

УДК 624.191.22

ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ЗАКРІПЛЕННЯ ПРИКОНТУРНОГО МАСИВУ ПІДЗЕМНИХ ВИРОБОК У СКЛАДНИХ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ

Розглянуті найбільш ефективні та актуальні методи закріплення приконтурного масиву, які відповідають сучасному розвитку тунелебудування, вимогам «високих технологій», а саме: метод випереджувального кріплення «екран із труб» («Umbrella»), закріплення приконтурного масиву із забою гірничої виробки з використанням скловолокнистої арматури (метод Analysis of Controlled Deformations in Rocks and Soils «метод A.DE.CO.-RS.»), піддатливе кріплення в поєднанні з анкерами «Titan», струменева цементация «Jet Grouting». Виконаний аналіз досвіду застосування та використання цих технологій закріплення гірських порід, які забезпечують задану ефективність технічних рішень у конкретних інженерно-геологічних умовах.

The most effective and current methods of securing circuit array that meet at the present stage of development of the tunnelling requirements of «high technology», namely: the method of advancing the attachment «Umbrella», securing the circuit array of the bottom of excavation with the use of glass fiber reinforcement (Analysis of Controlled Deformations in Rocks and Soils method, «A. DE.CO.-RS method»), combination with the anchors «Titan», cementation «Jet Grouting». Was the analysis of the experience of application and areas of use of these technologies, the consolidation of the rocks, which provide a predetermined effectiveness of the technical solutions in specific geological conditions.

Ключові слова: цементация, підземна виробка, випереджувальне кріплення, новітні технології, приконтурний масив, анкерне кріплення.

Іntenсивне освоєння підземного простору міст і мегаполісів, розвиток транспортної інфраструктури потребує будівництва тунелів, нових станцій метрополітену. За цих умов особливої актуальності набуває питання забезпечення стійкості гірничих виробок великого перерізу в умовах щільної міської забудови з розгалуженою мережею підземних інженерних комунікацій. При проектуванні підземних споруд у складних інженерно-геологічних умовах часто застосовуються методи армування (закріплення) приконтурного масиву. Очевидною перевагою закріплення є його екологічна безпека, технологічність, довговічність, економічна привабливість. Геологічні умови характеризуються неоднорідністю, що обумовлює необхідність використання різних технологічних рішень для закріплення геомасиву.

Метою роботи є огляд сучасних методів та технологій закріплення приконтурного масиву та аналіз їх використання в конкретних інженерно-геологічних умовах.

Наразі найбільш ефективними методами закріплення приконтурного масиву є такі, як метод укріплювальної цементация масивів розчинами, що нагнітаються під високим тиском; застосування набризкбетону по контуру оголення, піддатливе набризкбетонне кріплення з використанням анкерів будь-якої конструкції; випереджувальне кріплення «екран із труб»; закріплення приконтурного масиву із забою гірничої виробки з використанням скловолокнистої арматури; струменева цементация «Jet Grouting».



Н.В. Зуєвська
професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор



С.М. Стовпник
доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», к.т.н.



О.С. Осипов
інженер проектного інституту «Укрспецтунельпроект», аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Метод укріплювальної цементация масивів розчинами, що нагнітаються під високим тиском, полягає в омоноличуванні і зміцненні ін'єкційними розчинами тріщинуватих гірських порід, що залягають навколо виробки. Укріплювальна цементация підвищує міцність і деформаційні властивості гірського масиву в приконтурній зоні, а також зменшує ступінь анізотропності порід і прояви непружних деформацій.

Укріплювальна цементация виконується в три черги:

- свердловини 1-ї черги буряться в непарних розрізах уздовж виробки по периметру з необхідними кроком та глибиною;
- свердловини 2-ї черги буряться в парних розрізах уздовж виробки у шахматному порядку по відношенню до свердловин 1-ї черги;
- свердловини 3-ї черги буряться у шахматному порядку між свердловинами 1-ї та 2-ї черги в кожному розрізі.

Свердловини 1-ї черги цементуються в залежності від інженерно-геологічних умов під тиском приблизно 15 кг/см², 2-ї черги – 20 кг/см², 3-ї – 40 кг/см².

