на навколишнє середовище, безпеку будівництва. Саме тому на основі даного типу машин запропонована реалізація технології зведення кріплення тунелю методом роликового ущільнення, яка дозволяє за рахунок зміцнення підвищити стійкість приконтурного ґрунтового масиву, що покращує експлуатаційно-технічні показники спорудження.

Роликовий метод ущільнення відповідає вимогам безперервного процесу, при якому зони, в яких відбуваються формування, можуть пересуватись разом з робочими органами формувальної секції прохідницького щита відносно ґрунтового масиву, на поверхні якого залишається відформований шар кріплення. Формувальні секції прохідницького щита можуть виконувати або всі, або частину операцій, що входять до технологічного процесу зведення кріплення тунелю: подавання сумішей в зону формування, рівномірний її розподіл і калібрування шару, попереднє і остаточне ущільнення ґрунтового масиву і матеріалів кріплення тунелю, опорядження лицьової поверхні.

Перевагою безперервної технології зведення кріплення є можливість повної механізації процесу пошарового формування, низька металоємність обладнання, високі показники якості монолітного кріплення, соціальна привабливість виробництва в цілому.

Реалізація роликової безперервної технології пошарового зведення кріплення можлива з комбінацією наступних елементів обробки:

- шару прилеглого контуру ґрунту з формованими новими геотехнічними властивостями;
- шару будівельної суміші між ґрунтовим масивом і збірним кріпленням;
- монолітного або збірного кріплення тунелю.

**Аналіз стану проблеми.** Для встановлення ефективності запропонованої технології роликового формування приконтурного ґрунтового масиву необхідно дослідити напружено-деформований стан елементів, що складають систему «масив-кріплення» при різних варіантах застосування технології.

Рішення деформаційних задач геомеханіки під дією різних типів навантажень з врахуванням контактних особливостей взаємодії кріплення з ґрунтами на основі припущення лінійного зв'язку деформацій і напружень

дозволило використати методи теорії пружності. Серед різних числових методів рішень задач теорії пружності найбільш досконалим є метод скінченних елементів (МСЕ) [1-4], що зумовило появи цілої низки потужних інженерних іноземних (Solid Works, PLAXIS, ABAQUS, ANSYS, ZSOIL) і вітчизняних (ПК Ліра, ПК Мономах) програмних комплексів. Розвиток математичного апарату МСЕ і розрахункових засобів дозволяє вирішувати тривимірні задачі геомеханіки в нелінійній постановці [5].

**Мета роботи.** Визначення ефективності запропонованого методу зведення тунелю шляхом побудови адекватної комп'ютерної моделі поведінки ґрунтового масиву і елементів кріплення з використанням МСЕ.

**Матеріали і результати досліджень.** Для моделювання поведінки прилеглого ґрунтового масиву і елементів кріплення при різних варіантах реалізації роликового методу зведення кріплення тунелю при дії на нього постійних, тимчасових навантажень і впливів використано моделі Мора-Кулона (Mohr-Coulomb Model) і пружну модель Гука (Hook), які застосовано в програмних комплексах Solid Works і PLAXIS. Значення фізико-механічних параметрів ґрунтів обирались з даних отриманих при дослідженнях міцнісних і деформаційних характеристик оброблюваних середовищ і паспортних даних типового проекту будівництва тунелю. Два варіанти рішення в різних програмних комплексах дозволять позбутися помилок розрахунків, які пов'язані з ідеалізацією пластичними і пружними моделями властивостей полідисперсних багатокомпонентних середовищ.

Визначення реальних абсолютних значень параметрів напружено-деформованого стану методом скінченних елементів ускладнюється ідеалізацією властивостей елементів розрахункових схем, зміною реальних геологічних умов і навантажень, як уздовж траси, так і в часі, що практично унеможливорює отримання достовірних значень напружень і деформацій та дозволяє виконати лише якісний аналіз шляхом порівняння отриманих рішень при різних способах зведення тунелю.

Розміри збірної кріплення відповідають проекту зведення тунелю щитом фірми "Herrenknecht AG" S-402: зовнішній діаметр  $\varnothing 6100$ , внутрішній  $\varnothing 5500$  мм. Товщина простору між збірним кріпленням і ґрунтовим масивом 130 мм, відповідно зовнішній діаметр  $\varnothing 6360$  мм. Глибина шару ущільненого ґрунтового масиву склала 200 мм.

