



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

О. Л. ТЮТЬКІН, В. П. КУПРІЙ,
В. А. МІРОШНИК

ТУНЕЛІ І МЕТРОПОЛІТЕНИ

ЩИТОВИЙ СПОСІБ СПОРУДЖЕННЯ ТУНЕЛІВ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

О. Л. Тютькін, В. П. Купрій, В. А. Мірошник

Тунелі і метрополітени.
Щитовий спосіб спорудження тунелів

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

ДНІПРО
2024

УДК 624.191.6:625.42(075.8)

Т 98

Авторський колектив:

Тютькін О. Л., Купрій В. П., Мірошник В. А.

Рекомендовано Радою якості освітньої діяльності УДУНТ

Протокол № 4 від 18 грудня 2023 р.

Т 98 **Тютькін, О. Л.** Тунелі і метрополітени. Щитовий спосіб спорудження тунелів : навч. посіб. / О. Л. Тютькін, В. П. Купрій, В. А. Мірошник ; за ред. д-ра техн. наук, проф. О. Л. Тютькіна ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2024. – 177 с.

ISBN 978-617-8314-10-1 (PDF)

Посібник містить матеріали проектування, розрахунку й будівництва тунелів, які споруджуються щитовим способом. Матеріал створено на основі існуючих європейських і українських практик та чинних нормативних документів.

Призначений для опанування освітньої компоненти «Тунелі і метрополітени» та дипломного проектування за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», освітньо-професійна програма «Мости і транспортні тунелі».

Іл. 132, табл. 10, бібліогр. 13 назв.

УДК 624.191.6:625.42(075.8)



Цей твір ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons

[«Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[\(«Із зазначенням авторства – Некомерційна – Поширення на тих самих умовах» 4.0 Міжнародна\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

O. L. Tiutkin, V. P. Kuprii, V. A. Miroshnyk

Tunnels and subways.
Shield method of tunnel construction

MANUAL

DNIPRO
2024

UDC 624.191.6:625.42(075.8)

T 98

Writing Team:

Tiutkin O. L., Kuprii V. P., Miroshnyk V. A.

Recommended by the Council for the Quality of Educational Activities
of the USUST

Protocol No. 4 of 18 12, 2023

T 98 Tiutkin, O. L. Tunnels and subways. Shield method of tunnel construction : manual / O. L. Tiutkin, V. P. Kuprii, V. A. Miroshnyk ; ed by. Dr. Tech. Sciences, Prof. O. L. Tiutkin ; Ukrainian State University of Science and Technologies. – Electronic edition – Dnipro : USUST, 2024. – 177 p.

ISBN 978-617-8314-10-1 (PDF)

The manual contains materials for the design, calculation and construction of tunnels that are constructed using the shield method. The material was created on the basis of existing European and Ukrainian practices and current regulatory documents.

Intended for mastering the educational component "Designing transport tunnels" and diploma design in specialty 192 "Construction and civil engineering", educational and professional program "Bridges and transport tunnels".

Il. 132, tab. 10, bibliogr. 13.

UDC 624.191.6:625.42(075.8)



This work is licensed under Creative Commons License

[«Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

ISBN 978-617-8314-10-1 (PDF)
DOI 10.15802/978-617-8314-10-1

© Tiutkin O. L., Kuprii V. P., Miroshnyk V. A., 2024
© Ukrainian State University of Science and Technologies, 2024

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	8
1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО ЩИТОВИЙ СПОСІБ СПОРУДЖЕННЯ ТУНЕЛІВ.....	9
1.1 ВСТУП.....	9
1.2 Види способів проходки (спорудження) тунелів.....	10
1.3 Оцінка інженерно-геологічних умов будівництва.....	18
2 КОНСТРУКЦІЇ ЗБІРНИХ ТУНЕЛЬНИХ ОПРАВ КРУГОВОГО ОКРЕСЛЕННЯ	25
2.1 Вибір типу оправи тунелю	25
2.2 Конструкція тунельних оправ	26
2.2.1 Призначення основних параметрів оправи	28
3 КОНСТРУКЦІЯ ОПРАВ ІЗ ЧАВУННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТЮБІНГІВ	38
3.1 Конструкції оправ із чавунних тюбінгів	38
3.2 Конструкції оправ із залізобетонних тюбінгів	46
4 КОНСТРУКЦІЯ ТУНЕЛЬНИХ ОПРАВ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БЛОКІВ	51
4.1 Оправи із залізобетонних блоків без зв'язків розтягу у стиках	51
4.2 Оправи із залізобетонних блоків зі зв'язками розтягу у стиках	55
5 РОЗРАХУНОК ОПРАВ. ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ, ДІЮЧИХ НА ОПРАВИ У РІЗНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ	60
ВСТУП	60
5.1 Визначення діючих навантажень на тунельну оправу.....	62
6 СТАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ОПРАВ ТУНЕЛІВ	67
6.1 Статичний розрахунок оправ у слабких породах, як кільця, що вільно деформується	67
6.2 Статичний розрахунок оправи у міцних породах, які мають пружний відпір.....	71
7 РОЗРАХУНОК ТУНЕЛЬНИХ ОПРАВ З УРАХУВАННЯМ ЇХНЬОЇ ВЗАЄМОДІЇ З ОТОЧУЮЧИМ МАСИВОМ ҐРУНТУ	76
ВСТУП.....	76
7.1 Загальні відомості про метод скінченних елементів.....	77
7.2 Програмний комплекс PLAXIS	80
7.3 Програмний комплекс SCAD	82
7.4 Програмний комплекс LIRA	85
8 ПЕРЕВІРКА НА МІЦНІСТЬ ОПРАВ ТУНЕЛІВ.....	89
8.1 Епюра сил та моментів	89

8.2 Розрахунок на міцність позацентрово стиснутих залізобетонних елементів	90
8.3 Перевірка на міцність оправ із чавунних тюбінгів	93
9 КОНСТРУКЦІЯ ПРОХІДНИЦЬКОГО ЩИТА	97
9.1 Основні елементи немеханізованого щита.....	97
9.2 Визначення основних розмірів щита	100
10 БЕЗЩИТОВА (ЕРЕКТОРНА) ПРОХОДКА ТУНЕЛІВ.....	103
10.1 Розробка породи	103
10.2 Навантаження та відкатка породи.....	107
10.3 Монтаж тунельної оправы	110
10.4 Нагнітання за оправу.....	112
10.5 Гідроізоляція. Чеканка швів збірних оправ	114
10.6 Циклічність робіт при спорудженні тунелю еректором способом	115
11 КОНСТРУКЦІЯ МЕХАНІЗОВАНИХ ЩИТІВ.....	118
11.1 Класифікація прохідницьких щитів	118
11.2 Щити із планетарним робочим органом.....	120
11.3 Щити з роторним робочим органом	121
11.4 Щити з екскаваторним робочим органом	123
11.5 Щит зі стріловим фрезерним робочим органом	126
11.6 Щити з щелепним робочим органом	127
12 ТУНЕЛЕПРОХІДНИЦЬКІ МЕХАНІЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ (ТПМК)	130
12.1 Тунелепрохідницький комплекс з щитом екскаваторного типу	131
12.2 Тунелепрохідницький комплекс з щитом роторного типу	133
12.3 Тунелепрохідницький комплекс з щитом щелепного типу для спорудження монолітно-пресованої бетонної оправы	135
13 УСТАТКУВАННЯ МЕХАНІЗОВАНОГО ТУНЕЛЕПРОХІДНИЦЬКОГО КОМПЛЕКСУ	138
ВСТУП	138
13.1 Розробка породи	138
13.2 Навантаження і відкатка породи	142
13.3 Монтаж тунельної оправы	144
14 ПІДГОТОВЧІ РОБОТИ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ТУНЕЛІВ ЩИТОВИМ СПОСОБОМ	148
15 ТУНЕЛЕПРОХІДНИЦЬКІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ СЛАБКИХ І ЗМІШАНИХ ҐРУНТІВ	155
15.1 Тунелепрохідницькі комплекси для слабких ґрунтів	155

15.2 Тунелепрохідницькі комплекси для неоднорідних ґрунтів	159
16 ТУНЕЛЕПРОХІДНЕЦЬКІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ МІЦНИХ ГРУНТІВ	164
16.1 Тунелепрохідницькі комплекси для міцних ґрунтів з одинарним щитом	164
16.2 Тунелепрохідницькі комплекси для міцних ґрунтів з подвійним щитом	168
16.3 Тунелепрохідницькі комплекси для міцних ґрунтів. Гриперні (Gripper) конструкції щиті.....	171
Бібліографічний список.....	176

ПЕРЕДМОВА

Запропонований навчальний посібник включає матеріал II частини дисципліни «Тунелі і метрополітени» і складається з шістнадцяти розділів відповідно до робочої програми курсу «Щитовий спосіб спорудження тунелів», у якому викладено матеріали проектування, розрахунку й будівництва тунелів, які споруджуються тунелепрохідницькими механізованими комплексами (ТМПК).

Населення міст України збільшується, транспортних засобів стає все більше, і нестаток вільного простору відчувається все гостріше, особливо це характерно для міст-мегаполісів. Для збереження мобільності людей і вантажів нові об'єкти інфраструктури неминуче занурюються під землю, а це вимагає усе більш інтенсивного освоєння міського підземного простору. І тут доводиться говорити не про прокладення труби, а про гірські виробки значного діаметру - залізничні тунелі, автодорожні тунелі, перегінні тунелі метрополітену і станційні тунелі метрополітену.

Спорудження тунелів є найскладнішим видом будівельних робіт. Всі робочі операції з проходки виконуються у стиснених умовах забою, як правило, при постійній дії гірського, а в багатьох випадках і гідростатичного тиску з боку навколишнього породного масиву. Тому при проектуванні, будівництві та експлуатації тунелів будівельникам доводиться вирішувати складні наукові, інженерні та екологічні завдання і це потребує використання новітніх досягнень науки і техніки, але багаторічний світовий досвід будівництва підземних споруд неможна залишати без уваги.

Цей навчальний посібник не є оригінальним науковим текстом, укладачі не претендують на авторство й першоджерело. Матеріал створено на основі існуючих світових і вітчизняних практик та чинних нормативних документів.

1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО ЩИТОВИЙ СПОСІБ СПОРУДЖЕННЯ ТУНЕЛІВ

1.1 ВСТУП

Щитовий спосіб спорудження тунелів (щитова проходка) базується на тому, що під час спорудження тунелів використовується прохідницький щит, який є пересувним тимчасовим кріпленням, що забезпечує захист від обвалення ґрунту по контуру виробки, де ведуться основні прохідницькі роботи: кріплення забою, прибирання розробленого ґрунту та монтаж збірної тунельної оправи. Щитова проходка була довгий час основним способом спорудження тунелів кругового окреслення у слабких нестійких ґрунтах зі складними геологічними умовами, але на тепер існує багато видів щитів для широкого спектру ґрунтів, у тому числі і для міцних скельних.

Під час будівництва транспортних тунелів різного призначення (залізничні, автодорожні, перегінні та станційні тунелі метрополітену) можливі два основні способи провадження робіт - відкритий і закритий. При відкритому способі розривається траншея або котлован з порушенням земної поверхні і зупинкою руху транспорту на час ведення робіт. Усе це, природно, зв'язано з рядом незручностей для пасажирів, транспорту і, крім того, спричиняє за собою удорожчання робіт. Перспективнішими є закриті способи будівництва, що вимагають лише мінімального розкриття земної поверхні для збірки щита, а усі роботи проводяться за допомогою щитових прохідницьких комплексів, до складу яких входить прохідницький щит та інше устаткування.

До переваг та особливостей щитової проходки відносяться:

- широкий діапазон застосування в різних несприятливих інженерно-геологічних умовах за значного гірського та гідростатичного тиску;
- відсутність тимчасового кріплення та зведення оправи відразу за щитом, що підвищує безпеку прохідницьких робіт та їх економічну

ефективність, а також зводить до мінімуму або навіть виключає осідання гірського масиву та земної поверхні;

- часткова або повна механізація та автоматизація всіх операцій проходки тунелю;

- вузький фронт робіт і необхідність суворої ув'язки всіх операцій прохідницького циклу у часі та просторі;

- високі швидкості проходки механізованими щитовими комплексами - близько 300 600 м / міс. і більше;

- доцільність застосування щитової проходки при будівництві протяжних тунелів довжиною понад 1000 метрів.

Тунелепрохідницькі механізовані комплекси (ТПМК) забезпечують механізацію всіх основних робочих операцій (розробка породи, навантаження її на транспортні засоби, зведення оправи, первинне нагнітання) та максимально можливе їх поєднання у часі. Найбільш повно принцип комплексної механізації реалізується при спорудженні тунелів механізованими щитами.

1.2 Види способів проходки (спорудження) тунелів

При відкритому способі робіт по спорудженню тунелів з поверхні розкривають котлован (рис. 1.1.) або траншею (рис. 1.2.) з вертикальними стінами, підтримуваними тимчасовим огородженням, або з укосами, у яких споруджують оправи тунелів з наступним зворотним засипанням і відновленням поверхні.

Котлований спосіб спорудження тунелів (рис. 1.1.) застосовується при мілкому закладанні тунелів у міських умовах (автотранспортні, пішохідні, комунальні тунелі, станційні тунелі метрополітенів) та відносять до відкритих способів робіт, що передбачають попереднє розкриття земної поверхні. При цьому способі робіт зведення підземних конструкцій проводиться в попередньо розроблених котлованах зі зворотним засипанням їх ґрунтом та відновленням дорожнього покриття над підземною спорудою.

Форма та розміри котлованів у плані, їхня глибина, система кріплення стін залежать від розмірів підземної споруди, інженерно-геологічних умов та умов міської забудови. У стійких ґрунтах природної вологості та при наявності досить вільної незабудованої території розкриття котлованів проводиться з природними укосами без кріплення стін. Крутизна укосів котловану визначається

властивостями ґрунтів, глибиною котловану та горизонтом ґрунтових вод.

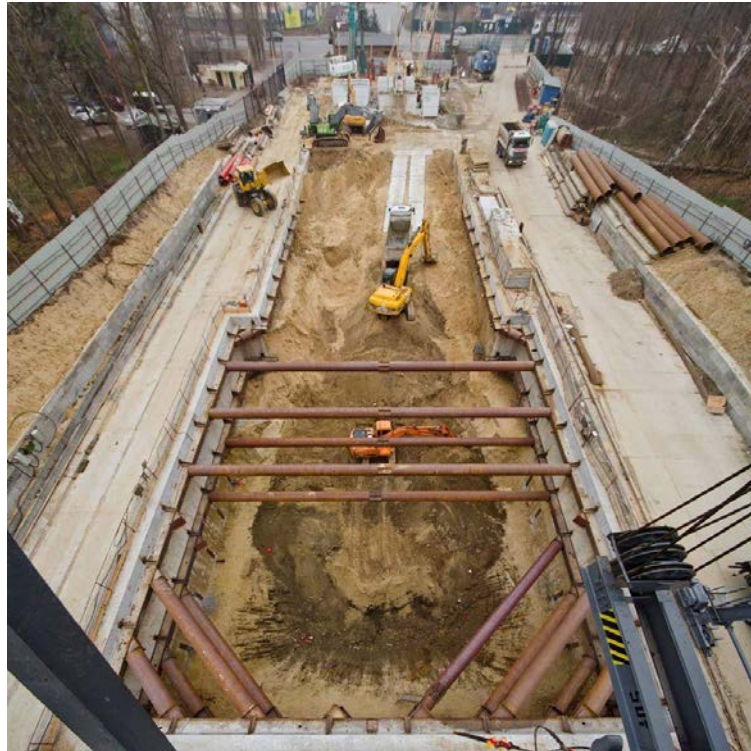


Рис. 1.1. Відкритий спосіб робіт при спорудженні тунелів у котловані

Ширина по верху може досягати 50-60 м. Але в стиснених умовах міської забудови в основному влаштовують котловани з вертикальними стінами, закріпленими тимчасовою огорожею у вигляді паль або шпунта. При цьому ширину котловану приймають мінімальною, і вона перевищує ширину тунелю при монолітних оправах на 30-50 см, а при збірних - на 80-120 см. що необхідно для зручності влаштування зовнішньої гідроізоляції. Залежно від розмірів тунелю, глибини закладення, характеру навколишньої забудови, геологічних та гідрогеологічних умов застосовують різні схеми тимчасового кріплення котлованів.

При спорудженні тунелів у котлованах дуже важливою складовою є їхнє тимчасове кріплення, особливо у міських умовах. Існує багато видів кріплення котлованів: металевий шпунт, стіна у ґрунті, анкера, буро набивні палі. Вибір виду кріплення залежить від глибини котловану та інженерно-геологічних умов. При цьому дуже впливовим фактором є наявність і глибина розташування підземних вод.

Траншейний спосіб спорудження тунелів (рис. 1.2.) застосовується при мілкому закладанні тунелів у міських умовах (автотранспортні, пішохідні, комунальні тунелі, перегінні тунелі метрополітенів). Відрізняється він від котлованного тільки розмірами і способом кріплення стін траншеї.



Рис.1.2. Відкритий спосіб робіт при спорудженні тунелів у траншеї

І траншейний, і котлованний способи характеризується високим ступенем механізації, застосуванням індустріальних конструкцій, продуктивного землерийного та вантажопідйомного обладнання.

Однак, в умовах щільної міської забудови та інтенсивного вуличного руху цей спосіб не завжди є ефективним. Розкриття широких котлованів і довгих траншей призводить до порушення руху міського транспорту та пішоходів на весь період будівництва тунелю, виконання значних обсягів земляних робіт.

При **закритому способі робіт** по спорудженню тунелів розробку породи (проходку) і зведення оправи виконують без порушення земної поверхні, опускаючись під землю через стовбури шахт або вхідні ділянки тунелю (передпортальні виїмки). При цьому в залежності від конкретних умов застосовують гірничий або щитовий спосіб.

Гірничий спосіб спорудження тунелів полягає, в залежності від геологічних умов, в розробці всього перерізу виробки за один прийом або частинами із заміною при необхідності породи, що виймається, тимчасовим кріпленням, яке останнім часом дуже розвинулось. У першому випадку оправи звичайно зводять з монолітного бетону, що укладається механізованими способами за інвентарні пересувні опалубки, або монтують із залізобетонних елементів.

При розробці перерізу частинами, спочатку проходять невелику виробку (штольню), що її випереджає, або випереджає калоту, з якої в визначеній послідовності, роблять розширення перерізу до проектного контуру зі зведенням оправи з монолітного бетону (рис. 1.3.) спосіб нижнього уступу. Щільний контакт оправи з навколишніми породами (при збірній оправі) забезпечується нагнітанням за оправу цементного розчину.

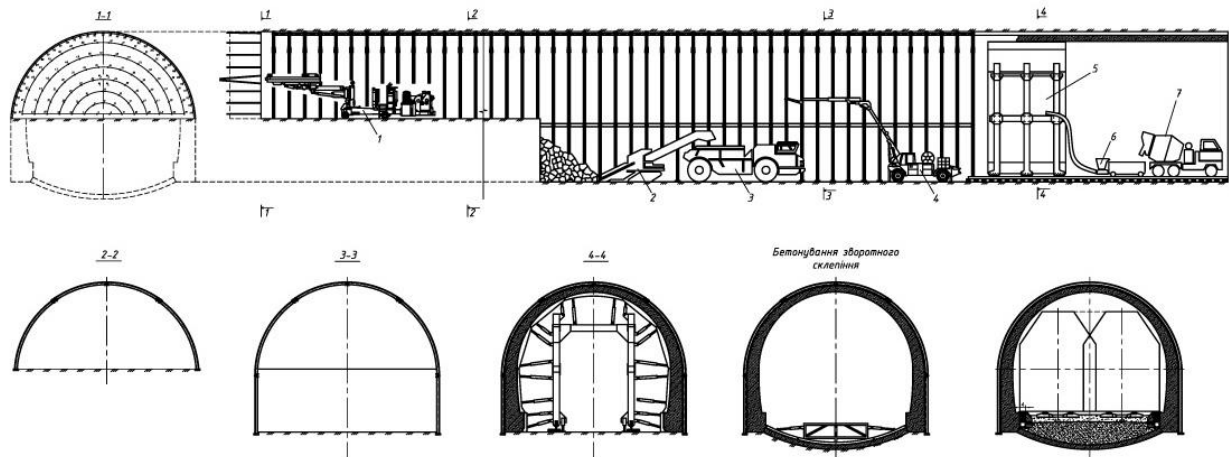


Рис. 1.3. Спосіб нижнього уступу

Залежно від інженерно-геологічних та гідрогеологічних умов, форми та розмірів поперечного перерізу тунелю, його довжини, місця розташування, призначення тунелю та умов забезпечення будівництва необхідними гірничопрохідницьким обладнанням та будівельними матеріалами вибирають спосіб виконання робіт, який необхідний для виконання основних процесів спорудження тунелю: проходки та зведення оправи.