Цементация починається при водоцементному співвідношенні, показник якого дорівнює 10, з поступовим зниженням цього показника до 0,6. Деформативні властивості закріпленого масиву перевіряються геофізичними методами (ультразвуковим профілюванням) по розрізах через кожні 70–150 м по довжині виробки. Цементация дозволяє в середньому на 30–40 % збільшити модуль деформації та в 1,3–1,4 раза зменшити анізотропію порід по периметру виробки.

Цей метод добре зарекомендував себе в тріщинуватих або неоднорідних (шаруватих, блочних) скельних породах середньої міцності та міцних.

При застосуванні **набризкбетону по контуру оголення** головним є забезпечення міцного контакту бетону, що швидко зчіплюється з поверхнею породи в процесі кольматації частинок дрібнозернистої суспензії в тріщини приконтурного масиву [2].

Покриття із набризкбетону застосовують для кріплення гірничих виробок та для запобігання окремих вивалів та вивітрювання порід. Використання набризкбетону відкриває великі можливості для удосконалення будівництва підземних виробок різного призначення. При цьому обладнання для набризкбетонних робіт є одним із важливих чинників успіху. Збалансоване використання кваліфіковано підібраного складу бетонної суміші, високоякісних добавок, а також відповідного обладнання дає змогу створити масив ґрунту з високими характеристиками міцності та деформативності. Сучасні роботизовані установки з маніпуляторами контролюють та корегують (за необхідності) усі параметри процесу набризкбетонування та надають усю необхідну інформацію про склад нанесеного матеріалу, об'єм бетону, кількість цементу та добавок у конкретний період роботи,

а також такий важливий параметр, як товщина шару набризкбетону, яку завжди необхідно контролювати.

Метод набризку достатньо широко застосовується (від тріщинуватих напівскельних до скельних порід) завдяки механізації та автоматизації процесу нанесення набризкбетону [2].

Аналіз світового досвіду будівництва тунелів гірничим способом у складних інженерно-геологічних умовах (сильнотріщинуваті гірські породи) свідчить про перевагу новоавстрійського способу «New Austrian Tunneling Method – NATM» (метод поєднання піддатливого набризкбетонного кріплення з анкерами будь-якої конструкції) у порівнянні з класичними методами будівництва гірничих виробок. NATM відповідає сучасному етапу розвитку тунелебудування, вимогам високих технологій [1]. Його новація полягає в переході на поточну схему організації робіт та застосуванні контурного піддатливого кріплення з набризкбетону в комбінації з анкерами або арками, що встановлюються з різним кроком. Тунельні роботи організуються за поточним методом з циклічним їх виконанням. Будівельний процес проходки тунелю розділяється за видами робіт. Принцип організації поточного методу полягає в тому, що просування фронту робіт кожної робочої зони услід за забоєм ведеться з постійною швидкістю. В цьому випадку всі роботи щодо проходки тунелю – це єдиний будівельний потік, який забезпечує будівництво тунелю зі швидкістю просування забою. Максимально можлива швидкість просування фронту робіт у кожній робочій зоні може бути різною згідно з технологічними можливостями.

Головною перевагою набризкбетонного кріплення в поєднанні з анкерами та арками є його висока несуча здатність. Техніко-економічний аналіз показав, що закріплена виробка обходиться в два рази дешевше звичайної монолітнобетонної за класичною технологією, при цьому трудомісткість робіт скорочується також у два рази.

Характерним прикладом використання сучасних технологій для кріплення гірничих виробок великого перерізу можна вважати будівництво двоколійного Бескидського залізничного тунелю. Ведення гірничопрохідницьких робіт у складних інженерно-геологічних умовах флішової товщі новоавстрійським способом NATM дозволило забезпечити безпеку і стійкість гірничої виробки прогоном 12 м.

Результати проведених досліджень міцності набризкбетонного кріплення неруйнівним методом у підземних умовах показали відповідність проектному класу бетону за міцністю В25.

Технологія проходки виробок «екран із труб» (Umbrella) заснована на використанні принципу випереджувального кріплення. До початку проходки по контуру майбутньої виробки створюють захисне кріплення (екран, «umbrella»), під прикриттям якого здійснюється розкриття виробки (розробка ґрунту) та зведення несучої конструкції. Використання випереджувальних захисних екранів дозволяє уникнути вивалів та обрушення породи всередину виробки в процесі проходки, стабілізувати прилеглий до виробки гірничий масив, значно знизити його деформативність та руйнування [3].