Кріплення тунелю представлено як збірна конструкція окремих елементів (тубінгів) з характеристиками залізобетону марки В40, що дозволяє розглядати її як об'ємний елемент з заданою товщиною.

Розрахункова модель дозволяє дослідити переміщення елементів кріплення при навантаженні, та встановити категорію стійкості породи [3].

Завдання основних постійних, тимчасових навантажень і впливів проводилось за рекомендаціями ДБН В.2.3-14:2006 "Мости та труби. Правила проектування." (СНиП 2.05.03-84), ДБН В.2.3-7-2003 "Метрополітени." (СНиП П-40-80), відповідно до яких система, яка досліджується розглядалась у гравітаційному полі, що створює вертикальне і горизонтальне напруження

грунта, силу ваги елементів конструкції. Тимчасові навантаження від рухомого складу з кожного шляху - у вигляді поїзда розрахункової довжини, що складається з чотиривісних вагонів загальною вагою кожного завантаженого вагона 588 кН. Контур ґрунтового масиву в розрахункових схемах закріплено з низу абсолютно жорстко, а бокові поверхні мають можливість вертикального переміщення (тип з'єднання - рухома опора).

З метою порівняння можливих варіантів реалізації запропонованої роликвої технології без суттєвої зміни геометричних параметрів контактуючих поверхонь обрано три варіанти:

- типовий проект зведення збірного кріплення тунелю (рис. 1, а, б);
- роликве ущільнення закріпного простору тунелю зі збірним кріпленням (рис. 1, в, г);
- комбінацію ущільнення прилеглого ґрунтового контуру і бетонної суміші в закріпному просторі тунелю (рис. 1, д, е).