При **щитовому способі** спорудження тунелів виробка для тунельної оправи розробляється зразу на весь переріз, а для унеможливлення обрушення породи, в якості тимчасового кріплення застосовують сталевий циліндр-щит, що має діаметр, трохи більший, ніж тунельна оправа (рис. 1.4).

Тунельна оправа при щитовому способі робіт звичайно має круговий обрис і складається з виготовлених у заводських умовах чавунних елементів-тюбінгів або залізобетонних елементів-блоків чи тюбінгів. Кільця оправи збирають з цих елементів під захистом задньої частини щита-оболонки. Породу перед щитом розробляють на ширину кільця оправи, після чого щит пересувають у простір, що утворився, за допомогою розташованих у ньому гідравлічних циліндрів (домкратів), що упираються в останнє зібране кільце оправи.



Рис. 1.4. Щитовий спосіб проходки немеханізованим щитом.

При щитовому способі спорудження тунелів і метрополітенів велике значення має місце зборки (монтажу) самого щита – тунелепрохідницького комплексу.

На рис. 1.5 - 1.6, показані будівельні майданчики для монтажу щита та тунелепрохідницького комплексу, що пересувається за щитом.



Рис. 1.5. Монтаж тунелепрохідницького комплексу у котловані.

Щитова прохідницька техніка здатна безпечно прокласти тунелі на великій глибині під гірськими масивами, морськими затоками і річками, а високотехнологічне управління за допомогою високоточних приладів гарантує ведення щита до мети з точністю до міліметра по заданій трасі. Усе це є безперечними перевагами закритого способу будівництва тунелів.

При цьому споруджуються усе більш довгі тунелі на більших глибинах, що приводить до збільшення об'ємів робіт, а темпи будівництва вимагають більшої ефективності і безпеки тунелебудування із застосуванням щитових прохідницьких комплексів.

В останнє десятиліття створено значне число нових високопродуктивних механізованих прохідницьких щитових комплексів, в основному зарубіжними фірмами, з різними типами виконавчих робочих органів для будівництва тунелів в різних гірничо-геологічних умовах. Так, за допомогою щитів для скельних порід, щитів з ґрунтовим привантаженням і з гідравантаженням успішно будуються тунелі у цьому світі.

Слід зазначити, що щитова проходка відрізняється від ведення робіт гірничим способом передусім довжиною тунелів, які споруджуються (понад 1000 метрів), швидкістю (від декілька метрів в зміну) і точністю проходки (1,5 мм незалежно від довжини траси), мінімізацією витрат по людських ресурсах, мінімізацією матеріальних ресурсів (діаметр тунелю відповідає діаметру щита).



Рис. 1.6. Монтаж тунелепрохідницького комплексу у котловані.

Визнаними лідерами в області створення щитової прохідницької техніки є фірми "Херренкнехт" (Німеччина); "Ловат" (Канада); "Альпине Вестфалия" (Австрія); "Framatone Mechanical Engineering" (NFM) (НФМ). "Fives - Cail Babcock" (FCB) (ФСБ) і "C.S. Bessac" ("Бессак") (Франція), "Мицубісі", "Ишикавадзима-Харима", "Кавасакі" і "Хитачи" (Японія) та ін. Цими ж фірмами пропонуються інженерні послуги з оптимальної підготовки проекту, організації управління будівельним майданчиком і із самого початку супровід будівництва тунелю. Окремі зразки щитової техніки виготовляє германська фірма "Wirth" ("Вірт").

Щит, як було зазначено вище – це металеве кріплення, що надійно захищає забійну зону від навколишнього ґрунтового масиву. Під її захистом виконують основні операції прохідницького циклу: розробку ґрунту, кріплення забою, прибирання ґрунту, зведення оправи тунелю.

Форма поперечного перерізу щита повторює контур тунельної оправи, вона як правило, кругова (рис. 1.7), але може бути овальною і прямокутною (рис. 1.9).



Рис. 1.7. Щит з круговим контуром виробки



Рис. 1.8. Трисекційний щит компанії Hitachi Zosen



Рис. 1.9. Щити з овальним та прямокутним контуром виробки.

1.3 Оцінка інженерно-геологічних умов будівництва

Весь хід робіт від проєктування до будівництва тунелю, його вартість і терміни виконання робіт визначаються в основному геологічними й гідрогеологічними умовами, що мають місце на трасі тунелю.

У зв'язку з цим велике значення для успішного ходу будівництва мають інженерно-геологічні дослідження району, наміченого для будівництва тунелю. Геологічна експертиза, що узагальнює результати цих досліджень, повинна дати відповідь на всі питання, що цікавлять будівельників, передбачити труднощі, що можуть виникнути в процесі будівництва й експлуатації тунелю, і рекомендувати найбільш сприятливе в геологічному відношенні положення траси. Помилки або неправильні висновки експертизи можуть досить несприятливо вплинути на хід, вартість і терміни будівництва, а також на умови експлуатації тунелю.

У програму інженерно-геологічного обстеження району будівництва тунелю входять наступні види робіт:

- вивчення наявних літературних і картографічних матеріалів по топографії, геології і гідрогеології району;
- проведення інженерно-геологічної зйомки території будівництва, що полягає у вивченні оголень земної кори, стійкості ґрунтових мас, потужності і хімічного складу джерел, що виходять на поверхню, характеру рельєфу, тощо;
- призначення варіантів траси тунелю для всебічних геологорозвідувальних робіт;
- детальні глибинні геологорозвідувальні роботи і гідрогеологічні дослідження з лабораторним вивченням фізико-механічних властивостей гірських порід і хімічного складу підземних вод.

Найбільш розповсюдженим і ефективним методом глибинного дослідження гірського масиву є ударно-обертальне буріння свердловин з відбором проб через 0,5 м у слабких породах і колонкове буріння з узяттям керна в скельних породах.

У результаті інженерно-геологічних вишукувань повинні бути встановлені геологічна будівля масиву по трасі тунелю, інженерно-геологічна характеристика, гідрогеологічні умови і ряд загальних питань (кліматичні умови, наявність будівельних матеріалів, тощо).

Представлення про геологічну будівлю масиву по трасі тунелю дають подовжні і поперечні геологічні розрізи і ряд інших графічних

матеріалів, перерахованих у технічних умовах і інструкціях на виробництво інженерно-геологічних вишукувань для проектування і будівництва метрополітенів і гірських залізничних тунелів.

На підставі вивчення матеріалів інженерно-геологічних вишукувань повинні бути висвітлені питання, що характеризують район будівництва тунелю і прорізуваний тунелем гірський масив.

Особливості поверхні в районі будівництва тунелю. Тут необхідно дати представлення про рельєф місцевості, лісистості і заболоченості смуги, розташованої над майбутнім тунелем, наявності найближчих водойм, можливості зсувних явищ по контактах між шарами під дією сил ваги, ґрунтових потоків і порушень, стійкості гірського масиву у зв'язку з проходкою підземних виробок, наявності карстових явищ, зв'язаних з розчиненням гірських порід (гіпс, ангідрит, вапняк, доломіт) і утворенням підземних печер, заповнених наносами або насичених водою, про осідання поверхні і сейсмічні явища.

За результатами вишукувань, що були проведені за допомогою розвідувального буріння та електророзвідки, складається зведений інженерно-геологічний звіт, що звичайно складається з первинних документів, загальної частини й інженерно-геологічних висновків.

Для проектування тунелю найбільш важливими є наступні дані звіту:

- геологічна структура і стійкість гірського масиву (від цього залежить гірський тиск, який буде діяти на тунельну оправу);
- наявність зон розмиву, провалів, зсувів і карстів, а також, складок та ін. (від цього залежить спосіб спорудження тунелю);
- очікуваний гірський тиск і імовірність зустрічі ділянок зі значним гірським тиском (що залежить від геологічної структури);
- зони і характер можливих обвалень і вивалів породи при її розробці;
- фізико-механічні властивості порід і їхня міцність у відношенні розробки, абразивність при щитовій проходці;
- опірність (стійкість) порід до дії коливань температури, вологості (вивітрюванню і вилуговуванню);
- обдимання порід і його інтенсивність;
- теплопровідність порід і очікувана температура в підземній виробці;
- кути природного укосу порід;
- характер тріщинуватості порід (що впливає на стійкість забою);

- характеристика водоносних об'їв, напрямок і швидкість руху підземних вод, а також величина очікуваних припливів води в підземні вироблення.
- хімічний склад порід і підземних вод і ступінь їхньої агресивності;
- підземні гази;
- родовище місцевих будівельних матеріалів, їхні запаси і якісна характеристика (для можливості використання породи, що розробляється для будівництва);
- джерела господарського і технічного водопостачання.

На підставі аналізу матеріалів, отриманих при інженерно-геологічних дослідженнях, вибирається глибина закладення тунелю, способи спорудження, типи конструкції оправи тощо.

По закінченню інженерно-геологічних вишукувань будується геологічний розріз по трасі майбутнього тунелю (рис. 1.10).

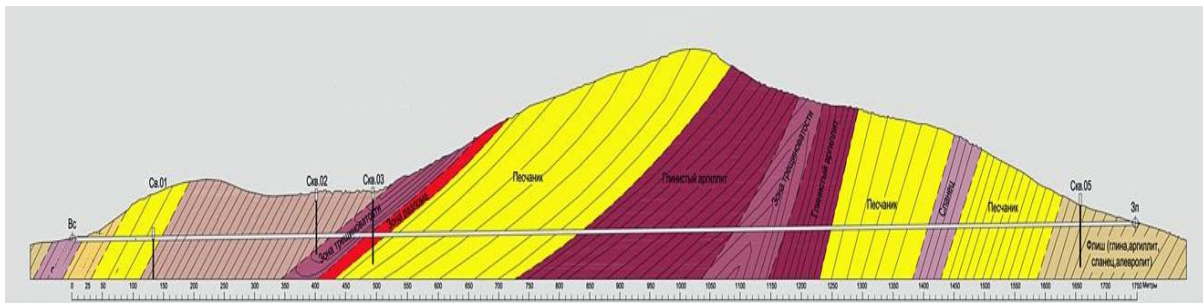


Рис. 1.10. Геологічний розріз по трасі Бескідського тунелю у Карпатах.

При закладенні тунелів на глибині понад 300 м розвідувальне буріння не виконується і замінюється геофізичними методами розвідки в сполученні з проходкою горизонтальних виробок по осі майбутнього тунелю, що дозволяє скласти уявлення про геологічну будівлю гірського масиву і вирішити комплекс інженерно-геологічних питань, не виконуючі трудомісткі і дорогі у цьому випадку бурові роботи. Найбільший ефект від застосування геофізичних методів досягається при сполученні їх з іншими видами інженерно-геологічних досліджень.

У табл. 1.1. наведені основні властивості гірських порід відповідно до класифікації за коефіцієнтом міцності Протод'яконова М.М., але рекомендується визначати характеристики випробуваннями.

Таблиця 1.1.

**Властивості ґрунтів (порід) відповідно до класифікації за
коефіцієнтом міцності Протод'яконова М.М.**

Категорія ґрунтів (порід)	Найменування ґрунтів (порід)	Група ґрунтів	Коефіцієнт міцності f по шкалі проф. М. М. Протод'яконова	Питома вага γ , кН/м ³	Кут внутрішнього тертя φ , градуси
Дуже міцні	Магматичні породи дрібнозернисті невивітрілі великої міцності (діабази, габро, діорити, порфірити й ін.) і метаморфічні породи дрібнозернисті невивітрілі великої міцності (кварцити й ін.)	11	$f \geq 19$	29...33...33	87...88...88
	Магматичні породи дрібнозернисті невивітрілі дуже міцні (діабази, діорити, базальти, граніти, андезити й ін.) і метаморфічні породи дрібнозернисті невивітрілі дуже міцні (кварцити, роговики й ін.)	10	$19 > f \geq 17$	28...31...31	86...87...87
	Кремій, кварцитові пісковики, вапняки невивітрілі виняткової міцності, дрібнозернисті магнетитові й залізні руди		$17 > f \geq 15$	28...31...31	86...87...87
	Магматичні породи середнезернисті невивітрілі й слабовивітрілі міцні (граніти, діабази, сієніти, порфірити, трахіти й ін.) і метаморфічні породи середнезернисті невивітрілі міцні (кварцити, гнейси, амфіболіти й ін.)	9	$15 > f \geq 12$	28...31...31	84...85...85

	Пісковики дрібнозернисті окварцовані, вапняки й доломіти дуже міцні, мармури дуже міцні, кременисті сланці, кварцити з помітною сланцюватістю, бурі залізняки й руди із кварцом		$12 > f \geq 10$	27...29...29	84...85...85
Міцні	Конгломерати й брекчії міцні на вапняному цементі, доломіти й вапняки міцні, піщаники міцні на кварцовому цементі, колчедани, магнетитові руди, великозернисті магнетитогематитові залізисті руди, бурі залізняки, хромітові руди	8	$10 > f \geq 8$	27...29...29	82...84...84
	Магматичні породи грубозернисті невивітрілі й слабовивітрілі (граніти, сієніти, зміювики й ін.) і метаморфічні породи грубозернисті невивітрілі (кварцо-хлоритові сланці й ін.)		$8 > f \geq 7$	25...28...28	82...84...84
	Аргіліти й алевроліти міцні, магматичні породи вивітрілі (граніти, сієніти, діорити, зміювики й ін.) і метаморфічні породи вивітрілі (сланці й ін.), вапняки невивітрілі середньої міцності, сидерити, магнезити, кварцові поліметалеві руди (пірити, галеніти, халькопірити, піроксени).	7	$7 > f \geq 5$	25...28...28	75...80...80
Середньої міцності	Вапняки й доломіти слабовивітрілі середньої міцності, піщаники на глинистому цементі, метаморфічні породи среднезернисті вивітрілі (сланці слюдисті й ін.), бурі залізняки, руди, ангідрити.	6	$5 > f \geq 4$	23...28...28	65...75...75

	Вапняки й доломіти вивітрілі середньої міцності, мергель середньої міцності, метаморфічні породи грубозернисті середньої міцності (глинисті, піщанисті й талькові сланці), Лімоніти, конгломерати й брекчії з галькою з осадових порід на вапняково-глинистому цементі	5	$4 > f \geq 3$	22...27 11 22...23	60...65...65
	Антрацити, конгломерати й піщаники середньої міцності, алевроліти й аргіліти середньої міцності, опоки невивітрілі середньої міцності, кальцити, туфи вивітрілі.		$3 > f \geq 2$	22...23...23	60...65...65
	Аргіліти й алевроліти маломіцні опоки вивітрілі середньої міцності вапняки й доломіти вивітрілі маломіцні, валунні ґрунти, кам'яне вугілля середньої міцності.	4	$2 > f \geq 1,5$	16...22...22	30...40...40
	Глини карбонатні міцні, крейда, гіпс, крейдові породи маломіцні, ракушняк слабо зцементований, гравійні, галечникові, дресвяні й щебеністі ґрунти з валунами. Кам'яне вугілля, буре вугілля, трепел, глини й суглинки тверді і напівтверді	3	$1,5 > f \geq 1$	18...20...20	28...30...30
Слабкі	Глини й суглинки без домішок гальки, гравію або щебню тугі й м'якопластичні, гравійні, щебеністі ґрунти щільного складу, піски гравілісті, ґрунти з коріннями й з домішками, шлаки злежалі	2	$1 > f \geq 0,9$	17...18...18	25...28...28

Піски, ґрунти рослинного шару без корінь і домішок, торф без корінь, доломітове борошно, шлаки пухкі, пухкі гравійні, галечникові, й щебенисті ґрунти.	1	$0,9 > f \geq 0,5$	16	20...25...25
Пухкі вапнякові туфи, лес, суглинки лесоподібні, супіски й пісок без домішок або з домішкою щебенів, гравію або будівельного сміття. Піски-Пливуні		$0,5 > f \geq 0,4$	16	20...25...25

Відповідно до діючого ДБН В.2.3-7-2010, орієнтовні значення коефіцієнта міцності нескельних ґрунтів приймаються по Додатку Е, таблиця Е.1, або безпосередньо з випробувань на міцність (наприклад, стабілометричних випробуваннях).

Завдання для самоконтролю

1. У яких випадках застосовують закриті й відкриті способи робіт?
2. Які є способи спорудження тунелів при закритому способі робіт?
3. У яких умовах застосовуються гірничий спосіб спорудження тунелів?
4. У яких умовах застосовуються щитовий спосіб спорудження тунелів?
5. В якому випадку місцем монтажу щита використовують передпортальну виїмку?
6. В якому випадку місцем монтажу щита використовують котлован?
7. З якою метою виконуються інженерно-геологічні вишукування?

2 КОНСТРУКЦІЇ ЗБІРНИХ ТУНЕЛЬНИХ ОПРАВ КРУГОВОГО ОКРЕСЛЕННЯ

2.1 Вибір типу оправи тунелю

Особливості збірних оправ тунелів кругового окреслення

При щитовому способі спорудження тунелів частіше застосовують **збірні оправи**, що складаються з чавунних або залізобетонних елементів, і бетонні монолітно-пресовані оправи. Збірні оправи отримали найбільше поширення. Монолітно-пресовані оправи мають ряд переваг і можуть знайти застосування в певних умовах при використанні інноваційної технології їхнього спорудження.

Збірні оправи щитової проходки тунелів мають переважно коловий обрис і складаються з окремих кілець, кожне з яких монтують з окремих елементів (рис. 2.1). Колова форма забезпечує мінімальну кількість типорозмірів елементів в кільці і їхню взаємозамінність. Вона сприятлива для сприйняття усебічного однакового або близького до нього гірського тиску і зручніша для конструювання прохідницьких щитів, особливо механізованих з роторним робочим органом.

Складний характер роботи оправ у взаємодії з ґрунтом, що оточує тунель, привів до появи різних конструкцій збірних оправ.

У більшості випадків будівництва тунелів роботи по проходці доводиться виконувати в складних інженерно-геологічних умовах. Міра складності цих умов визначається в основному водонасиченістю ґрунтів і їхньою стійкістю під час розкриття виробок. Найбільш складні проблеми при проектуванні і будівництві тунелів виникають у випадках залягання слабких водонасичених ґрунтів, особливо в умовах міської забудови.

Нині у світовій практиці такі проблеми успішно вирішуються шляхом використання тунелепрохідницьких механізованих комплексів (ТПМК) з активним привантаженням забою у поєднанні зі збірними залізобетонними оправами підвищеної водонепроникності. Використовують також традиційні технології щитової проходки з використанням спеціальних способів робіт у поєднанні з традиційним чавунними оправами із тюбінгів і оправами із звичайних залізобетонних блоків вдосконаленої конструкції.

Одним з основних чинників, що визначають конструктивний тип і статичну роботу збірної оправи при щитовій проходці, є спосіб з'єднання елементів у кільце. За такою ознакою збірні оправи традиційно розділяють на тюбінгові і блочні, але останній час і блочні оправи можуть мати з'єднання таке, як і із тюбінгів (рис. 2.1).