Захисний екран складається з металевих труб та підтримувальних елементів (металевої арки). Параметри елементів захисного екрана (діаметр та крок труб, товщина стінок труб, номер профілю та крок арок) визначаються розрахунком.

Зазначену технологію доцільно застосовувати для проходки [1]:

- тунелів у нестійких, слабостійких породах, а також у сильнотріщинуватих масивах середньої стійкості;
- зон тектонічних розломів та скидів;
- порталних ділянок тунелів, коли схили складені сильнотріщинуватими або зсувонебезпечними ділянками;
- тунелів під залізничними коліями, автомагістралями, інженерними спорудами тощо.

Метод закріплення приконтурного масиву із забою гірничої виробки з використанням скловолокнистої арматури (метод Analysis of Controlled Deformations in Rocks and Soils «метод A.DE.CO.-RS.») полягає в використанні спеціальних скловолокнистих елементів, якими армують геомасив (рис. 1, 2).

Ці скловолокнисті елементи армують прилеглий до виробки гірничий масив, закріплюючи слабкі породи, в яких виконується проходка (випереджувальне закріплення лоба забою та/або шелиги склепіння). Головною метою цих робіт є зменшення деформацій прилеглої гірничої масиву [6].

Даний метод ефективний при проходці виробок у зв'язних та напівзв'язних ґрунтах, а також у ґрунтах з низькою міцністю (з коефіцієнтом $f = 0,8 - 3,0$ за шкалою Протодяконова), за

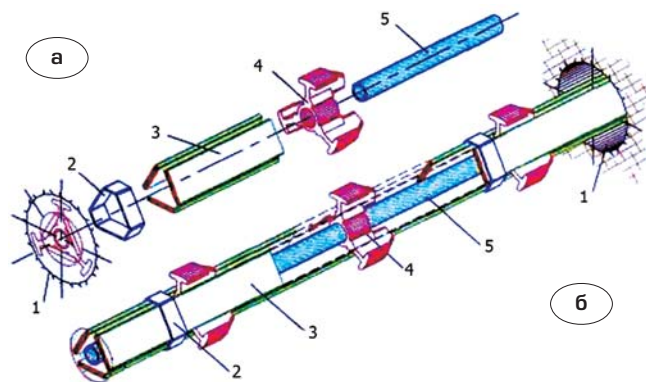


Рис. 1. Конструкція скловолокнистої арматури:

а – в розібраному вигляді; б – зібраної;

1 – бурова свердловина, діаметром більше 100 мм; 2 – сталевий стрічка; 3 – три скловолокнисті пластини з покращеним зчепленням 40x6 мм; 4 – пластикова прокладка; 5 – ПВХ труба

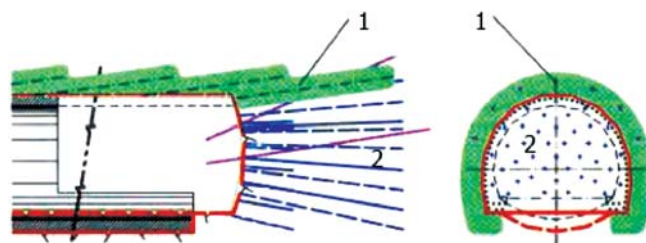


Рис. 2 Принцип методу «A.DE.CO.-RS»:

1 – арка «випереджувального кріплення» зі скловолокнистих елементів з цементациєю; 2 – укріплення лоба забою скловолокнистими анкерами

умови забезпечення максимально швидкого введення скловолокнистого армуючого елемента в свердловину, що пробурена.

Таким чином, скловолокно в конструкції виконує функцію армованого каркаса в цементному розчині. Застосування даного методу має ряд переваг, а саме [6]:

- можливість ведення робіт із проходки виробки з її розкриттям на повний профіль, що дозволяє виключити з технологічного циклу цілий виробничий етап;
- при розкритті виробки на повний профіль можливо споруджувати тимчасове кріплення в повному обсязі безпосередньо після транспортування розробленої породи. При цьому конструкція тимчасового кріплення взаємодіє з прилеглим геомасивом та сприймає гірський тиск, що сприяє зниженню деформації земної поверхні.