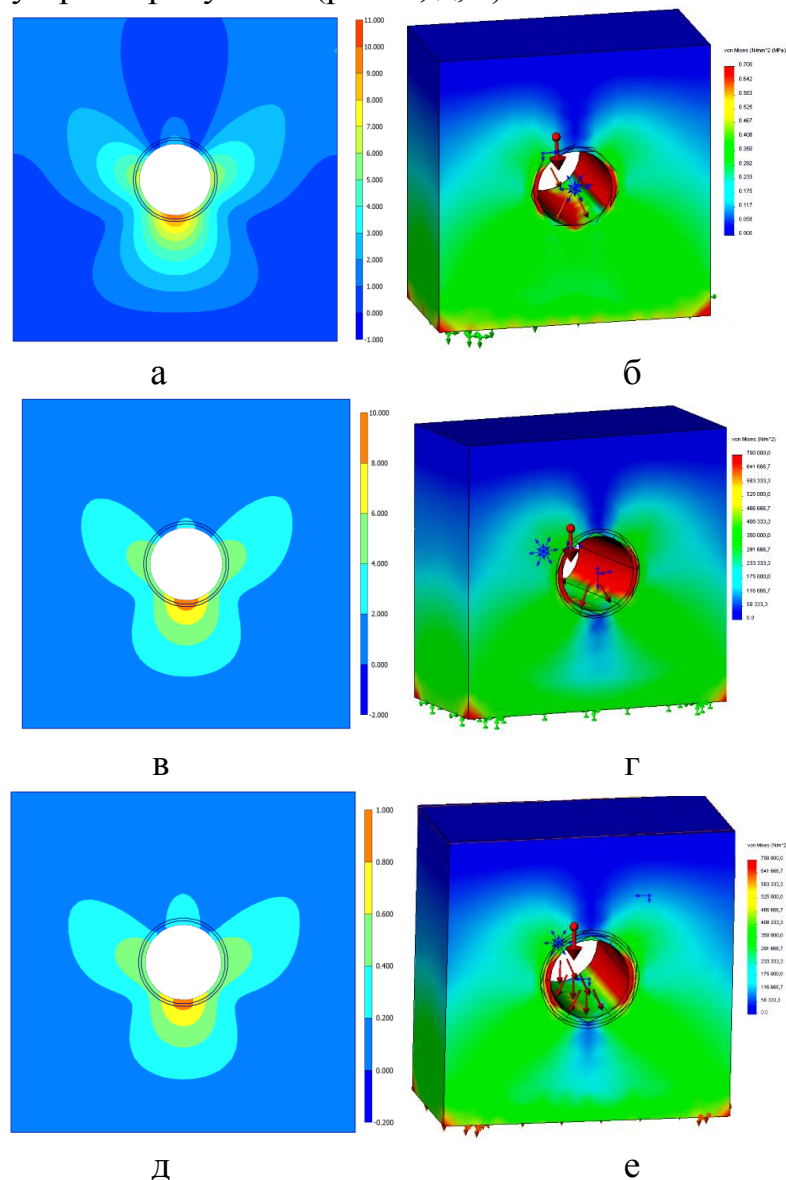


Рис. 1. Деформації (Plaxis) (а, в, д); напруження (SolidWorks) (б, г, д) для різних варіантів кріплення

Порівняння отриманих результатів за різним способом зведення тунелю (рис. 1, а, б і в, г) дозволяє відзначити зменшення інтенсивності напружень, деформацій і переміщень від дії навантажень в випадку ущільнення будівельної суміші закріпного простору тунелю.

Напруження і деформації ґрунтового масиву зменшуються в середньому в 1,5 рази з максимальним зменшенням в зоні дії тимчасових навантажень в 4 рази. Осадка тунелю в випадку пружної постановки задачі зменшується в 2,5 рази, що пов'язано з перерозподілом напружень і деформацій викликаних підвищенням жорсткості конструкції в цілому за рахунок зміцнення шару бетону навколо збірного кріплення. При використанні пластичної моделі Кулона-Мора результати показують менші значення різниці (в межах 15 %).

Результати наступного етапу досліджень впливу роликового ущільнення на взаємну поведінку кріплення і ґрунтового масиву при ущільненні шару бетонної суміші закріпного простору тунелю і прилеглого шару на рис. 1. д, е. Аналіз отриманих результатів при вирішенні задачі в пружній постановці (SolidWorks) практично повторює попередні данні з меншими (в межах 10 %) значеннями. Про те, рішення задачі при використанні пластичної моделі свідчить про суттєву різницю отриманих результатів з попередніми двома схемами кріплення. При порівнянні результатів програмного модулю PLAXIS напруження зменшились на 45%, а деформації в більше ніж 11 разів. При порівнянні результатів SolidWorks напруження зменшились на 40%, а деформації в більше ніж 10 разів. Переміщення контуру кріплення зменшились на 27 % і 20% відповідно до попередніх схем зведення тунелю. Суттєва різниця отриманих результатів пояснюється можливостями програмного комплексу PLAXIS врахувати при контактній взаємодії кріплення і ґрунтового масиву пластичний характер деформацій останнього. Враховуючи дану особливість та результати моделювання можна стверджувати про перехід пластичних (поза-граничних) деформацій в пружні на межі контактного шару ґрунта, завдяки збільшенню площі контактної поверхні (на 7%) утвореної шаром ущільненого ґрунту.

Одним з інтегральних критеріїв, які характеризують категорію стійкості являється осадка поверхні покрівлі незакріпленої виробки при дії постійних навантажень (СНиП П-94-80), що дозволяє з'ясувати ефективність роликового ущільнення прилеглого контуру тунелю відносно загальноприйнятої класифікації.

З метою визначення осадки поверхні покрівлі незакріпленої виробки проведено дослідження прилеглого ґрунтового масиву незакріпленої виробки при дії постійних навантажень без ущільнення і з роликовим ущільненням прилеглого контуру MCE (SolidWorks) (рис. 2). Результати дослідження поведінки ґрунтового масиву підтверджують категоричність стійкості осадочних порід, як дуже нестійкі, що потребують суттєвих заходів до їх закріплення (рис. 2, а). Застосування роликового ущільнення прилеглого контуру тунелю значно змінює розподіл переміщень в сторону зменшення (на 90 %), що переводить оброблений ґрунт з IV(дуже нестійкі) категорії в III (нестійких), що дозволяє

аналогічно випадку торкретування поверхні виробок, яке супроводжується зміною властивостей породи, зменшити (на 50 мм) товщину кріплення.