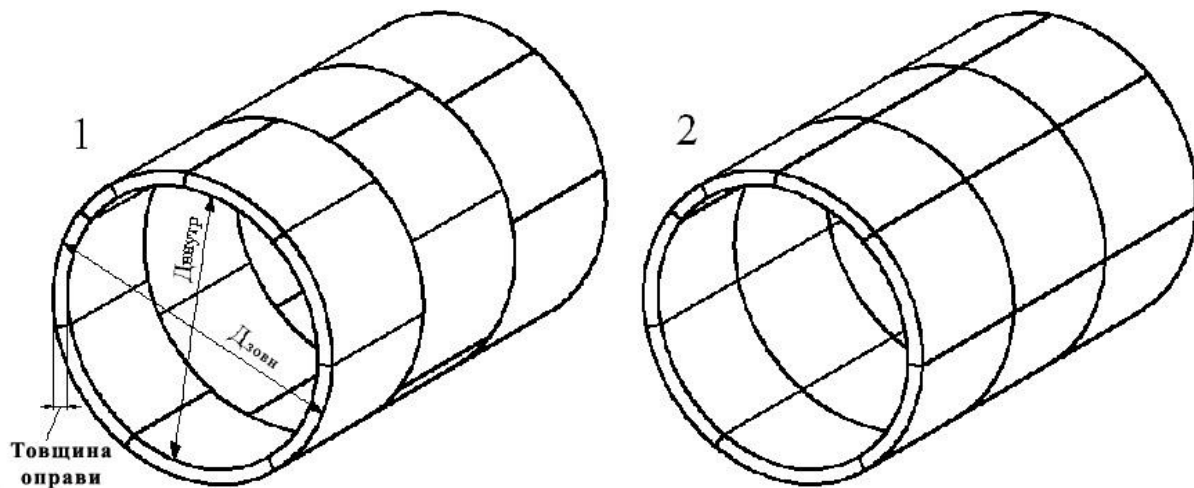


Рис. 2.1. Збірні тунельні оправи:
1 - з перев'язкою швів, 2 - без перев'язки швів

2.2 Конструкція тунельних оправ

Проектування тунельної оправи починають з формування її конструкції. Процес конструювання збірної оправи має наступну послідовність дій. Спочатку, в залежності від габариту приближення споруд, приймають величину внутрішнього діаметра оправи, потім обґрунтовують матеріал оправи в залежності від геологічних умов у відповідності з його особливостями призначають форму робочого перерізу елементів оправи та її зовнішній діаметр. Потім приймають ширину кільця і виконують розбивку його на складові елементи – тюбінги чи блоки. Після цього обґрунтовують спосіб з'єднання елементів в кільці і кільце між собою і призначають основні геометричні параметри елементів, а також вирішують питання забезпечення водонепроникності оправи.

Завершальним етапом проектування оправи є статичний розрахунок конструкції і перевірка її несучої здатності та міцності.

Обґрунтування матеріалу оправи

На вибір матеріалу оправи й визначення основних параметрів вирішальний вплив мають інженерно-геологічні й гідрогеологічні умови розташування тунелю.

У нестійких водонасичених породах ($f < 0,3 \dots 0,4$) (мули, пливуні, піски, текучі супіски й суглинки з лінзами піску тощо), а також у зонах розломів і тектонічної роздрібненості оправа повинна бути водостійкою. Кільце оправи як у робочій, так і в монтажній стадії повинно мати достатню жорсткість, тобто слід збірну оправу проектувати із зв'язками розтягнення у стиках й перев'язкою швів без лоткового блока. У цьому випадку краще застосувати оправу з тюбінгів із сірого чавуну марки СЧ 21-40. Модифікований чавун МСЧ 28...38-90...120 може бути застосований за великого гірського і гідростатичного тиску, особливо для тунелів великих діаметрів ($D_{\text{вн}} > 8,0$ м).

У зволжених слабкостійких ($f = 0,5 \dots 1,0$) і стійких ($f = 1,5 \dots 3,0$) породах можливо застосування чавунних тюбінгових і блочних залізобетонних оправ з металевим або поліетиленовим екраном по внутрішній поверхні. Якщо значення гідростатичного тиску на рівні замка тунелю досягає понад 0,15...0,20 МПа, можна застосовувати обидва типи оправи, при значенні тиску більше 0,2...0,4 МПа – чавунну тюбінгову оправу. У стійких скельних зволжених породах при гідростатичному тиску до 0,15 МПа перевага може бути віддана блочній залізобетонній оправі з внутрішнім поліетиленовим екраном.

У слабкостійких породах природної вологості з невисоким коефіцієнтом міцності ($f = 0,5 \dots 2,0$) (піски, супіски, суглинки, глини) з діаметром тунелю $D_{\text{вн}} > 7,0 \dots 8,0$ м слід застосовувати оправу з блоків суцільного перерізу зі зв'язком між кільцями або оправу із залізобетонних тюбінгів зі зв'язком на болтах. При $D_{\text{вн}} < 6,0 \dots 7,0$ м можливо застосування оправи із залізобетонних тюбінгів або блоків суцільного і ребристого поперечних перерізів з неопреновими прокладками у стиках.

У незволжених напівскельних і скельних породах ($f > 2,0 \dots 3,0$) застосовують, залежно від діаметра тунелю, оправи із залізобетонних тюбінгів, блоків ребристого або суцільного поперечного перерізу з плоскими (залізобетонні тюбінги) або циліндричними опукло-вгнутими стиками з наявністю лоткового блока.

У незволожених стійких напівскельних і скельних породах ($f > 3,0$) з великими діаметрами тунелів ($D_{\text{вн}} \geq 7,0$ м) перевагу віддають оправі із залізобетонних тюбінгів або ребристих блоків.

Призначаючи тип поперечного перерізу елемента (тюбінги, ребристі блоки, блоки суцільного перерізу), зважають на такі міркування: 1) оправы із залізобетонних тюбінгів і ребристих блоків мають підвищену жорсткість і не потребують під час монтажу верхньої частини кільця підтримки висувними балками; 2) зменшена в місці оболонки товщина оправы з тюбінгів і ребристих блоків у поєднанні з більш низькою тріщиностійкістю цих оправ збільшує їхню водопроникність; 3) вихід бетону на виготовлення тюбінгів і ребристих блоків, а отже і їхня маса менша, ніж блоків суцільного перерізу, але потреба в металі вища через великі витрати арматури, наявність болтових зав'язків і закладних металевих деталей, які обрамовують отвори; 4) при спорудженні тунелів з використанням сучасних ТПМК перевагу віддають високоточним блокам суцільного перерізу зі зв'язками розтягу у стиках.

2.2.1 Призначення основних параметрів оправы

Величина внутрішнього діаметра для оправы залежить від типу рухомого складу, який буде переміщуватись у тунелі, і внутрішнє окреслення її повинно задовольняти затвердженого для даного виду транспорту габариту наближення споруд (ГНС).

Внутрішній діаметр оправы перегінних тунелів метрополітену глибокого розташування приймають відповідно до габариту наближення споруд для метрополітенів не менше 5,1 м (рис. 2.2).

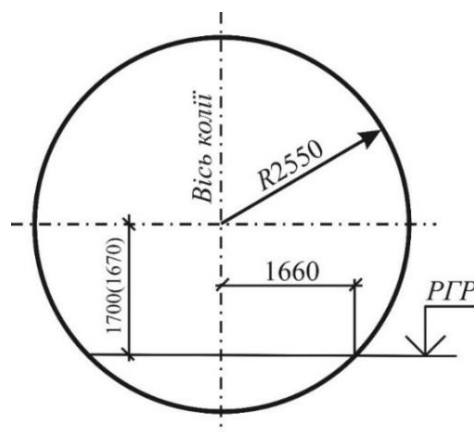


Рис. 2.2. Габарит наближення споруд для перегінного тунелю

При проектуванні варіанта оправи слід урахувати особливості верхньої будови колії перегінного тунелю метрополітену (рис. 2.3).

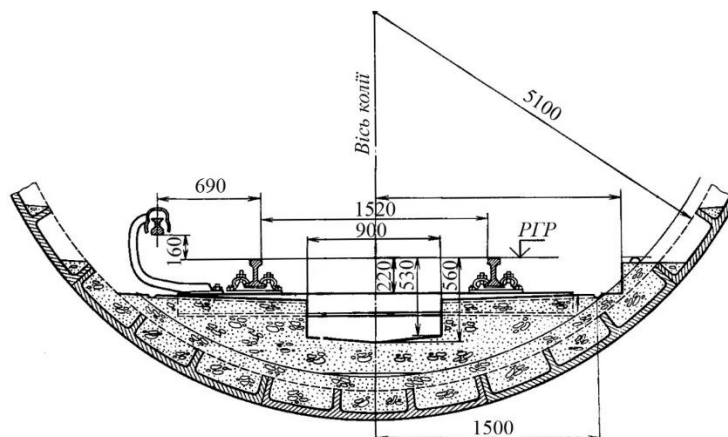


Рис. 2.3. Верхня будова колії перегінного тунелю метрополітену

Для залізничних тунелів габарит – «С». Для залізничних тунелів внутрішній обрис оправи повинен задовольняти габарит наближення споруд «С» з урахуванням електричної тяги (рис. 2.4). Висоту габариту H та його ширину зверху B призначають залежно від конструкції підвіски контактного проводу: у разі закріплення на несучому тросі приймають $H=6,4$ м та $B=2,04$ м, а без несучого троса – $H=6,25$ м та $B=2,24$ м. Для двохпутнього залізничного тунелю приймається той самий габарит, а відстань між осями колії складає 4,10 м.

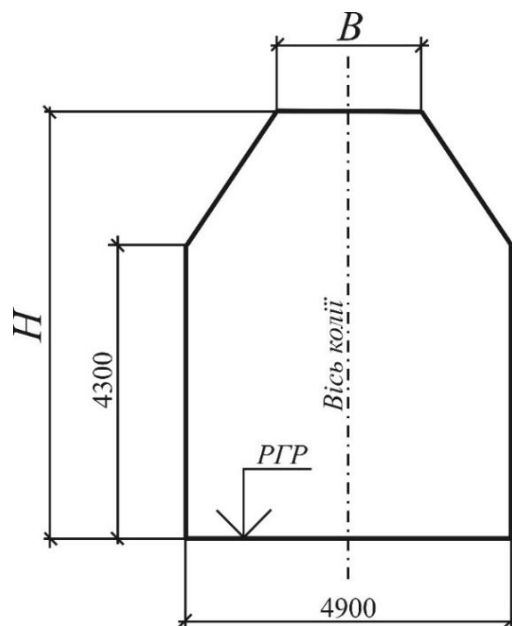


Рис. 2.4. Габарит наближення споруд «С»

При проектуванні варіанта оправи слід урахувати особливості верхньої будови колії залізничного тунелю (рис. 2.5).

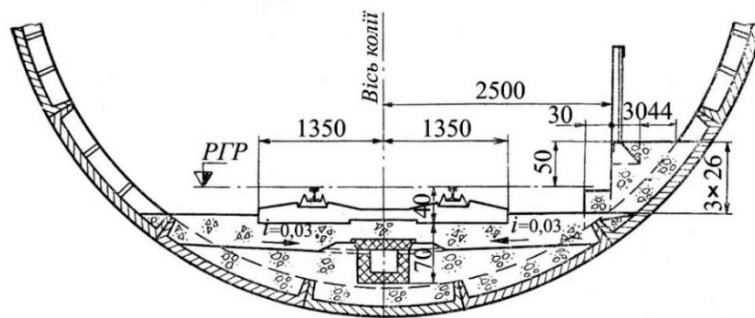


Рис. 2.5. Верхня будова колії залізничного тунелю

Внутрішній діаметр оправи автодорожніх тунелів призначають залежно від габариту наближення споруд «Г» (рис. 2.6).

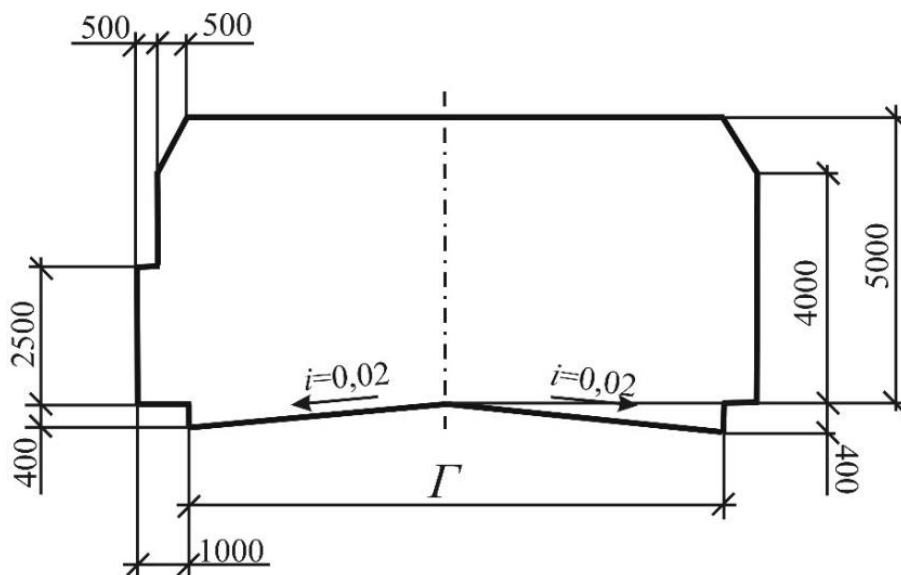


Рис. 2.6. Габарит наближення споруд «Г» з одним тротуаром

Габарит Г-7 ($G=7\,000$ мм) приймають для тунелів на автомобільних дорогах III категорії (інтенсивність руху від 1 000 до 3 000 автомашин за добу), а габарит Г-8 ($G=8\,000$ мм) – на дорогах II категорії (інтенсивність руху від 3 000 до 5 000 автомашин за добу). На дорогах I категорії (інтенсивність руху більш 5 000 автомашин за добу) слід проектувати два паралельні тунелі для роздільного руху з двома смугами у кожному із них.

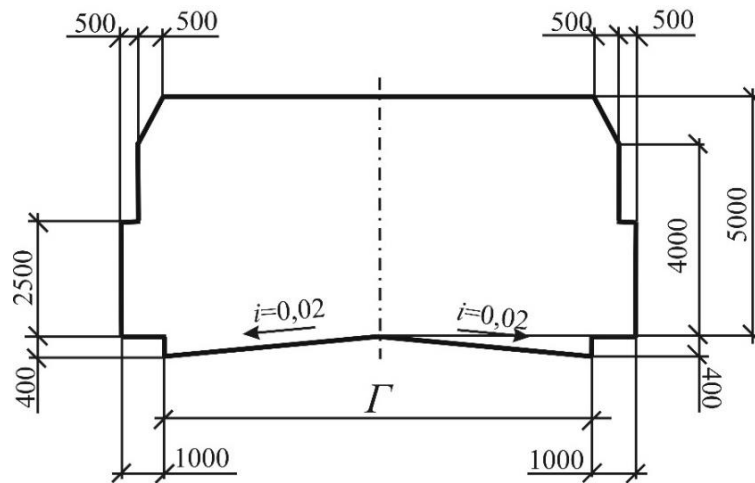


Рис. 2.7. Габарит наближення споруд «Г» з двома тротуарами

У автодорожніх тунелях повинно бути передбачене влаштування одного тротуару шириною 1,0 м. Якщо інтенсивність пішохідного руху по тунелю понад 1 000 пішоходів на годину необхідно проектувати два тротуари шириною 1,0 м кожний.

При проектуванні варіанта оправи слід урахувати особливості верхньої будови проїзної частини для автошляхового тунелю (рис. 2.8).

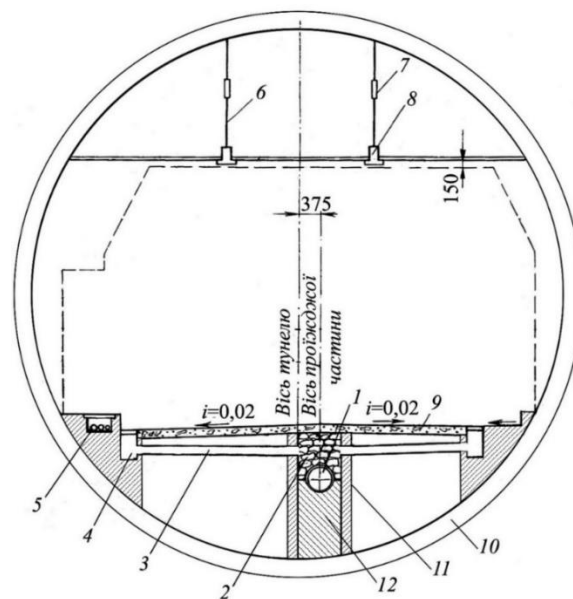


Рис. 2.8. Верхня будова автодорожнього тунелю:

- 1 – керамічна перфорована труба; 2 – гравій; 3 – чавунна водовідвідна труба;
- 4 – водовідвідна канавка; 5 – тунельні комунікації; 6 – підвіска; 7 – стяжна муфта;
- 8 – перекриття вентиляційного каналу; 9 – залізобетонні плити;
- 10 – оправа; 11 – несучі конструкції; 12 – бетонна основа лотка

При графічному обґрунтуванні величини $D_{\text{вн}}$ спочатку викреслюють габарит наближення споруд, а потім описують окружність навколо нього (внутрішнє окреслення оправи) таким чином, щоб залишити проміжок величиною $\Delta=100 \dots 150$ мм між характерними точками габариту і окресленням оправи і забезпечити можливість розміщення за межами ГНС в перегінних і залізничних тунелях споруд шляху і водовідвідних пристроїв, а у автодорожніх тунелях, окрім того, можливість розміщення за межами ГНС вентиляційних та димовидаляючих каналів, а також шляхів евакуації людей.

Внутрішній обрис перегінного тунелю збігається з обрисом габариту наближення будівель.

Внутрішній обрис для залізничних тунелів окреслюють із урахуванням зазорів (рис. 2.9).

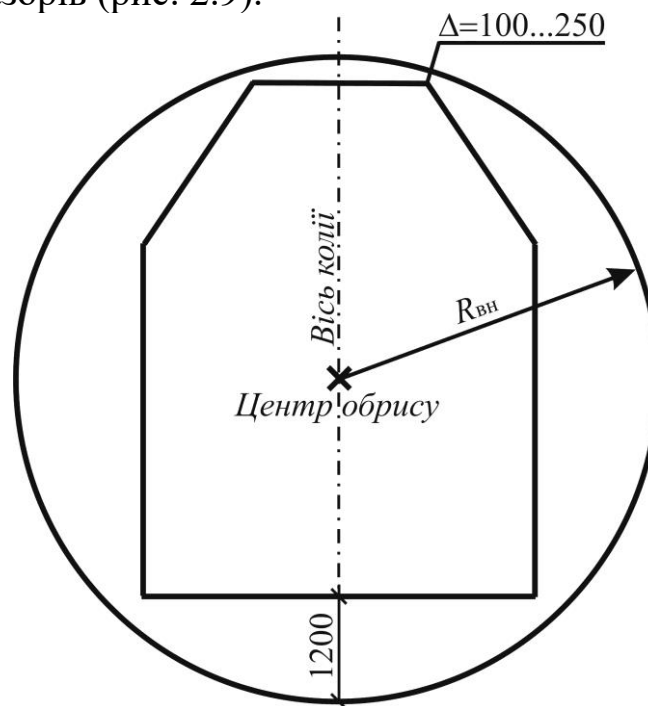


Рис. 2.9. Побудова внутрішнього окреслення оправи залізничного одноколісного тунелю

Нижній простір висотою до 1,2...1,4 м проєктується для залізничного тунелю для розміщення в ньому верхньої будови колії та улаштування водовідвідного лотка. Для двоколісного тунелю внутрішній обрис будується таким самим способом.

Внутрішнє окреслення для автошляхових тунелів також окреслюють із врахуванням зазорів (рис. 2.10).