Технологія встановлення анкерів «Titan», SDA полягає в поєднанні операцій буріння та цементациї. При цьому виключаються два трудомістких процеси: введення несучого елемента в свердловину та протягування обсадної труби.

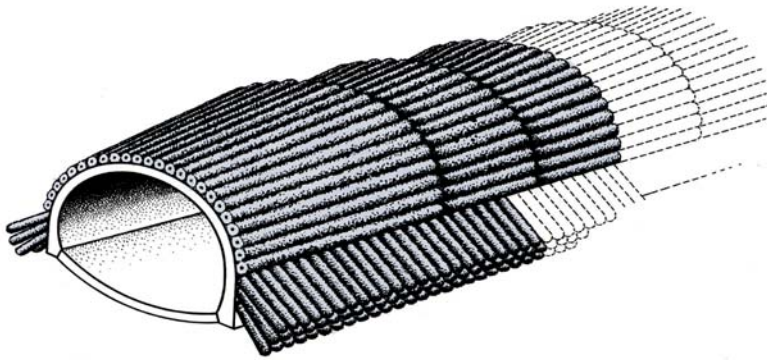
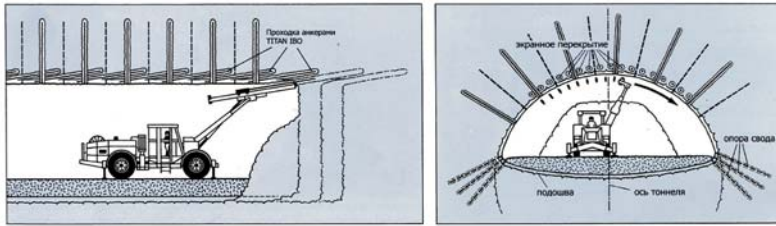


Рис. 3. Влаштування екранного перекриття верхнього склепіння тунелю за допомогою анкерів «Titan», SDA

Анкери «Titan», SDA, які самозабурюються, є універсальною анкерною системою для широкого спектра порід. Бурова штанга разом із цементним розчином оперативно формує в приконтурному масиві виробки армовано-породне закріплене склепіння, що дає змогу вести проходку виробки в слабостійких породах [4].

Ці анкери мають значну міцність на розрив порівняно з іншими анкерами подібної конструкції, тому доцільно використовувати їх при проходці тунелів у ґрунтах флішового складання як випереджувальне кріплення (рис. 3).

Вперше в Україні закріплення приконтурного масиву анкерами SDA, що самозабурюються, було виконано при проходці Бескидського тунелю.

Маркшейдерська служба підрядника робіт засвідчила надійну роботу анкерного кріплення. В короткі проміжки часу воно включається в роботу з масивом порід і забезпечує стійкість виробки великого прогону при проходці буровибуховим способом. Анкери встановлюються безпосередньо у вибої виробки без відставання кріплення, що сприяє високій швидкості та забезпечує безпеку робіт. При контрольному висмикуванні несуча здатність анкерів становила 120–140 кН.

Спостереженнями за встановленими реперами у верхньому склепінні та стінах закріпленої виробки були виявлені деформації тимчасового кріплення, які не перевищують розрахункових значень.

Технологія заміщення слабких порід свердловинним методом (струменева цементация Jet Grouting) полягає в руйнуванні і перемішуванні ґрунту струменем цементного розчину, що подається під високим тиском, в режимі «mix-in-place» (перемішування на місці). В результаті в приконтурній зоні формується новий матеріал – ґрунтобетон з високою несучою здатністю та характеристиками підвищеної міцності [5].

Міцність ґрунтобетону залежить, в першу чергу, від двох чинників, а саме: будівельних властивостей масиву ґрунту та кількості цементу на одиницю об'єму ґрунту, що укріплюється.

Розташування свердловин приймається відповідно до умов забезпечення суцільності ґрунтового масиву, який потрібно закріпити. Якість закріплення ґрунтів оцінюється випробуванням зразків геомасиву. В таблиці приведені натурні випробування закріплення та практичний досвід отримання характеристик цементомасиву в різноманітних типах ґрунтів, в яких застосовувались технології «Jet Grouting».