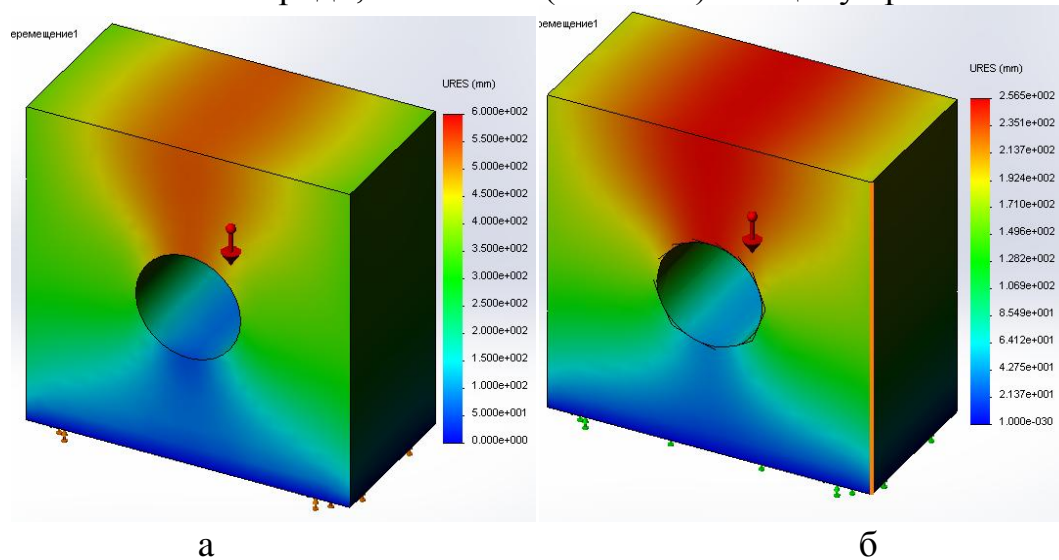


Рис. 2. Схема розподілів переміщень ґрунтового масиву без ущільнення (а) і з ущільненням прилеглого контуру (б)

### Висновки

Зменшення товщини кріплення для роликowego пошарового методу будівництва складе економію бетону  $0,95 \text{ м}^3$  на один метр тунелю. Яке в комплексі з застосуванням жорстких сумішей ( $B/C=0,3$ ) для закріпного простору дасть сумарний ефект більше 1740 грн. на один метр тунелю тільки за рахунок економії матеріалів (без врахування накладних витрат).

### Список використаних джерел

1. Zenkevich O. Metod konechnyh jelementov v teorii sooruzhenij i v mehanike sploshnyh sred: nauchnoe izdanie / O. Zenkevich, I. Chang; red. Ju. K. Zareckij; per.: O. P. Troickij, S. V. Solov'ev. - M.: Nedra, 1974. - 240 s.
2. Fadeev A.B. Metod konechnyh jelementov v geomehanike / A. B. Fadeev. - M.: Nedra, 1987. - 221 s.
3. Baklashov I.V. Geomehanika: v 2-h t. (dop.) / I.V. Baklashov, B.A. Kartoziya, A.N. Shashenko, V.N. Borisov. - M.: izd-vo MGGU, 2004 - .T. 2: Geomehanicheskie processy / I. V. Baklashov, B.A. Kartoziya, V.N. Borisov. - 249 s.
4. Varvak P. M. Metod konechnyh jelementov / P.M. Varvak, I.M. Buzun, A.S. Gorodeckij, V.G. Piskunov, Ju.N. Toloknov; pod red. P.M. Varvaka. - Kiïv: Vishha shkola, 1981. - 176 s.
5. Zuyevska N.V. Naukovi osnovy formuvannya heotekhnichnykh vlastyvostey prosidnykh masyviv z urakhuvannyam hidrotermalnoho faktoruv: Avtoref. dys. dok. tekhn. nauk: 05.15.09 / N.V. Zuyevska ; NTTUU «KPI». — K., 2011. — 37 s.

*Стаття надійшла до редакції 14.05.2014 р.*