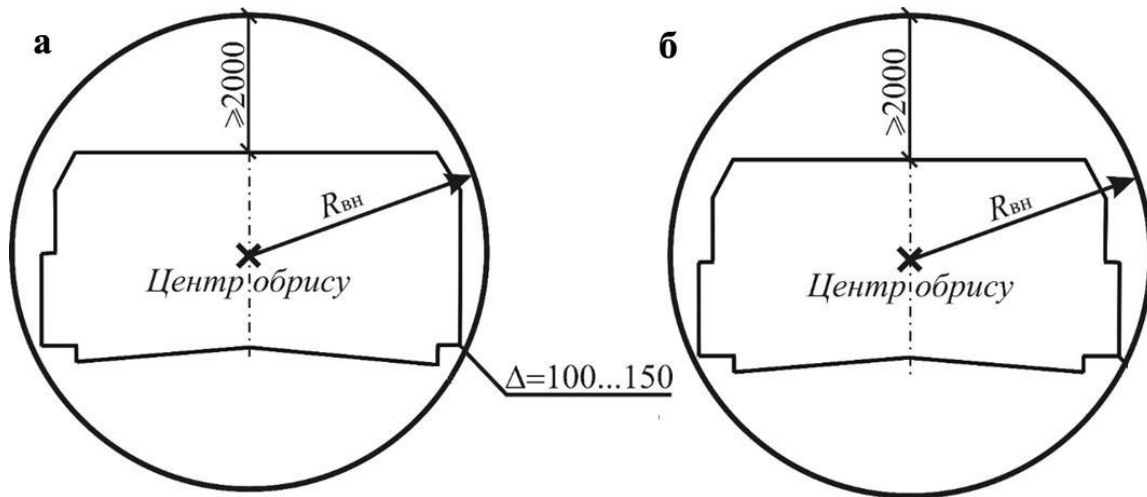


Рис. 2.10. Побудова внутрішнього обрису для автошляхового тунелю:

а – з одним тротуаром; *б* – з двома тротуарами

Верхній простір висотою більше 2 м проектується для автошляхового тунелю для його розміщення каналу для подальшої нормальної вентиляції.

Якщо внутрішній обрис у випадку габариту з одним тротуаром перехрещується з нижніми точками габариту, центр внутрішнього обрису слід пересунути по горизонталі на 0,3...0,5 м в бік тротуару. Така ситуація виникає тому, що габарит з одним тротуаром на відміну від габариту з двома тротуарами є несиметричним стосовно вертикальної осі.

Розрахункову величину зовнішнього діаметру D_z , приймають з урахуванням товщини кільця оправи. Товщина кільця оправи (висоту перерізу його елементів h_6) призначають за даними практики в залежності від величини $D_{вн}$ і типу оправи).

Визначення товщини елемента оправи

Для попереднього призначення товщини блоків і висоти бортів тюбінгів користуються емпіричною формулою:

$$h = n \sqrt[3]{\frac{R_{вн}^2}{f}}, \text{ см} \quad (2.1)$$

де $R_{вн}$ – внутрішній радіус оправи, м; f – коефіцієнт міцності породи, за класифікацією проф. М. М. Протод'яконова; n – емпіричний коефіцієнт, який дорівнює:

$n=14$ – для монолітно-пресованого бетону класу С25/30 (В30);

$n=13$ – для монолітно-пресованого бетону класу С32/40 (В40);

$n=12$ – для залізобетонних тюбінгів з бетону класу С25/30 (В30);
 $n=10$ – для залізобетонних блоків з бетону класу С25/30 (В30);
 $n=9$ – для залізобетонних блоків і тюбінгів з бетону класу С32/40 (В40);

$n=7,5$ – для чавунних тюбінгів і залізобетонних блоків і тюбінгів з бетону класу вище С40/50 (В50).

Незалежно від результатів розрахунку товщина оправи із залізобетонних блоків повинна бути не менше 15 см, а товщина бортів або оболонок залізобетонних тюбінгів – не менше 10 см. Розміри елементів оправи, отримані розрахунком, округлюють до 5 см.

Визначення ширини кільця та перевірка маси елемента

Ширина кільця визначає (якщо кількість елементів в кільці фіксована) масу елемента, а отже, і вантажопідйомність механізму для монтажу оправи. Але чим більше ширина кільця, тим менше цей показник і тим менші витрати на будівництво тунелю.

З урахуванням викладених вимог ширину кільця можна призначати:

1) для тунелів відносно невеликих діаметрів ($D_{\text{вн}}$ до 4,5 м) у нестійких породах в межах 0,6...1,0 м, у стійких – 0,75...1,25 м;

2) для тунелів середніх і великих діаметрів ($D_{\text{вн}} > 5,0$ м) у нестійких породах у межах 0,5...1,0 м, у стійких – 0,75...1,0 м. При цьому, чим слабкіше порода і чим більше діаметр тунелю, тим менша ширина кільця.

В обмежених умовах тунелю вантажопідйомність також обмежена. За даними практики маса елемента не повинна перевищувати 1,0...1,5 т для тунелів діаметром $D_{\text{вн}} < 4,5$ м; 1,5...2,0 т при $4,5 < D_{\text{вн}} < 6,5$ м; 2,5...3,0 т при $D_{\text{вн}} > 6,5$ м.

Визначення кількості елементів у кільці

Загальну кількість елементів у кільці можна прийняти рівною:

7 елементів – при $D_{\text{вн}} = 4,5...6,0$ м;

9 елементів – при $D_{\text{вн}} = 6,5...8,0$ м;

11 елементів – при $D_{\text{вн}} = 8,5...9,5$ м.

Кількість елементів у кільці для зниження трудовитрат на монтаж і гідроізоляцію поздовжніх стиків повинна бути по можливості мінімальною. Маса елемента оправи не повинна перевищувати 1,0...3,0 т, а довжина дуги по зовнішній стороні повинна бути не більше 2,0...3,0 м. Таку перевірку слід провести після розбивки кільця на елементи.

Розбивка кільця на елементи та перев'язка швів

Завданням розбивки кільця на елементи є визначення розмірів та положення всіх типорозмірів елементів у кільці. Її виконують на основі пошуку кутів елементів α . Розбивку кільця на елементи виконують, виходячи із таких міркувань:

1) усі нормальні елементи «н» мають однаковий центральний кут α_1 ;

2) центральний кут замкового елемента «з» α_3 приймається рівним $6...10^\circ$, якщо розрахунок проводиться в довжинах, то довжину по дузі елемента «з» приймають рівною $l_3 = 0,3...0,5$ м;

3) для спрощення побудов центральний кут лоткового елемента «л» α_l можна приймати рівним центральному куту нормального елемента «н» α_n . Якщо розрахунок проводиться в довжинах, то плоску внутрішню поверхню (плоский лоток) елемента «л» l_l приймають рівною $2,2...2,4$ м;

4) сума центральних кутів суміжного елемента «с» α_c та половини замкового елемента α_3 складає центральний кут нормального елемента «н» α_n , тобто

$$\alpha_n = \alpha_c + \frac{\alpha_3}{2}. \quad (2.2)$$

5) перед розбивкою кільця на елементи обирають кількість елементів у кільці та перевіряють довжину та масу нормального елемента l_n . Якщо довжина та маса відповідає вимогам, задаються кутом замкового елемента α_3 . Для випадку кільця без лоткового елемента визначають кут суміжного α_c за формулою (2.2) і за допомогою транспортиру визначають всі кути елементів на кресленні (рис. 2.11);

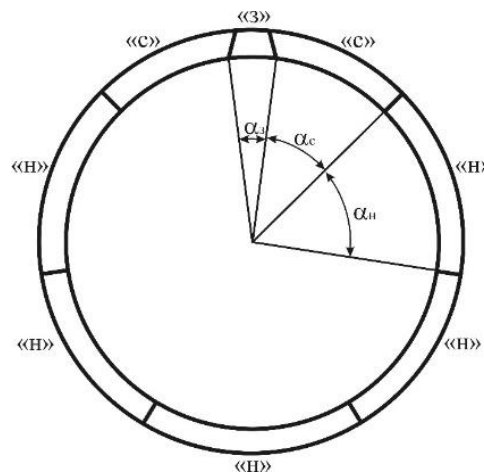


Рис. 2.11. Розбивка кільця оправи без лоткового блоку на елементи

6) перев'язку поздовжніх стиків проводять таким чином, що суміжні кільця повертаються одне відносно одного на половину кута нормального елемента $\frac{\alpha_n}{2}$;

7) якщо кільце має лотковий елемент, тоді для перев'язки поздовжніх стиків у кільце вводять половинку від нормального елемента «н»/2, яку встановлюють то ліворуч, то праворуч від лоткового. Центральний кут половинки від нормального елемента «н»/2 $\frac{\alpha_n}{2}$ визначають

$$\frac{\alpha_n}{2} = \frac{360^\circ - \alpha_l}{n}, \quad (2.3)$$

де n – кількість половин нормальних елементів «н»/2.

Розбивку кільця при проектуванні починають після того, як вже намічено лотковий елемент, і відкладають кількість половинок від нормального елемента «н»/2 на основі кута, який визначено за формулою (2.3) (рис. 2.12).

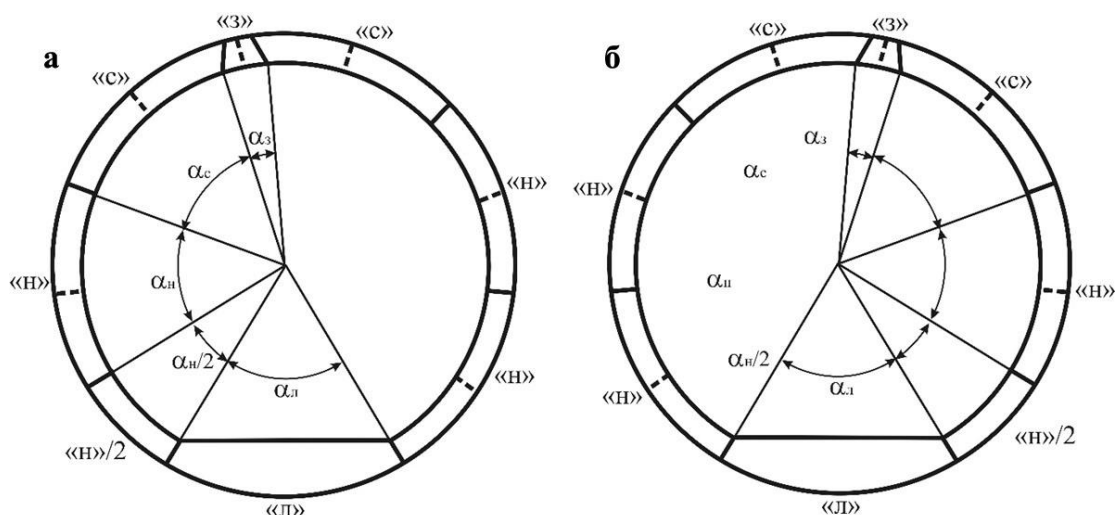


Рис. 2.12. Розбивка кільця з лотковим блоком на елементи:

(а) кільце до, та кільце після перев'язки (б)

Потім симетрично в обидва боки відкладаються значення кутів нормального елемента α_n шляхом подвоєння кута $\frac{\alpha_n}{2}$. Верхню частину оправи розбивають на два суміжні («с») та один замковий («з») елементи, причому повинно виконуватися рівняння (2.3). Якщо перев'язку в конструкції кільця з лотковим елементом не роблять, то необхідність в половинному нормальному елементі («н»/2) відпадає;

8) визначення значень кутів ведуть з точністю до 1 хв.

Завдання для самоконтролю

1. Від чого залежить кількість елементів в оправі?
3. У яких геологічних умовах застосовуються чавунні тюбінги?
4. У яких геологічних умовах застосовуються залізобетонні тюбінги?
5. У яких геологічних умовах застосовуються залізобетонні блоки?
6. Чим відрізняється нормальний блок від суміжного?
7. Чим відрізняється нормальний блок від лоткового?

3 КОНСТРУКЦІЯ ОПРАВ ІЗ ЧАВУННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ТЮБІНГІВ

3.1 Конструкції оправ із чавунних тюбінгів

Тунельна оправа повинна виконувати наступні функції:

- сприйняття зовнішніх і внутрішніх експлуатаційних навантажень і дій на конструкцію зі збереженням заданих геометричних розмірів внутрішнього перерізу тунелю;
- забезпечення функціонування тунелю відповідно до його призначення і необхідної довговічності;
- придатність для виконання монтажу в умовах щитової проходки;
- сприйняття поздовжніх зусиль, що створюються щитом під час пересування, а також тиску тампонажного розчину, що нагнітається за оправу;
- готовність до експлуатації одразу після виходу з під захисту хвостової оболонки щита;
- захист тунелю від проникнення підземних вод.

Конструкція і геометричні параметри збірної оправи повинні враховувати конструкцію і технологічні можливості ТПМК (тунелепрохідницького щитового комплексу).

Основні параметри оправи і щитового комплексу, які повинні враховуватися при оцінці відповідності ТПМК і оправи:

- зовнішній і внутрішній діаметри оправи і хвостової частини щита;
- розбиття кілець на блоки і розташування по колу щитових гідроциліндрів;
- довжина блоків оправи уздовж тунелю;
- спосіб установки замкового блоку, необхідна величина його зміщення з площини кільця для установки в проектне положення в ув'язці з ходом щитових домкратів (гідроциліндрів);
- клиновидність кілець і можливості повороту щита по трасі;
- конструкція зв'язків між блоками в ув'язці з конструкцією блокоукладача;

- максимальна маса блоків, кільця і вантажопідйомність блокоукладача;
- фізико-механічні характеристики герметизуючого ущільнення, з урахуванням напору води.



Рис. 3.1. Оправа тунелю із чавунних тюбінгів

У нестійких водонасичених породах ($f < 0,3 \dots 0,4$) (мули, пливуні, піски, текучі супіски й суглинки з лінзами піску тощо), а також у зонах розломів і тектонічної роздрібненості оправа тунелю повинна бути водостійкою. Кільце оправи як у робочій, так і в монтажній стадії повинно мати достатню жорсткість, тобто слід збірну оправу проектувати із зв'язками розтягнення у стиках й перев'язкою швів.

У цьому випадку краще застосовувати оправу з тюбінгів із сірого чавуну марки СЧ 21-40. Модифікований чавун МСЧ 28...38-90...120 може бути застосований при великому гірському і гідростатичному тиску, особливо для тунелів великих діаметрів ($> 8,0$ м).

Оправа тунелю із тюбінгів (рис. 3.1) складається з кілець, змонтованих з чавунних тюбінгів – циліндричних сегментів коробчастого перерізу (рис. 3.2).

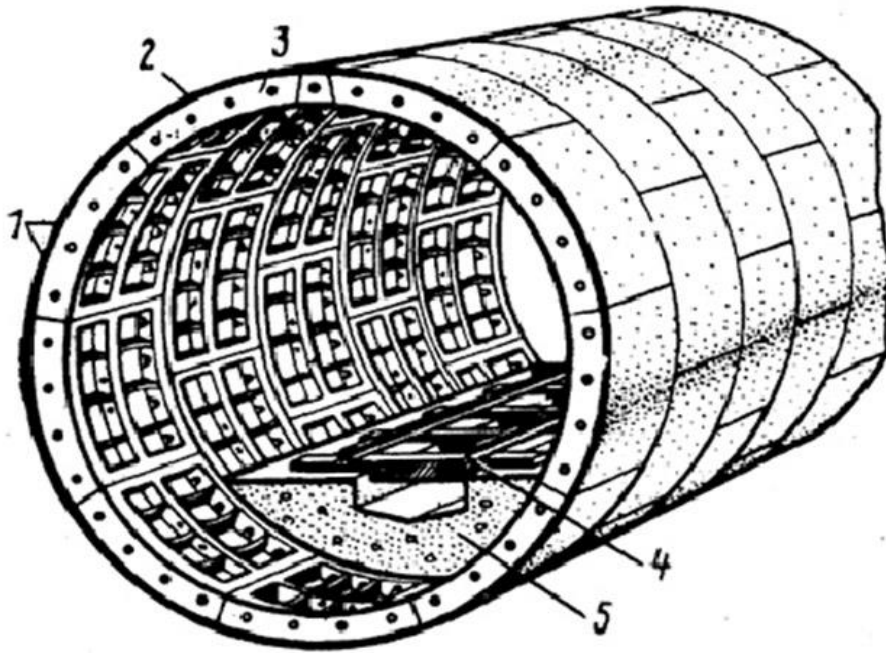


Рис. 3.2. Конструкція оправи тунелю із чавунних тюбінгів

1 - нормальний тюбінг, 2 - суміжний тюбінг, 3 - замковий тюбінг,
4 - залізничне полотно, 5 - основа полотна.

Характерною ознакою оправи із чавунних тюбінгів є наявність болтових з'єднань, що забезпечують жорсткий зв'язок елементів в кільці, тобто такий зв'язок, який гарантує в радіальних стиках безперервну передачу моментів, що вигинають, від одного елементу кільця до іншого. Така оправа має підвищену жорсткість і може розраховуватись за схемою кільця, що вільно деформується.

Кільце оправи монтують з трьох типів тюбінгів: нормальних 1 (рис. 3.2), обидва поздовжніх борта яких направлені радіально, одного замкового 3 клиновидної форми із скошеними поздовжніми бортами і двох суміжних 2, які відрізняються від нормальних тим, що їх поздовжні борти, що примикають до замкового тюбінга, скошені. Наявність клиновидного замкового тюбінга дозволяє завершити монтаж кільця шляхом закладу цього тюбінга зсередини тунелю.

Кількість нормальних тюбінгів залежить від величини діаметру кільця і мінімального розміру чавунного тюбінгу по хорді.

Для збільшення жорсткості оправ з чавунних тюбінгів їхні кільця на монтажі укладають з перев'язкою поздовжніх стиків. Для цього кожне подальше кільце зміщують відносно попереднього на кут, що відповідає одному або двом крокам болтових отворів в кільцевих

бортах. Таким чином, тюбінги двох сусідніх кілець грають роль накладок в стиках.

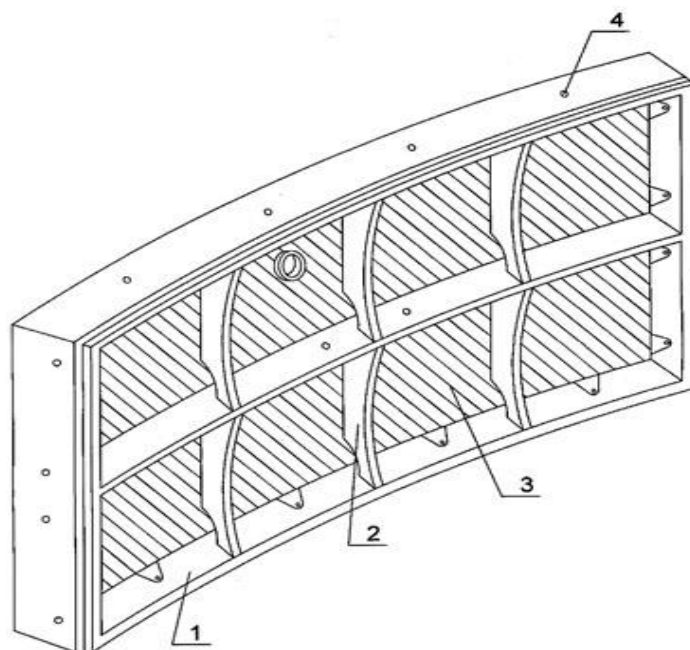


Рис. 3.3. Конструкція чавунного тюбінга:

1 - кільцевий борт, 2 - повздовжнє ребро, 3 – спинка тюбінгу

З'єднання тюбінгів один з одним в кільці і кільце між собою здійснюється на болтах. Для цього у бортах передбачені болтові отвори 4 (рис. 3.3), діаметр яких на 3...4 мм більше діаметру болтів. Зазвичай застосовують сталеві болти діаметром 27...42 мм. У кожному конкретному випадку величина діаметру болтів обґрунтовується розрахунком на міцність.

У поздовжніх стиках болти є такими, що приймають навантаження і мають бути розраховані на сприйняття зусиль, що діють в кільці. Щоб не допустити розкриття стиків всередину чи назовні кільця під дією згинальних моментів змінного знаку, ці болти розташовують в два ряди.