Характеристики утвореного ґрунтоцементу

Найменування	Міцність ґрунтоцементу на стиск σ_c , МПа	Модуль деформації E , МПа
Суглинок	4,5	225
Супісок	6,0	600
Пісок	20,0	7000

Палі з ґрунтобетону влаштовують у два етапи шляхом виконання прямого та зворотного ходу бурової колони. В процесі прямого ходу виконується буріння свердловини, в процесі зворотного – підіймання бурової колони з одночасним її обертанням.

Технологія «Jet-Grouting» має широкий спектр напрямків застосування та великі перспективи в закріпленні приконтурного масиву. Вона набуває все більшого розповсюдження в підземному будівництві.

З допомогою малогабаритного обладнання для буріння закріплення геомасиву можливо виконувати в стиснених умовах за короткий проміжок часу, при цьому деформаційні та міцнісні характеристики утвореного цементомасиву вражають своїми значеннями.

Технологія «Jet Grouting» дозволяє реалізувати технологічні задачі підземного будівництва в складних інженерно-геологічних умовах в поєднанні з різноманітними типами конструкцій та в комбінації з загальноприйнятими технологіями.

Висновки.

Сучасний підхід до вирішення стійкості виробки ґрунтується на максимальному використанні несучої здатності прилеглого масиву шляхом активного його включення в роботу (взаємодії системи «кріплення – геомасив»). Одним із дієвих шляхів підвищення несучої здатності масиву є зміцнення зв'язків по контактах структурних блоків.

Проаналізувавши різноманітні технології, можна дійти висновку, що кожна технологія має оптимальну область використання з урахуванням геотехнічних умов:

- метод укріплювальної цементації ефективний в тріщинуватих чи неоднорідних (шаруватих, блочних) скельних породах середньої міцності і міцних;
- застосування набрызкбетону по контуру оголення – від тріщинуватих напівскельних до скельних порід;
- випереджувальне кріплення «екран із труб» («Umbrella») – в нестійких, слабостійких породах та в зонах тектонічних розломів та скидів;
- кріплення масиву із забою гірничої виробки з використанням скловолокнистої ар-

матури (метод A.DE.CO.-RS.) – у зв'язних та полув'язних ґрунтах, а також у ґрунтах із низькою міцністю.

Тому, найкращим технічним рішенням може бути комбінація окремих технологічних елементів та прийомів, які дозволяють максимально реалізувати переваги різних технологій кріплення приконтурного масиву порід і забезпечити гарантоване досягнення проектних параметрів.

Прикладом практичного застосування комбінацій окремих технологічних методів є:

- проходка Бескидського тунелю в зонах сильної тріщинуватості і тектонічних порушень під захистом випереджувального кріплення «екрана з труб» («Umbrella») з кріпленням масиву з забою виробки скловолокнистою арматурою;
- проходка сполучного ходу (збійки) між перегінними тунелями метрополітену в м. Москві з попереднім укріпленням дисперсних ґрунтів під подошвою майбутньої споруди з використанням методу струменевої цементації «Jet Grouting», а також з виконанням випереджувального кріплення «екрана з труб» («Umbrella»);
- кріплення тунелю в м. Сочі в процесі його проходки в тріщинуватому масиві ($f = 1-2$) в поєднанні з методом струменевої цементації «Jet Grouting», а також з виконанням випереджувального кріплення «екрана з труб» («Umbrella»).

[1] Меркин В.Е., Чеботаев В.В., Гиренко И.В. / Временные технические условия по проектированию и строительству переронного тоннеля NATM // М.: НИЦ ТМ ОАО ЦНИИС, 1998 – 9 с.

[2] Голицынский Д.М., Маренный Я.И./Набрызгбетон в транспортном строительстве // М.: Транспорт, 1993 – 152 с.

[3] Wittke W. / New Austrian Tunneling Method (NATM) – Stability Analysis and Desing / Wittke W., Pierau B., Erichsen C. – Aachen (Germany): 2002 – 424 с.

[4] Atlas Copco Rock Reinforcement Products. Каталог продукции, 2014 г.

[5] Маковский Л.В., Меркин В.Е. / Струйная цементация ґрунтов при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов // М.: ТИМП, 1994 – 420 с.

[6] Pietro Lunardi / «Design and construction of tunnels» Analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS) // Springer 2008 – 530 с.

Надійшла 16.06.2017 р.