Конструктивні рішення чавунних тюбінгових оправ відрізняються кількістю типорозмірів елементів, що складають кільце, використання лоткового блоку або його відсутність.

Кільце оправи без плоского лотка (рис. 3.4.) має три типорозміри тюбінгів:

- нормальний «85Н», обидва поздовжніх борти якого спрямовані радіально;
- замковий «85К» клиноподібної форми;

– суміжний «85С», у якого один поздовжній борт, що примикає до замкового тюрінга, скошений.

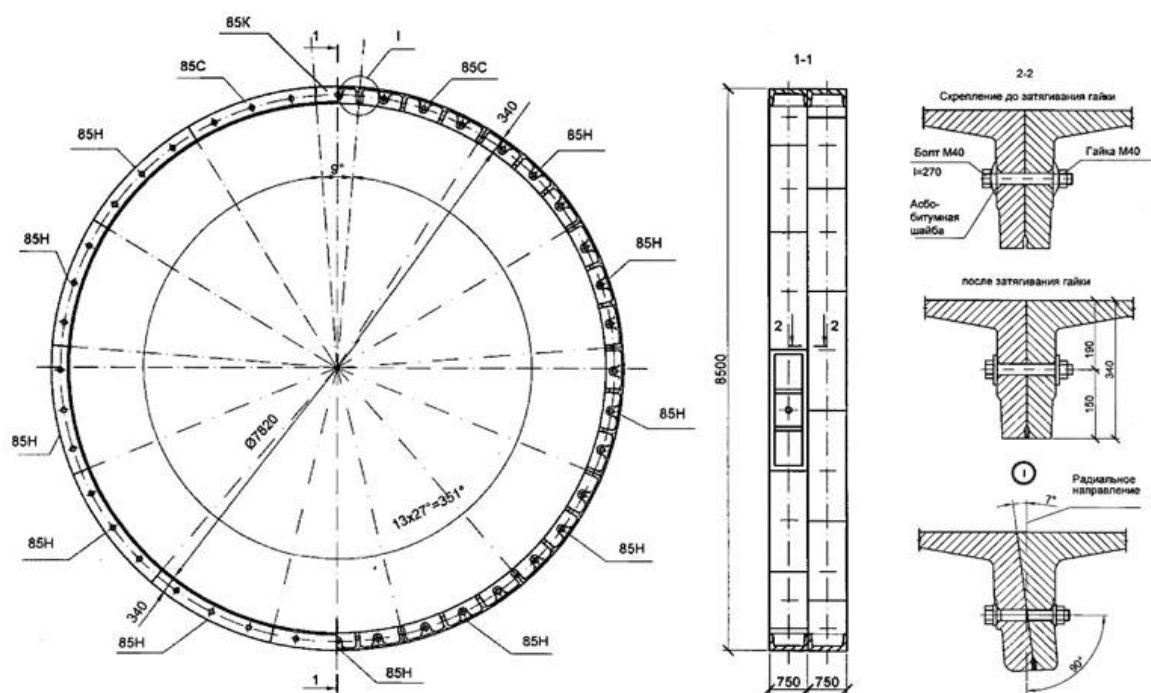


Рис. 3.4. Кільце чавунної оправи без лоткового блоку

Перевагами цієї оправи є мінімальна кількість типорозмірів тюрінгів, повна водонепроникність за будь-якого гідростатичного тиску й простота забезпечення перев'язки поздовжніх стиків у суміжних кільцях (простим зміщенням замкового елемента ліворуч і праворуч від вертикальної осі на 1...2 болтових кроки).

Недоліком цієї оправи є відсутність плоскої поверхні в лотку і як наслідок – необхідність улаштування колії для відкатки на дерев'яному настилі або бетонній основі, а також складність подальшого очищення лотка від бруду.

Кільце оправи з плоским лотком (рис. 3.5.) включає чотири типорозміри елементів:

- нормальний «Н»;
- замковий «З»;
- суміжний «С»;
- лотковий блок «Л», який виконано із залізобетону, а плоска внутрішня поверхня якого покрита чавунною ребристою плитою, зв'язаною з арматурою блока.

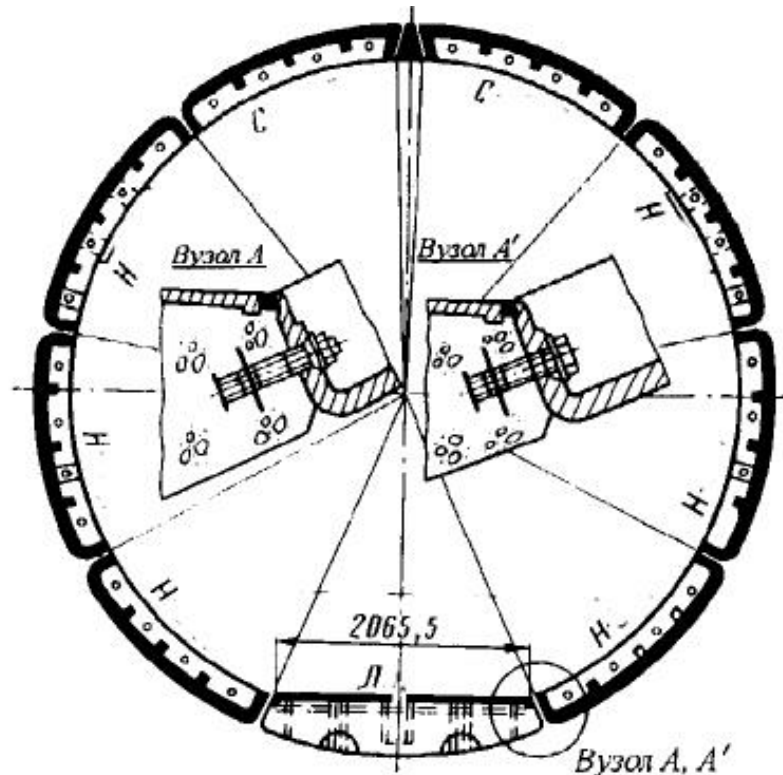


Рис. 3.5. Кільце чавунної оправи з лотковим блоком

Перевагою цієї оправи є те, що вона не потребує перев'язки поздовжніх стиків. Недоліками оправ з плоским лотком є велика кількість типорозмірів, складність герметизації стиків між лотковим і нормальним блоком через різну точність виготовлення залізобетонних і чавунних елементів.

Як було зазначено вище, тюбінги чавунної оправи з'єднуються між собою в поздовжніх і кільцевих бортах болтами зі сталі марок СТЗ або СТ5 діаметром 20...45 мм. Для полегшення монтажу діаметри болтових отворів приймаються на 3...4 мм більшими діаметра болтів. Болтові отвори в кільцевих бортах розміщують в один ряд по середній лінії з однаковим кроком. У поздовжніх бортах болтові отвори розміщують у два ряди.

Максимальна довжина чавунних тюбінгів (по зовнішній хорді) не повинна перевищувати 2 м (рис. 3.7).

У спинці тюбінга передбачають нарізний отвір діаметром 50 мм для виконання нагнітання розчинів за оправу.

Болти, що встановлюються по кільцевих бортах, виконують функцію монтажних з'єднань, а також забезпечують щільне притискання кілець один до одного, що виключає їх відносне

зміщення у слабких водонасичених ґрунтах. Отвори для цих болтів розташовують з однаковим кроком по розбивочному колу з розрахунку: чотири отвори на кожен нормальний і суміжний тюбінг і один на замковий.



Рис. 3.6. Вид типового чавунного тюбінга

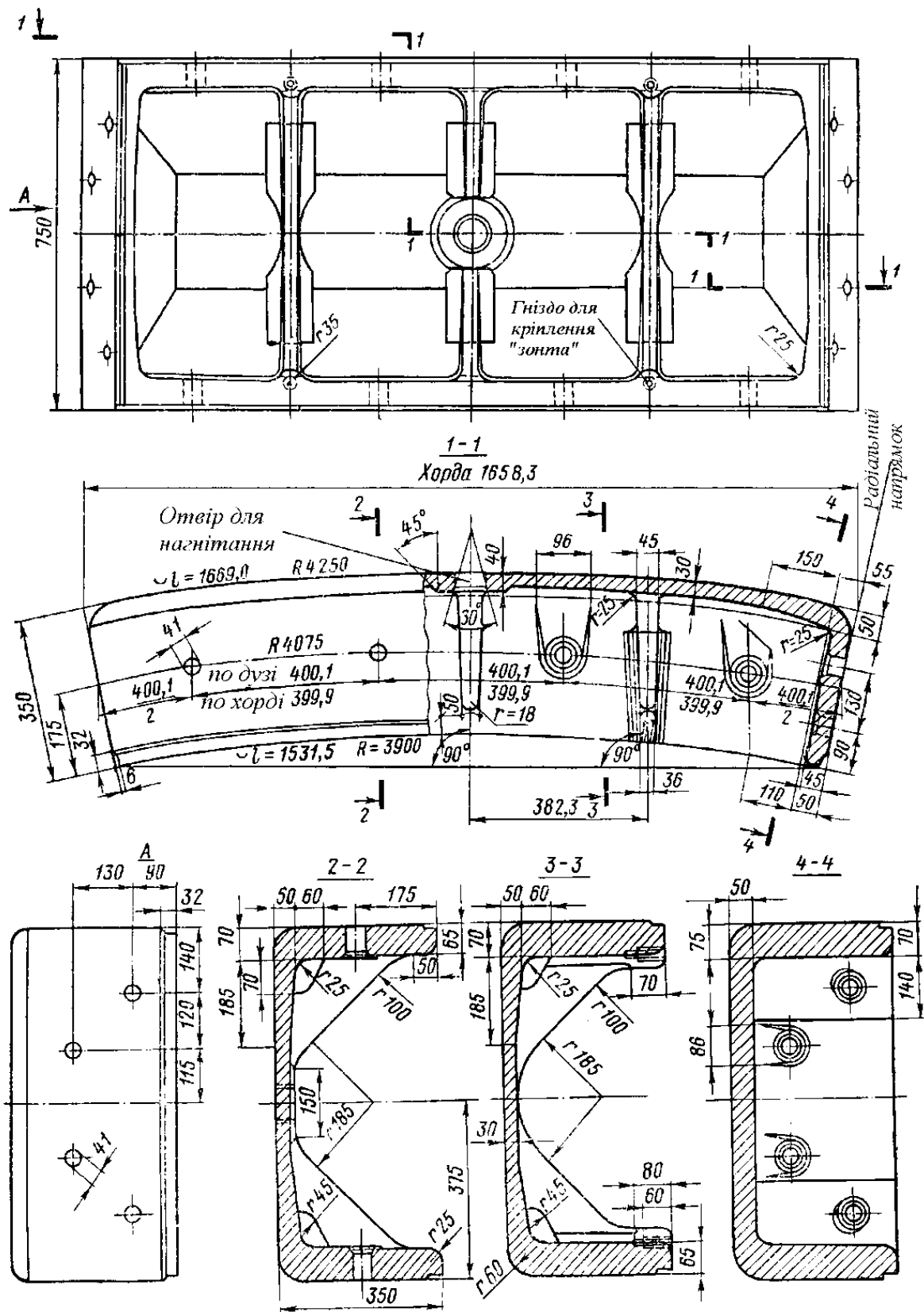


Рис. 3.7. Конструкція типового нормального (Н) чавунного тьюбінга

3.2 Конструкції оправ із залізобетонних тюбінгів

У незволожених напівскельних і скельних породах ($f > 2,0 \dots 3,0$) застосовують, залежно від діаметра тунелю, оправи із залізобетонних тюбінгів, блоків ребристого або суцільного поперечного перерізу з плоскими (залізобетонні тюбінги) або циліндричними опукло-ввігнутими стиками з наявністю лоткового блока.

У незволожених стійких напівскельних і скельних породах ($f > 3,0$) з великими діаметрами тунелів (7,0 м) перевагу віддають оправі із залізобетонних тюбінгів або ребристих блоків.

Конструктивні рішення збірних залізобетонних кругових оправ розрізняють:

- за типом поперечного перерізу елементів (тюбінги, блоки ребристого і суцільного перерізу);
- типом поздовжніх стиків у кільці (плоскі стики з болтовими зв'язками, монтажними шпильками, трубчатою вставкою; шарнірні стики циліндричні опукло-ввігнуті або плоскі зі зменшеною площиною обпирання, з пружною прокладкою);
- характером зв'язку між суміжними кільцями.

На рис. 3.8. показана оправа із залізобетонних тюбінгів під час спорудження тунелю.



Рис. 3.8. Вид тунельної оправи із залізобетонних тюбінгів

Залізобетонна тюрбінгова оправа, як і чавунна, складається з елементів коробчастого перетину (рис. 3.9), які з'єднані у кільці робочими болтовими зв'язками. З'єднання між кільцями теж болтове. Товщини поздовжніх і кільцевих бортів (ребер), а також товщина спинки залізобетонного тюрбінгу, збільшені у порівнянні з чавунною оправою.

Так, для тунелів з зовнішнім діаметром $D_{\text{зн}}=5,5$ м товщина поздовжніх (радіальних) бортів і поздовжніх діафрагм приймається рівною 80 мм, поперечних бортів – 150...160 мм, спинки тюрбінгу – 60 мм. Висота бортів (товщина кільця) рівна 200 мм. Поперечне ребро жорсткості в них може бути передбачено.

Залізобетонні тюрбінгові оправи без плоского лотка за принциповим конструктивним рішенням аналогічні чавунним: у кільце оправи входять три типорозміри тюрбінгів – «н», «з», «с».

Для виключення недоліків, пов'язаних із відсутністю горизонтального лотка тунелю, у склад кільця входять залізобетонний лотковий блок «л» суцільного поперечного перерізу або ребристого із зовнішньої сторони, а для забезпечення перев'язки поздовжніх стиків – половинний тюрбінг «п».

Оправи з ребристих блоків (рис. 3.9.) відрізняються від тюрбінгових більшою товщиною спинки й бортів кожного елемента кільця та відсутністю болтових зв'язків у поздовжніх стиках. Кільця можуть мати три типорозміри ребристих блоків («н», «з», «с»), частіше – чотири («н», «з», «с», «л») за відсутності перев'язки поздовжніх стиків, або п'ять («н», «з», «с», «л», «п»), якщо оправу монтують з перев'язкою поздовжніх стиків.

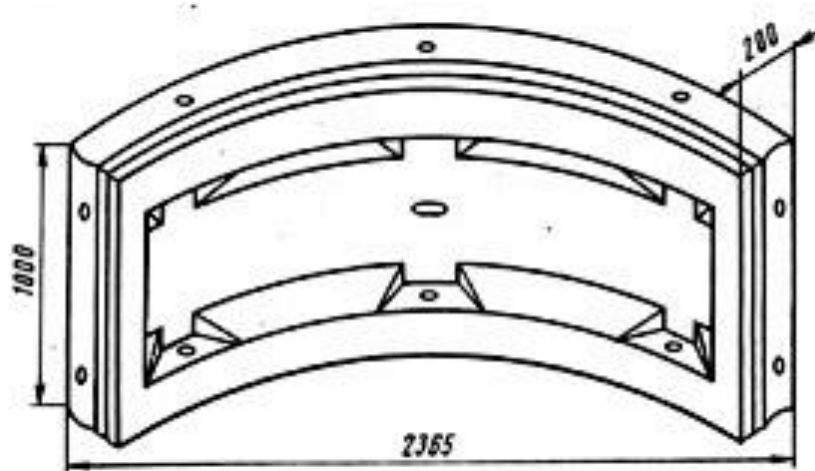


Рис. 3.9. Конструкція нормального ребристого блока

Відсутність болтових зв'язків у поздовжніх стиках знижує жорсткість кільця, але підвищує тріщиностійкість і водонепроникність оправи. Якщо між кільцями передбачені болтові зв'язки, то всі поздовжні стики роблять плоскими з монтажними шпильками (між блоками «л», «н», «з», «п») або з трубчатим вкладишем (між блоками «з» і «с»).

На рис. 3.10. показана конструкція нормального залізобетонного тюрінга з двома поздовжніми ребрами і одним кільцевим. Ширина тюрінга 100 см. Висота бортів (товщина) 25 см.

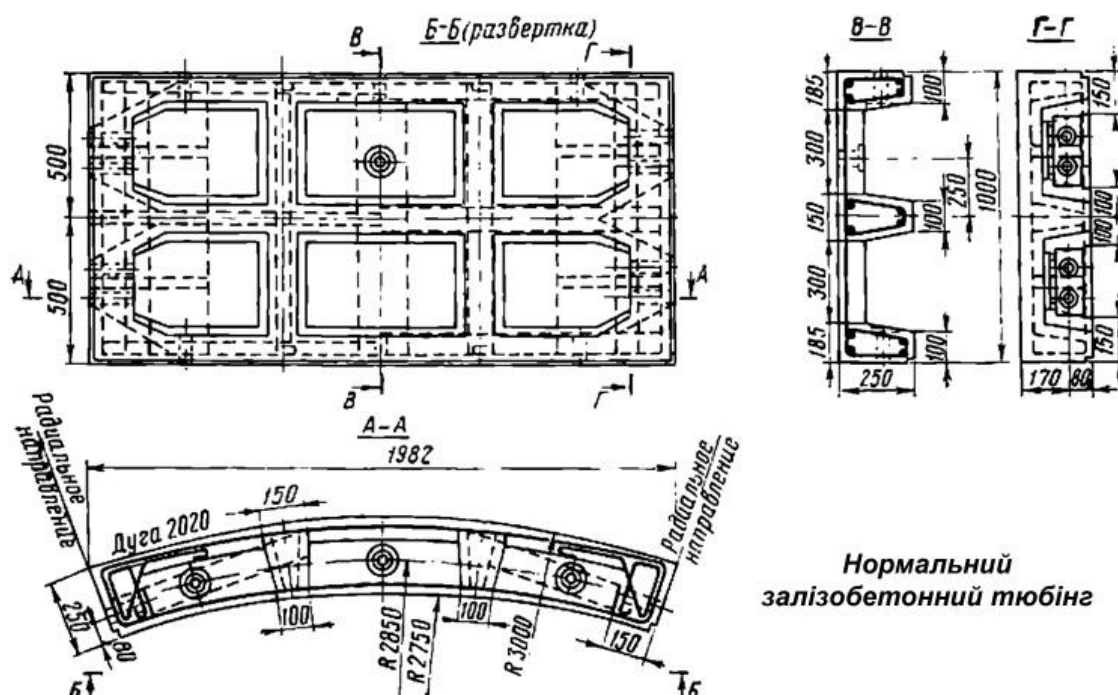


Рис. 3.10. Конструкція нормального залізобетонного тюрінга

Зв'язок між кільцями підвищує жорсткість оправи як труби, що особливо важливо на монтажній стадії. Жорсткість кільця оправи забезпечується встановленням болтових зав'язків у поздовжніх стиках між елементами (оправа із залізобетонних тюрінгів). У таких самих геологічних умовах за менших діаметрів тунелю вимоги до жорсткості оправи знижуються. У поздовжніх стиках між елементами болтові зв'язки не ставлять навіть в оправах із залізобетонних тюрінгів (рис. 3.11), замінюючи їх на монтажні шпильки.

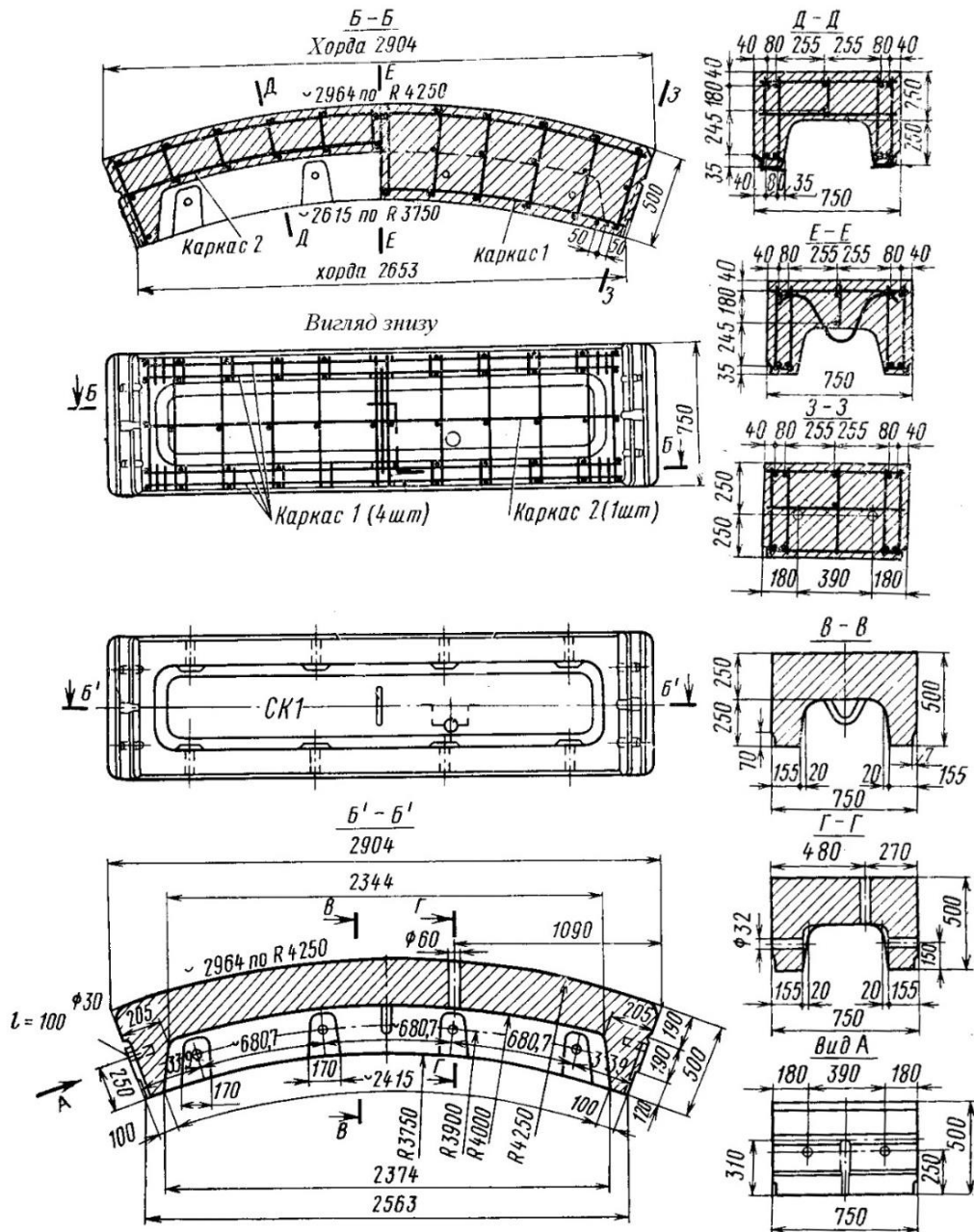


Рис. 3.11. Конструкція і армування залізобетонного тюбінга при ширині кільця оправи 0.75 метра.

До недоліків залізобетонної тюбінгової оправи слід віднести знижену тріщиностійкість і значну витрату металу на закладні частини болтових з'єднань. Вона не тріщиностійка: тріщини можуть виникати під час виготовлення тюбінгів, в місцях болтових з'єднань при затягуванні болтів у процесі монтажу, а також при виникненні зусиль при дії гідроциліндрів під час пересування щита.

Тому в теперішній час при проєктуванні оправ рекомендується застосовувати залізобетонні оправы із блоків (при використанні сучасних ТПМК).

Завдання для самоконтролю

1. У яких випадках застосовують оправы із чавунних тюбінгів?
2. У яких випадках застосовують оправы із залізобетонних тюбінгів?
3. У яких умовах застосовуються лотковий блок?
4. Перелічите основні елементи тунельної оправы?
5. У чому складається відмінність зв'язків у стиках при чавунних і залізобетонних тюбінгах?

4 КОНСТРУКЦІЯ ТУНЕЛЬНИХ ОПРАВ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БЛОКІВ

4.1 Оправи із залізобетонних блоків без зв'язків розтягу у стиках

Залізобетонні оправи з блоків суцільного або ребристого поперечного перерізу відрізняються від оправ із тюбінгів характером зв'язку між блоками у кільці і кільцями між собою.

Оправи з ребристих блоків відрізняються від тюбінгових більшою товщиною спинки та бортів кожного елемента кільця та відсутністю болтових зв'язків у поздовжніх стиках. Зв'язок між кільцями болтовий, рідко постійний частіше тільки на період монтажу оправи.

У минулі роки оправи із залізобетонних блоків використовувалися по-перше у випадках, коли була необхідність використання внутрішньої гнучкої гідроізоляції, бо мали гладку внутрішню поверхню на відміну від тюбінгів, по-друге у тунелях невеликого діаметру, коли в оправі виникали здебільшого стискуючі напруження які не приводили до руйнування стиків між блоками у кільці.

Тунельна оправа із блоків (рис. 4.1) складається з кілець, змонтованих із залізобетонних елементів - блоків (рис. 4.2) зазвичай з гладкою внутрішньою поверхнею. Блоки у кільці не мають зав'язків у стиках і між собою з'єднуються на шпильках.

Одним із недоліків такої оправи є руйнування бетону (скол) у радіальних стиках при виникненні великих згинальних моментів (рис. 4.4. а). Тому у звичайній залізобетонній оправі контактні поверхні блоків у радіальних стиках конструюють таким чином, щоб їхнє спирання у цих стиках наближалось до шарнірного (рис. 4.4. б).

Характерною особливістю такої оправи є виключення можливості передачі згинального моменту в поздовжніх стиках елементів кільця оправи. Така оправа здатна працювати тільки спільно з навколишнім ґрунтом, який для цього повинен мати достатній пружний опір.

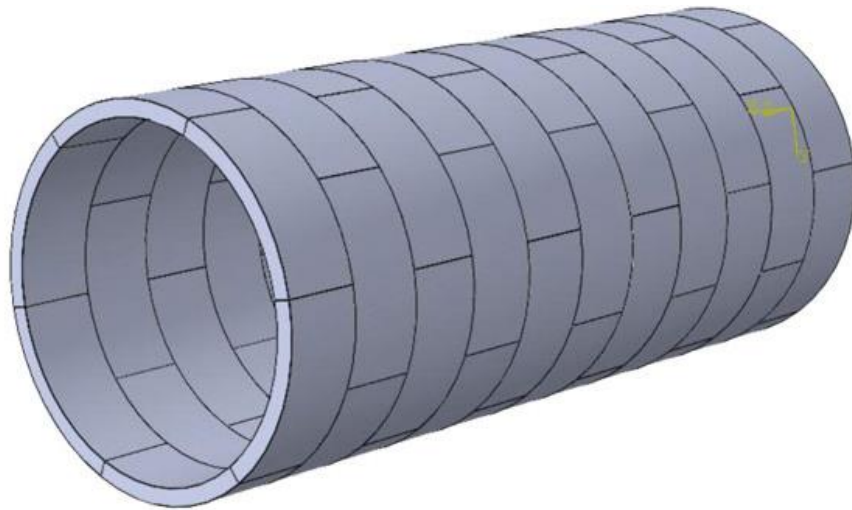


Рис. 4.1. Вид оправи тунелю із залізобетонних блоків

На рис. 4.2. показано нормальний блок кільця оправи шириною 1 м. товщина блоку 200 мм він має отвір у центрі для нагнітання і фаску по внутрішньому контуру для утворення чеканочної канавки.

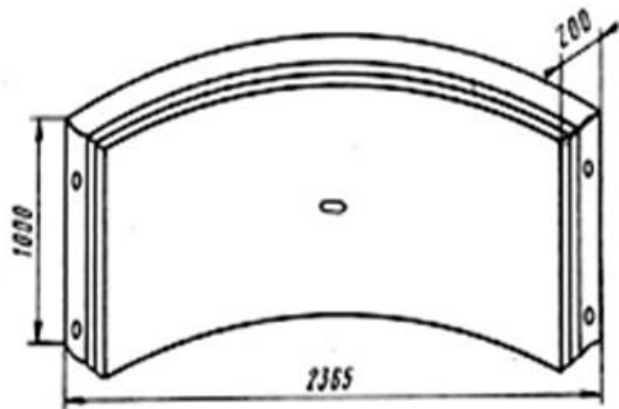


Рис. 4.2. Вид залізобетонного блоку

На рис. 4.3. показана уніфікована тунельна оправа для перегінних тунелів метрополітену із залізобетонних блоків з лотковим блоком, який має горизонтальну поверхню.

Число елементів в оправах із залізобетонних блоків залежить від діаметра кільця і визначається масою елемента, яка за умовами монтажу у стиснених підземних умовах не повинна перевищувати 2–2,5 т, та довжиною дуги по зовнішній стороні, яка за умовами транспортування не повинна перевищувати 2...3 м.

Кільце оправи має три типорозміри блоків: лотковий «л», нормальні «н», вкладиші «в». Завдяки шарнірності стиків і відсутності

зв'язків між кільцями оправа має високу деформативність, що покращує її статичну роботу під навантаженням.

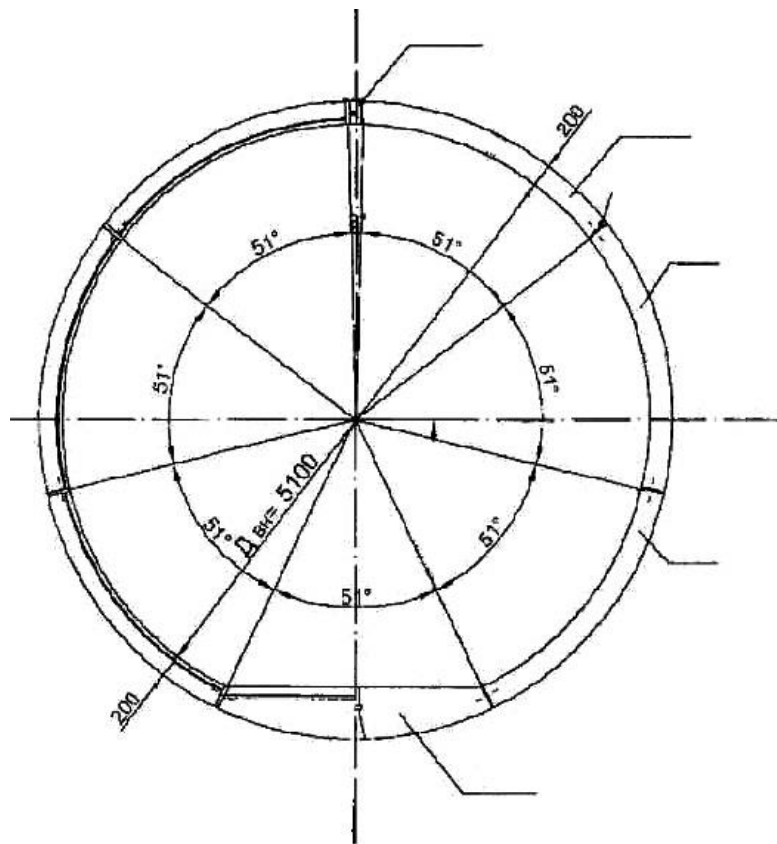


Рис. 4.3. Уніфікована оправа тунелю із залізобетонних блоків:
1 – вкладиш, 2 – нормальний блок, 3 - лотковий блок.

Досвід практичного застосування збірних залізобетонних оправ та експериментальні дослідження на стендах показують, що несуча здатність та тріщиностійкість оправ визначаються міцністю поздовжніх стиків.

Плоский стик (рис. 4.4. а) характеризується передачею внутрішніх зусиль по плоских торцях елементів, що стикаються.

У плоскому стику з монтажними шпильками в кожному торці елемента приблизно в чвертях його ширини передбачені два отвори глибиною 75 мм для встановлення у них сталевих шпильок діаметром 20...30 мм. Діаметр отвору на 2...4 мм більший, що полегшує монтаж та виключає роботу шпильок на вигин при деформаціях кільця під навантаженням.

В залізобетонних оправах із блоків, які з'єднуються на монтажні шпильки, для запобігання сколів бетону, поздовжні стики виконують

циліндричними опукло-ввігнутими або плоскими, але зі зменшеною висотою опорних площадок. У тому і в іншому випадках стик може розглядатися як шарнірний (рис. 4.4).

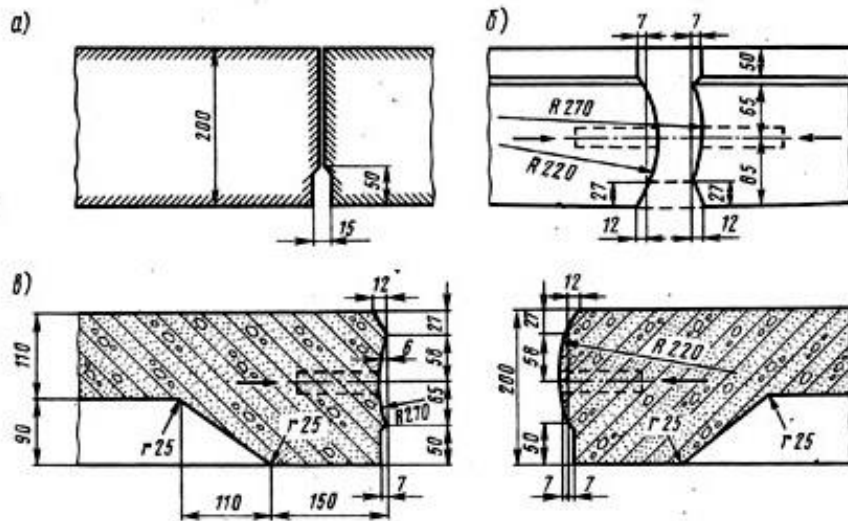


Рис. 4.4. Конструкція поздовжніх стиків залізобетонних оправ:
а – плоский стик, б – шарнірний стик, в – шарнірний при блоках ребристого перерізу.

У вітчизняній практиці тунеле- і метробудування оправа із блоків без зв'язків між кільцями з циліндричними опукло-ввігнутими стиками між блоками у кільці, дістала назву уніфікована (рис.4.4).

Недоліки оправи теж впливають з її високої деформативності: необхідність підклинювання блоків у породу і оболонки щита під час монтажу для забезпечення необхідної геометрії кільця; можливість отримання неприпустимої еліптичності кільця до моменту твердіння розчину, що нагнітають за оправу, особливо в слабких породах; необхідність під час монтажу підтримувати верхні блоки на висувних балках.

4.2 Оправи із залізобетонних блоків зі зв'язками розтягу у стиках

У багатьох випадках спорудження тунелів роботи виконуються в складних інженерно-геологічних умовах. Ступінь складності цих умов визначається в основному водо-насиченістю ґрунтів і їхньою стійкістю при розкритті виробки, особливо в умовах міської забудови.

У цей час у світовій практиці такі проблеми успішно вирішуються шляхом використання прохідницьких комплексів ТПМК із активним привантаженням забою спільно зі збірними залізобетонними оправами із блоків суцільного перерізу підвищеної водонепроникності.

Конструктивні рішення оправ з блоків суцільного перерізу відрізняються за характером зав'язків між кільцями, типом поздовжніх стиків, кількістю типорозмірів блоків у кільці. Кільце оправи з блоків з болтовими з'єднаннями між кільцями може мати три («н», «з», «с»), чотири («н», «з», «с», «л») або п'ять («л», «н», «з», «п», «с») типорозмірів блоків. Вибір залежить від розмірів тунелю, геологічних умов та способу спорудження.

Кільце оправи з блоків з монтажними шпильками між кільцями (рис. 4.5) складається з блоків трьох типорозмірів: лоткового «л», нормальних «н», замкових вкладишів «в». Вкладиші (2-3 по ширині кільця) при замиканні кільця заводять у зазор з торця. Поздовжні стики між блоками циліндричні опукло-ввігнуті з монтажними шпильками. Для встановлення шпильок по кільцевих стиках у кожному блоці (окрім лоткового і вкладишів) передбачені ніші.

Перевагою цієї конструкції є те, що шпильки дозволяють монтувати верхню частину кільця без висувних балок, що підтримують оправу, але припускають деяку деформацію кільця без взаємодії із сусідніми через різницю в діаметрах отвору і шпильок (3...4 мм). Завдяки цьому, а також шарнірності поздовжніх стиків, кільце оправи являє собою багатошарнірну систему, що покращує його статичну роботу під навантаженням.

Недоліки: послаблення перерізу блока нішами; можливість появи тріщин у місцях розташування монтажних шпильок між кільцями в разі значних деформацій кільця.

Кільце оправи з блоків зі шпонкою між кільцями для щитової проходки має три («н», «з», «с») або чотири («н», «з», «с», «л») типорозміри блоків, а для безщитової (еректорної) проходки один («н») або два («л», «н»). За відсутності замкового блока замикання

кільця забезпечується перебором породи над замковою частиною оправи на 15...20 см. Поздовжні стики між блоками – плоскі з циліндричною шпонкою із затверділого піщано-цементного розчину, що нагнітається в циліндричний паз після монтажу кільця.

Конструкція високоточної оправи із залізобетонних блоків показана на рис. 4.5.

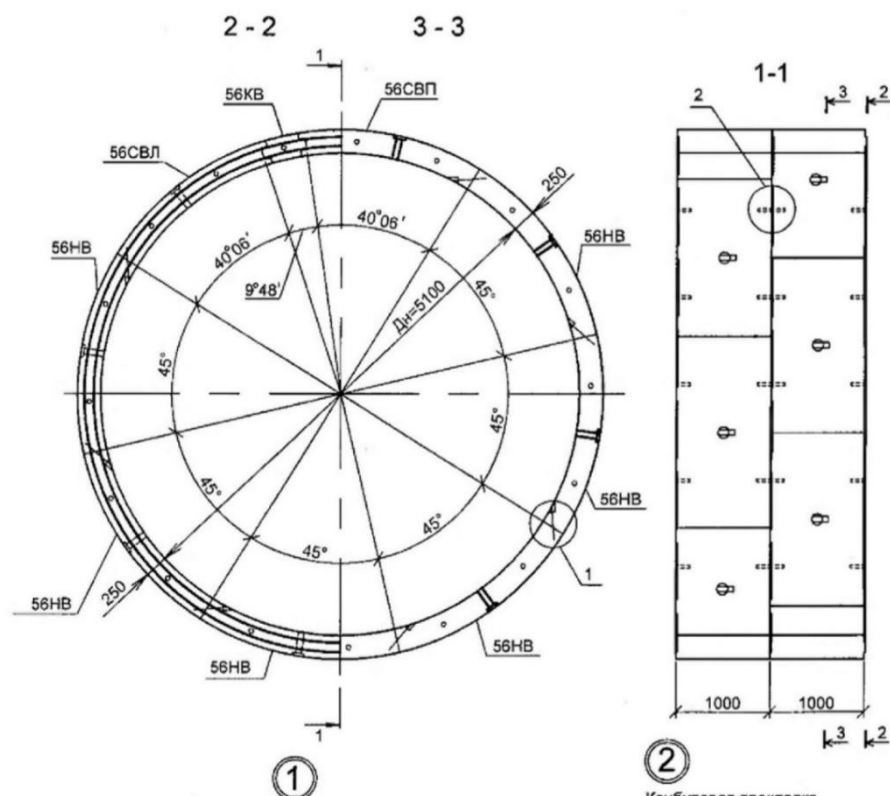


Рис. 4.5. Конструкція високоточної оправи: 1, 2 – стики між блоками показані на рис. 4.6.

Герметизуючі ущільнення (прокладка): виріб замкнутої форми у вигляді чотирикутної рамки з гуми або резиноподібного матеріалу спеціального профілю. Герметизуючі прокладки вклеюються в спеціальні пази на торцях блоків. Під час монтажу поверхні прокладок контактують між собою, обтискаються, утворюючи водонепроникний контур гідроізоляції в стиках. Прокладка може бути виготовлена з матеріалу, що водонабрякає. В цьому випадку обтискання здійснюється за рахунок набрякання прокладки. Профіль прокладки може також бути складним, що включає пружний матеріал і компонент, що водонабрякає та стискується.

Розподільна прокладка: пластина, що укладається в кільцевому стику між блоками тунельної оправи, призначена для зменшення контактного напруження у бетоні сусідніх блоків від дії щитових гідроциліндрів при проходці тунелю. Пластина виготовляється з податливішого матеріалу, ніж бетон блоків оправи.

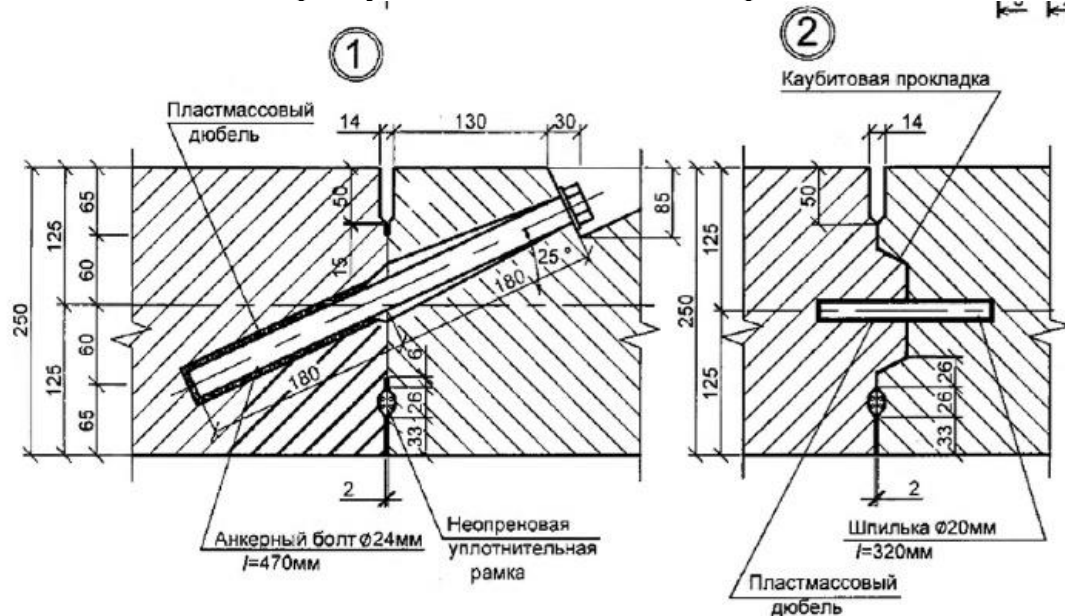


Рис. 4.6. Конструкція стиків оправи: 1- стик зі зв'язками розтягу, 2 – стик без зав'язків розтягу.

Блоки оправи повинні задовольняти встановленим при проектуванні міцностним вимогам, які забезпечуються дотриманням комплексу нормованих і проектних показників, що характеризують міцність бетону, товщину захисного шару бетону, розміри перерізів, розташування арматури, діаметр і механічні властивості сталі, основні розміри арматурних виробів. Ці показники перевіряються в процесі вхідного, операційного і приймального контролю, що виконуються виробником блоків.

В усіх блоках обов'язково передбачається отвір для нагнітання, це наскрізний отвір у блоці в радіальному напрямі призначений для нагнітання тампонажного розчину за оправу. При розташуванні в центрі блоку отвір для нагнітання може поєднуватися із заставною деталлю для закріплення блоку на важелі блокоукладача при монтажі кільця оправи.

В деяких випадках застосовуються оправи із блоків, які мають зв'язками розтягу між блоками у кільці оправи і між кільцями оправи (рис. 4.7).



Рис. 4.7. Оправа тунелю із залізобетонна блоків зі зв'язками розтягу у стиках, як між блоками у кільці так і між кільцями.

На рис. 4.8. показані конструкції стиків зі зв'язками розтягу як між блоками у кільці так і між кільцями.

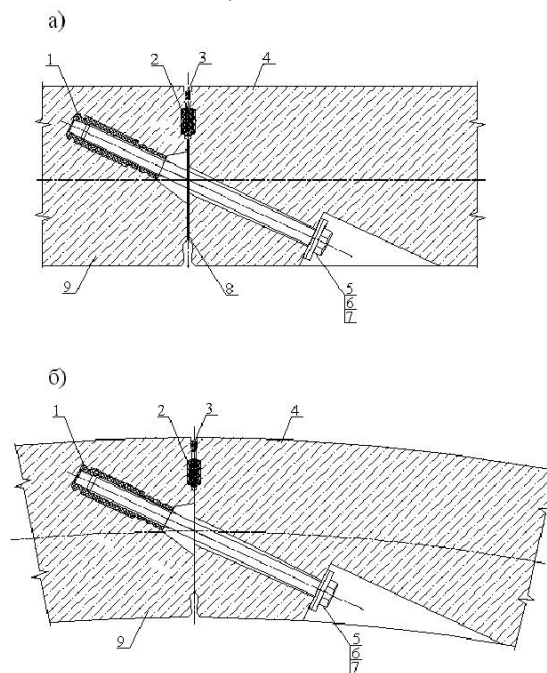


Рис. 4.8. Конструкція стиків оправи: а – стик зі зв'язками розтягу між кільцями оправи, б – стик зі зв'язками розтягу між блоками оправи у кільці.

На рис. 4.9. показані залізобетонні блоки на складі будівельного майданчику.



Рис. 4.9. Залізобетонні блоки на складі будівельного майданчику

Завдання для самоконтролю

1. У яких випадках застосовують залізобетонні оправи із блоків?
2. Які конструкції тунельних залізобетонних оправ із блоків застосовують при закритому способі робіт?
3. У яких умовах застосовуються залізобетонні оправи із блоків зі зв'язками розтягу у стиках?
4. Перелічите основні типорозміри елементів залізобетонні оправи із блоків.
5. У чому складається відмінність залізобетонні оправи із блоків зі зв'язками розтягу у стиках від залізобетонні оправи із блоків без зв'язків розтягу?

5 РОЗРАХУНОК ОПРАВ. ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ, ДІЮЧИХ НА ОПРАВИ У РІЗНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ

ВСТУП

Мета розрахунку тунельних конструкцій - виключити настання граничних станів, неприпустимих під час експлуатації підземної споруди. Розрізняють дві групи граничних станів: перша - по несучій здатності або по міцності й стійкості, друга - по деформаціях, по тріщиностійкості або по розкриттю тріщини.

Складність розрахунку тунельних оправ змушує використовувати різні припущення, які спрощують конструкцію оправи і оточуючий її ґрунтовий масив. Тому вибирають розрахункову схему, яка найбільш відповідає тим умовам, в яких працює тунельна оправи під час експлуатації – конструкційні особливості, матеріал оправи, інженерно-геологічні умови, а також спосіб спорудження оправи.

Від того, наскільки обґрунтовано прийняті допущення та розрахункова схема, залежить точність отриманих результатів. Прийняті допущення повинні забезпечувати запас міцності у період експлуатації.

В основу розрахункової схеми тунельної оправи, яка знаходиться у однорідному ґрунтовому масиві, прийнято рішення плоскої задачі. Оскільки довжина тунелю в багато разів перевищує його переріз, до розрахунку приймається один погонний метр оправи. За рахунок перев'язки швів жорсткість оправи приймається постійною.

Ще одну важливу умову треба враховувати, тобто це навантаження, які виникають у період будівництва тунелю в залежності від способу його спорудження і можуть перевищувати, або міняти співвідношення і відрізнятись від навантажень після його завершення, особливо при спорудженні станційних тунелів метрополітену.

Відповідно до ДБН В.2.3-7:2018 конструкції підземних споруд слід розраховувати за граничними станами I та II груп.

По першій групі граничних станів всі тунельні конструкції повинні бути розраховані в обов'язковому порядку на міцність і стійкість від впливу основних і особливих сполучень розрахункових навантажень

із застосуванням коефіцієнтів умов роботи конструкції й розрахункових опорів її матеріалів. Граничним станом тунельної конструкції по несучій здатності вважається такий, при якому в одному або декількох її поперечних перерізах нормальна сила й згинальний момент досягають граничних значень, які визначаються, виходячи з ідеальних пружно-пластичних властивостей матеріалу конструкції й ексцентриситетів нормальної сили, розрахованих для пружного стану. Навантаження, що викликає граничний стан конструкції, називається граничним. Його величина не може бути менше навантаження в будь-якому розрахунковому сполученні.

По другій групі граничних станів розрахунки повинні виконуватися на основні сполучення нормативних навантажень, застосовуючи нормативні характеристики матеріалів конструкцій. Допускається ці розрахунки не робити, якщо практикою застосування або досвідченою перевіркою встановлені достатня міцність або тріщиностійкість конструкції. Граничним станом тунельної конструкції по деформаціях є такий, при якому деформації конструкцій досягають гранично припустимих значень, наприклад, окремі елементи конструкції під навантаженням можуть порушити габарит наближення будов. Граничним станом по тріщиностійкості або по розкриттю тріщин є такий, при якому виникають тріщини в конструкції або ж тріщини розкриваються понад припустимі нормативні значення. Навантаження, що викликають такі стани, також називаються граничними, і нормативні навантаження основних сполучень не повинні їх перевищувати.

У розрахунках застосовують дві принципово різні схеми взаємодії тунельної оправи з навколишнім гірським масивом:

- гірський масив навколо виробки частково або повністю переходить у граничний стан, оправу навантажує ґрунт в склепінні обвалення або вивал, що утворюється над виробкою зруйнованими ґрунтами (режим детермінованого навантаження);

- гірський масив навантажує оправу силами пружної й реологічної деформації, яким оправи пручається (режим взаємодіючій деформації).

Як правило, розрахунки оправ ведуться в припущенні лінійної залежності між деформаціями й напруженнями, як матеріалу оправи, так і навколишнього ґрунту, однак допускається й врахування нелінійності цього зв'язку. Під час роботи оправи в режимі

детермінованого навантаження для визначення навантажень використовують наступні характеристики масиву: коефіцієнт міцності ґрунту, питома вага, кут внутрішнього тертя (табл. 1.1).

При розрахунках бетонних і залізобетонних оправ необхідно враховувати додатковий коефіцієнт умов роботи конструкції 0,9, що враховує для монолітних оправ неточності в призначенні розрахункової схеми, а для збірних оправ зниження їх несучої здатності під час експлуатації.

5.1 Визначення діючих навантажень на тунельну оправу

Статичний розрахунок оправи проводиться для можливих несприятливих сполучень основних та додаткових навантажень.

Основними навантаженнями є постійні навантаження, які діють в експлуатаційній стадії:

- а) власна вага оправи;
- б) вертикальний тиск порід;
- в) горизонтальний тиск порід – активний або пасивний (у вигляді пружного відпору);
- г) гідростатичний тиск підземних вод;
- д) рухоме навантаження від транспорту у автошляхових тунелях (при побудові проїзної частини по перекриттю).

Додатковими є тимчасові навантаження, які діють головним чином у будівельній стадії:

- а) поздовжній тиск щитових гідроциліндрів;
- б) вага механізмів для збирання оправи (блокоукладача);
- в) тиск розчину, що нагнітається за оправу.

Відповідно до цього статичний розрахунок збірної оправи проводиться для двох стадій її роботи: експлуатаційної і будівельної.

Визначення гірського тиску

У розріджених і слабких зволжених породах (мулкі породи, пливуні, глини і суглинки текучої і м'якопластичної консистенції) нормативна величина вертикального гірського тиску дорівнює повній вазі порід, що залягають над тунелями:

$$q_{\text{в}}^{\text{н}} = \sum \gamma_i h_i, \quad (5.1)$$

де γ_i і h_i – відповідно питома вага і потужність i -го шару порід, який залягає вище.

Горизонтальний тиск у цих породах є активним, і його нормативна середня розрахункова інтенсивність складає за результатами досліджень для глинястих порід не менш ніж

$$q_{\varepsilon}^H = (0,8 \dots 0,9) q_{\varepsilon}^H. \quad (5.2)$$

На рівні замка оправи горизонтальний тиск буде дорівнювати

$$q_{\varepsilon}^3 = (0,8 \dots 0,9) (q_{\varepsilon}^H - \gamma R_{\text{зн}}), \quad (5.3)$$

а на рівні лотка

$$q_{\varepsilon}^L = (0,8 \dots 0,9) (q_{\varepsilon}^H + \gamma R_{\text{зн}}), \quad (5.4)$$

де $R_{\text{зн}}$ – зовнішній радіус оправи; γ – питома вага породи.

Активний горизонтальний тиск у незв'язаних породах на рівні замка оправи потрібно визначати за формулою:

$$q_{\varepsilon}^3 = q_{\varepsilon}^H \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\bar{\varphi}}{2} \right), \quad (5.5)$$

а на рівні лотка оправи –

$$q_{\varepsilon}^L = (q_{\varepsilon}^H + 2\gamma R_{\text{зн}}) \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\bar{\varphi}}{2} \right), \quad (5.6)$$

де q_{ε}^H – вертикальний гірський тиск (нормативне значення);

$\bar{\varphi}$ – уявний кут внутрішнього тертя породи.

Для визначення питомої ваги і уявного кута внутрішнього тертя породи слід користуватися даними інженерно-геологічних вишукувань.

Для порід, які наведені в п. 1-3, інтенсивність реакції породи, яка врівноважує інтенсивність вертикального гірського тиску, власної ваги оправи і виштовхувальної сили (тільки у зволжених породах), знаходять як:

$$P = q_{\varepsilon}^P + \pi g - 0,5\pi R_{\text{зн}}, \quad (5.7)$$

де q_{ε}^P – розрахункове значення вертикального тиску; $g=9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння.

У сухих породах або водонепроникних шарах остання складова у формулі (5.7) відсутня.

У глинястих породах тугопластичної, напівтвердої і твердої консистенції, а також у сухих піщаних і скельних породах величину вертикального гірського тиску можна визначати за формулою проф. М. М. Протод'яконова

$$q_{\varepsilon}^H = \gamma h_1, \quad (5.8)$$

$$h_1 = \frac{L}{2f}, \quad (5.9)$$

$$L = D_{\text{зн}} + 2D_{\text{зн}} \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\bar{\varphi}}{2} \right), \quad (5.10)$$

f – коефіцієнт міцності породи; h_1 і L – висота і ширина склепіння обвалення за проф. М. М. Протод'яковим (рис. 5.1).

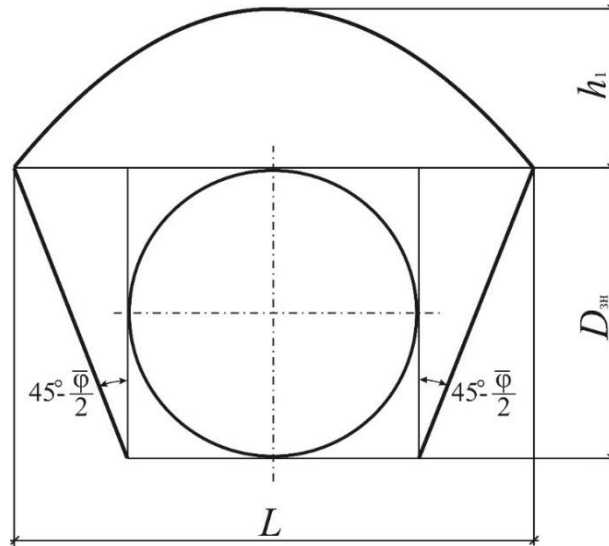


Рис. 5.1. Схема для визначення параметрів склепіння обвалення за проф. М. М. Протод'яковим

Відповідно до вимог ДБН [1] у розрахунку оправи за несучою здатністю величину розрахункових навантажень визначають шляхом множення нормативних навантажень на коефіцієнт перевантаження n :

$$q_e^p = nq_e^H, \quad (5.11)$$

$$q_c^p = nq_c^H. \quad (5.12)$$

Коефіцієнти перевантаження для різних видів навантаження можна визначити за табл. 5.3.

Горизонтальний тиск у породах, наведених у п. 4, потрібно розглядати як пасивний – у вигляді пружного відпору. Коефіцієнт пружного відпору k для різних порід можна визначити за табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Коефіцієнт пружного відпору	
Характеристика породи	k , т/м ³
Пливун. Пісок щойно насипаний. Глина мокра, м'яка.	Від $0,01 \cdot 10^4$ до $0,05 \cdot 10^4$
Пісок злежаний. Гравій насипаний. Глина волога.	Від $0,05 \cdot 10^4$ до $0,5 \cdot 10^4$

Пісок, гравій щільно злежані. Щебінь. Глина малої вологості.	Від $0,5 \cdot 10^4$ до $1,0 \cdot 10^4$
Грунт піщано-глинястий, штучно ущільнений. Глина тверда.	Від $1,0 \cdot 10^4$ до $2,0 \cdot 10^4$
М'яка тріщинувата скеля. Вапняк, пісковик. Мерзлість.	Від $2,0 \cdot 10^4$ до $10,0 \cdot 10^4$
Тверда, щільна скеля.	Від $10,0 \cdot 10^4$ до $150 \cdot 10^4$

Нормативна власна вага оправи визначається як:

$$p^n = \frac{G_k}{2\pi r}, \quad (5.13)$$

де G_k – маса кільця оправи (приймається за проектним об'ємом, який визначено при проектуванні варіантів); $r = \frac{R_{вн} + R_{зн}}{2}$ – середній радіус оправи.

Розрахункове значення власної ваги оправи визначається множенням p^n на коефіцієнт перевантаження n : $p^p = n p^n$.

Питому вагу зволжених порід γ' при підрахунку величини гірського тиску потрібно визначати з урахуванням дії води, тобто $\gamma' = \gamma - \gamma_e$ (γ_e – питома вага води, $\gamma_e = 10 \text{ кН/м}^3$), а гідростатичний тиск підземних вод необхідно розглядати як самостійне основне навантаження, що діє на водонепроникну оправу в експлуатаційній стадії.

При розрахунку оправи за несучою здатністю величину розрахункових навантажень визначають шляхом множення нормативних навантажень на коефіцієнт надійності n таб. 5.3. відповідно до вимог [4]:

$$P^p = n P^n. \quad (5.14)$$

Таблиця 5.3

Коефіцієнти надійності	
Вид навантаження	Коефіцієнт надійності
Вертикальний тиск порід:	
а) від ваги всього масиву;	1,1 (0,9)
б) менш ваги всього масиву.	1,5
Горизонтальний активний тиск порід	1,2 (0,8)
Гідростатичний тиск підземної води	1,1 (0,9)

Власна вага збірної оправи	1,1
----------------------------	-----

Примітка. Значення коефіцієнта перевантаження, який більше одиниці, застосовують у випадках, коли дане навантаження збільшує сумарний розрахунковий вплив (моменти і нормальні сили); в протилежних випадках застосовують значення, менші одиниці.

У разі застосування водопроникних оправ із бетонних чи залізобетонних блоків передбачається, що гідростатичний тиск ґрунтових вод повністю сприймається внутрішньою залізобетонною суцільною оболонкою, яка підтримує обклеювальну гідроізоляцію. У зволжених породах, де використовується водонепроникна оправа, враховується також тиск води, який визначається як $q_e = 0,9\gamma_e H_e$ (H_e – розрахункова висота горизонту води над склепінням тунелю, м).

Завдання для самоконтролю

1. У яких випадках розраховують вертикальний гірський тиск від склепіння обвалення?
2. У яких випадках розраховують вертикальний гірський тиск від усієї товщі ґрунту над виробкою?
3. У яких випадках застосовують коефіцієнт надійності 1,5?
4. У яких випадках застосовують коефіцієнт надійності 1,2?
5. У яких випадках застосовують коефіцієнт надійності менше 1?

6 СТАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ОПРАВ ТУНЕЛІВ

6.1 Статичний розрахунок оправ у слабких породах, як кільця, що вільно деформується

В залежності від інженерно-геологічних умов та конструкції оправи приймається спосіб її розрахунку, який найбільше відповідає тим умовам, в яких працює тунельна оправи під час експлуатації.

Для оправ зі зв'язками розтягу у стиках, які розташовані в слабких ґрунтах, які практично не перешкоджають розвитку деформації кільця, і на які діє бічний тиск в активному вигляді, приймається спосіб розрахунку, в якому оправа розглядається як пружне кільце, що вільно деформується.

Насправді при деформації оправи виникає пасивний опір ґрунту, що обмежує горизонтальні деформації оправи і призводить до зменшення згинальних моментів в її перерізах, що йде в запас міцності.

При розрахунку оправи в експлуатаційній стадії для випадку дії вертикального та активного горизонтального тиску породи оправа кругового перерізу розглядається як кільце, що вільно деформується під дією зовнішніх навантажень [9].

Для цього методу розрахунку характерні такі припущення:

1. Оправа розглядається як система, що лінійно деформується.
2. При дії зовнішніх навантажень на оправу дотримуються принципу незалежності дії сил.

3. Жорсткість оправи постійна ($EI = \text{const}$). Оправи з перев'язкою швів або зі зв'язками розтягу у стиках.

На рис. 6.1. показана схема діючих навантажень на тунельну оправу, яка розраховується як пружне кільце що вільно деформується. Діючі зовнішні навантаження: q – вертикальний гірський тиск, p_1 , p_2 – боковий гірський тиск, q_w – гідростатичний тиск врівноважуються вертикальною складовою реакції ґрунту K , рівномірно розподіленою по горизонтальній проєкції кільця оправи.



Diagram illustrating the forces acting on a semi-circular arch structure. The arch is supported by a fixed support at the bottom right. The forces and reactions are labeled as follows:

- Вертикальный гирьский тиск** (Vertical weight load): A series of downward arrows acting on the top of the arch.
- Горизонтальный гирьский тиск** (Horizontal weight load): A series of rightward arrows acting on the left side of the arch.
- Реакция пороги** (Reaction at the support): A series of upward arrows acting at the fixed support.
- Reactions at the support:**
 - X_1 : A horizontal reaction force pointing to the left.
 - X_2 : A vertical reaction force pointing upwards.

Рис. 6.2. Основна система методу сил для кільця, що вільно деформується

Канонічними рівняннями деформації такої системи є:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1p} = 0, \quad (6.1)$$

$$\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} = 0. \quad (6.1)$$

Для спрощення цієї системи невідомі X_1 та X_2 (X_3 при симетричному навантаженні дорівнює нулю) переносять на абсолютно жорстку консоль, тому $\delta_{12} = \delta_{21} = 0$.

Система канонічних рівнянь набуває вигляд:

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0, \quad (6.2)$$

$$\delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} = 0. \quad (6.2)$$

Згинальний момент та нормальна сила в кожному перерізі, який розташовано під кутом α , будуть дорівнювати відповідно:

$$M = M_p - X_2 r \cos \alpha = 0, \quad (6.3)$$

$$N = N_p + X_2 \cos \alpha = 0. \quad (6.4)$$

Визначити зусилля в перерізах оправи (на 1 м тунелю) від основних навантажень можна, користуючись розрахунковими формулами (табл. 6.1, 6.2).

Таблиця 6.1

Визначення зусиль в оправі від зовнішніх навантажень

Кут нахилу перерізу α	Зусилля	Зовнішні навантаження		
		Власна вага оправи p^p	Вертикальний гірський тиск q_θ^p	Тиск води q_θ
0	M N	+0,5000 $p^p R_{3H}^2$ -0,5000 $p^p R_{3H}$	+0,2990 $q_\theta^p R_{3H}^2$ -0,1060 $q_\theta^p R_{3H}$	-0,2500 R_{3H}^3 +0,7500 $R_{3H}^2 + q_\theta R_{3H}$
45	M N	+0,1414 $p^p R_{3H}^2$ +0,2514 $p^p R_{3H}$	+0,0180 $q_\theta^p R_{3H}^2$ +0,4250 $q_\theta^p R_{3H}$	-0,0457 R_{3H}^3 +0,5457 $R_{3H}^2 + q_\theta R_{3H}$
90	M N	-0,5700 $p^p R_{3H}^2$ +1,5700 $p^p R_{3H}$	-0,3070 $q_\theta^p R_{3H}^2$ +1,000 $q_\theta^p R_{3H}$	+0,2850 R_{3H}^3 +0,2150 $R_{3H}^2 + q_\theta R_{3H}$
135	M N	-0,3117 $p^p R_{3H}^2$ +2,0188 $p^p R_{3H}$	-0,0891 $q_\theta^p R_{3H}^2$ +0,7821 $q_\theta^p R_{3H}$	+0,1558 R_{3H}^3 +0,3442 $R_{3H}^2 + q_\theta R_{3H}$
180	M N	+1,5000 $p^p R_{3H}^2$ +0,5000 $p^p R_{3H}$	+0,5870 $q_\theta^p R_{3H}^2$ +0,1060 $q_\theta^p R_{3H}$	-0,7500 R_{3H}^3 +1,2500 $R_{3H}^2 + q_\theta R_{3H}$

Таблиця 6.2

Визначення зусиль в оправі від зовнішніх навантажень

Кут нахилу перерізу α	Зусилля	Зовнішні навантаження		
		Горизонтальний гірський тиск на рівні замка p_{Γ}^3	Горизонтальний гірський тиск на рівні лотка $p_{\Gamma}^{\text{л}}$	Інтенсивність реакції породи K
0	M	$-0,2500q_z^3R_{3H}^2$	$-0,1050q_z^{\text{л}}R_{3H}^2$	$-0,0490PR_{3H}^2$
	N	$+1,0000q_z^3R_{3H}$	$+0,3130q_z^{\text{л}}R_{3H}$	$+0,1060PR_{3H}$
45	M	0	$-0,0031q_z^{\text{л}}R_{3H}^2$	$-0,0180PR_{3H}^2$
	N	$+0,5000q_z^3R_{3H}$	$+0,2062q_z^{\text{л}}R_{3H}$	$+0,0750PR_{3H}$
90	M	$+0,2500 q_z^3R_{3H}^2$	$+0,1250q_z^{\text{л}}R_{3H}^2$	$+0,0570PR_{3H}^2$
	N	0	0	0
135	M	0	$+0,0861q_z^{\text{л}}R_{3H}^2$	$+0,0891PR_{3H}^2$
	N	$+0,5000q_z^3R_{3H}$	$+0,2938q_z^{\text{л}}R_{3H}$	$-0,2821PR_{3H}$
180	M	$-0,2500q_z^3R_{3H}^2$	$+0,0210q_z^{\text{л}}R_{3H}^2$	$-0,3370PR_{3H}^2$
	N	$+1,0000q_z^3R_{3H}$	$+0,6870q_z^{\text{л}}R_{3H}$	$-0,1060PR_{3H}$

По результатам розрахунку будується епюра нормальних сил та епюра моментів і проводиться перевірка на міцність у самих небезпечних перерізах.

6.2 Статичний розрахунок оправи у міцних породах, які мають пружний відпір

Для оправ, які розташовані у міцних ґрунтах і на які боковий тиск діє у вигляді пружного відпору, приймається спосіб розрахунку, в якому оправа розглядається як пружне кільце у пружному середовищі.

Для цього методу розрахунку характерні такі припущення як і при розрахунку оправи, як кільця, що вільно деформується під дією зовнішніх навантажень.

Оправу тунелів, які споруджують у стійких та міцних породах, слід визначати з урахуванням пружного відпору порід. У цьому випадку може бути рекомендований метод О. Ю. Бугаєвої як найбільш простий, але за точністю результатів такий, що не поступається іншим методам розрахунку.

На рис. 6.3 показана схема діючих навантажень на тунельну оправу, яка розраховується як кільце у пружному середовищі.

Вертикальний гірський тиск (q), для способу розрахунку, що розглядається, знаходиться від ваги породи в межах склепіння обвалення.

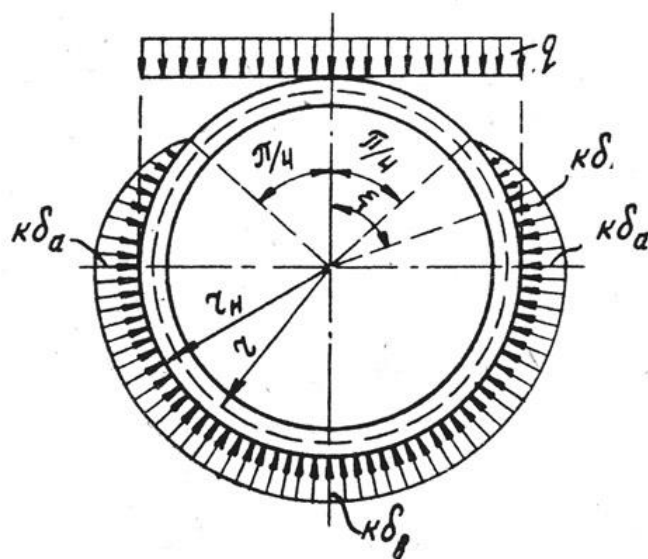


Рис. 6.3. Схема навантажень на оправу, що має пружний відпір породи.

Суть метода О. Ю. Бугаєвої полягає в тому, що епюра пружного відпору передбачається відомою. Передбачувана епюра описується такими тригонометричними кривими, які виходять із нульових точок (рис. 6.3):

$$k\delta = -k\delta_A \cos 2\psi \text{ при } \frac{\pi}{4} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2}; \quad (6.5)$$

$$k\delta = k\delta_A \sin^2 \psi + k\delta_B \cos^2 \psi \text{ при } \frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \pi, \quad (6.6)$$

де k – коефіцієнт пружного відпору породи; δ – радіальне переміщення оправи в перерізі, нахиленому під кутом до вертикалі; δ_A , δ_B – невідомі переміщення перерізів A і B оправи відповідно (визначаються у процесі розрахунку).

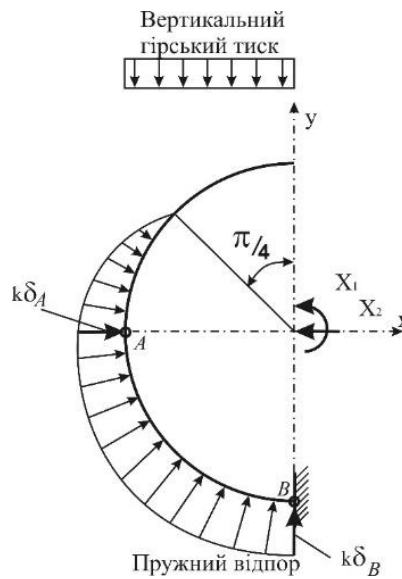


Рис. 6.4. Розрахункова схема для методу О. Ю. Бугаєвої

Канонічними рівняннями деформації такої системи при чотирьох невідомих є такі:

$$\begin{aligned} \delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} &= 0, \\ \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} &= 0, \\ \Sigma Y &= 0, \\ \delta_a &= \delta_{a1}X_1 + \delta_{a2}X_2 + \Delta_{ap}. \end{aligned}$$

δ_{11} , δ_{22} – переміщення, δ_A , δ_B – невідомі переміщення перерізів A і B оправи відповідно, що знаходяться за допомогою інтегралів Мора.

Кількість рівнянь у методі сил дорівнює кількості невідомих, в даному розрахунку крім x_1 , x_2 невідомими є δ_A і δ_B .

Для оправи постійної жорсткості зусилля в перерізах (згинальний момент M і нормальна сила N) на одиницю ширини оправи можуть бути визначені за такими формулами.

1. Зусилля в перерізах від гірського тиску:

$$M_q = q_{\theta}^p R_{\text{зн}} r [Am + B + Cn(1 + m)], \quad (6.7)$$

$$N_q = q_{\theta}^p R_{\text{зн}} r [Dm + F + Gn(1 + m)], \quad (6.8)$$

де r – осьовий радіус оправи; A, B, C, D, F, G, m, n – коефіцієнти (формули (6.9) і (6.10) й табл. 6.3).

$$m = 2 - \frac{R_{\text{зн}}}{r}, \quad (6.9)$$

$$n = \frac{1}{0,06416 + \frac{EI}{r^3 R_{\text{зн}} kb}}, \quad (6.10)$$

де EI – жорсткість оправи.

Таблиця 6.3

Значення коефіцієнтів A, B, C, D, F, G

Кут нахилу перерізу	A	B	C	D	F	G
0	0,1628	0,0872	-0,00700	0,2122	-0,2122	0,0210
45	-0,0250	0,0250	-0,00084	0,1500	0,3500	0,01485
90	-0,1250	-0,1250	0,00825	0	1,0000	0,00575
135	0,0250	-0,0250	0,00022	-0,1500	0,9000	0,01380
180	0,0872	0,1628	-0,00837	-0,2122	0,7122	0,02240

2. Зусилля в перерізах від власної ваги оправи:

$$M_p = p^p r^2 (A_1 + B_1 n), \quad (6.11)$$

$$N_p = p^p r (C_1 + D_1 n), \quad (6.12)$$

де p^{δ} – власна вага оправи; A_1, B_1, C_1 і D_1 – коефіцієнти (табл. 6.4).

Таблиця 6.4

Значення коефіцієнтів A_1, B_1, C_1 і D_1

Кут нахилу перерізу	A_1	B_1	C_1	D_1
0	0,3447	-0,02198	-0,1667	0,06592
45	0,0334	-0,00267	0,3375	0,04661
90	-0,3928	0,02589	1,5708	0,01804
135	-0,0335	0,00067	1,9186	0,04220
180	0,4405	-0,02620	1,7375	0,07010

3. Зусилля в перерізах від гідростатичного тиску ґрунтових вод

$$M_{\text{в}} = -\gamma_{\text{в}} R_{\text{зв}}^2 r (A_2 + B_2 n); \quad (6.13)$$

$$N_{\text{в}} = \gamma_{\text{в}} R_{\text{зв}}^2 (C_2 + D_2 n) + \gamma_{\text{в}} q_{\text{в}} R_{\text{зв}}, \quad (6.14)$$

де $\gamma_{\text{в}}$ – питома вага води; A_2, B_2, C_2 і D_2 – коефіцієнти (табл. 6.5).

Таблиця 6.5

Значення коефіцієнтів A_2, B_2, C_2 і D_2

Кут нахилу перерізу	A_2	B_2	C_2	D_2
0	0,17240	-0,01097	0,58385	0,03294
45	0,01673	-0,00132	0,42771	0,02329
90	-0,19638	0,01294	0,21460	0,00903
135	-0,01679	0,00036	0,39413	0,02161
180	0,22027	-0,01312	0,63125	0,03509

Повні зусилля знаходяться як сума зусиль, визначених за наведеними вище формулами:

$$M = M_q + M_p + M_{\epsilon}, \quad (6.15)$$

$$N = N_q + N_p + N_{\epsilon}. \quad (6.16)$$

Після знаходження зусиль в оправі проводиться перевірка на міцність у найнебезпечних перерізах оправы.

Завдання для самоконтролю

1. У яких випадках приймається спосіб розрахунку, в якому оправа розглядається як кільце, що вільно деформується?
2. У яких випадках приймається спосіб розрахунку, в якому оправа розглядається як кільце у пружному середовищі?
3. Які припущення приймаються при методі розрахунку, в якому оправа розглядається як кільце, що вільно деформується?
4. Які припущення приймаються при методі розрахунку, в якому оправа розглядається як кільце у пружному середовищі?
5. Що є результатами розрахунку оправы методом сил?

7 РОЗРАХУНОК ТУНЕЛЬНИХ ОПРАВ З УРАХУВАННЯМ ЇХНЬОЇ ВЗАЄМОДІЇ З ОТОЧУЮЧИМ МАСИВОМ ҐРУНТУ

ВСТУП

Як було зазначено вище, розрахунки тунельних оправ методом сил мають багато припущень, які спрощують розрахунки, і, як вважається, зменшують їх точність, але вони можуть бути застосовані на передпроектному етапі для визначення попередньої вартості проекту будівництва.

В даний час відповідно діючих ДБН [4] розрахунок оправ повинен проводитись на сумісну роботу оправи з оточуючим масивом ґрунту.

При розрахунку тунельних оправ з урахуванням їхньої взаємодії з оточуючим масивом ґрунту використовують сучасні розрахункові комплекси, які ґрунтуються на методі скінченних елементів.

Останнім часом дослідження напружено-деформованого стану (НДС) підземних конструкцій усе менше спирається на методи, розроблені в рамках аналітичного підходу, що об'єктивно пов'язано з ускладненням конструктивних рішень у підземних спорудах, застосуванням нових технологій їх спорудження, а також розвитком нових підходів до самого процесу дослідження. Найбільшого поширення в механіці підземних споруд дістали чисельні методи [1; 3; 5]. Чисельні методи, такі як метод скінченних різниць (МСР), метод граничних елементів (МГЕ) і метод скінченних елементів (МСЕ), останнім часом набули значної теоретичної розробки і практичної реалізації, тому ряд задач, які розв'язуються з їх допомогою, значно розширився.

Найважливіша роль у аналізі НДС системи «кріплення–масив» належить дослідженню механізму роботи, існування та взаємодії двох частин цієї системи [8]. Причому з'ясування механізму роботи є фундаментальним знанням, яке дозволяє проводити такі види досліджень, як чисельний аналіз, імітаційне моделювання, побудова моделі за допомогою реальних властивостей тощо.

Існуючі на даний час методики розрахунку конструктивних елементів підземних споруд базуються на побудові плоских і дуже

рідко об'ємних розрахункових схем конструкції та інтерпретації оточуючого масиву з деякими припущеннями, які спрощують його реальну поведінку. Даний підхід не дозволяє правильно визначити НДС таких складних конструкцій, оскільки відкидається такий важливий фактор, як просторовість роботи та перекручується реальна взаємодія між оправою та оточуючим масивом. У результаті конструкції підземних споруд вважаються нераціональними та неекономічними.

В Україні у будівельній практиці частіше використовуються програмні комплекси Plaxis, SCAD, Lira і молоде покоління інженерів легко навчається використанню скінчено-елементного програмного забезпечення і добре справляється з чисельним моделюванням. Однак це іноді відбувається без повного розуміння основ та обмежень комплексних геомеханічних моделей та чисельних методів, що застосовуються у таких програмах.

У результаті керівники проєктів або провідні інженери стикаються з тим, що результати, що одержуються при використанні розроблених чисельних моделей, не відповідають очікуванню на підставі їх досвіду.

Тому, дуже важливо проводити перевірки достовірності скінчено-елементних розрахунків, використовуючи верифікацію. **Верифікація** [14] - це процес визначення того, що комп'ютерна модель точно представляє математичну модель, що лежить в її основі, і здатна відтворити її теоретичне рішення, тобто що програма видає дані, що не суперечать тим, які очікувалися.

7.1 Загальні відомості про метод скінченних елементів

Метод скінченних елементів – числовий варіаційний метод, що дозволяє вирішувати широкий клас різних задач, пов'язаних з розв'язанням диференціальних рівнянь. Найбільшого застосування МСЕ набув у задачах механіки твердого деформованого тіла, механіки суцільного середовища, механіки підземних споруд, теплопровідності, гідродинаміки та інших.

Ідея МСЕ як варіаційного методу полягає в тім, що функція, яка відшукується (переміщення, напруження, температура тощо), апроксимується сумою добутків деяких функцій (**координатні функції**) на множники, які варіюються. Як множники, які варіюються, приймають значення координатних функцій та їхніх похідних у **вузлах** скінчено-елементної сітки. Для визначення цих множників

використовують принцип мінімізації похибки розв'язку задачі. Координатні функції, у свою чергу, вибирають таким чином, що кожна з них не дорівнює нулю тільки в невеликій області досліджуваного тіла, яка зветься **скінченним елементом (СЕ)**. Внаслідок цього в будь-якій точці досліджуваного тіла розв'язок визначається тільки декількома функціями з усієї множини координатних функцій, які використовують (**функціями форми СЕ**).

Відповідно до цього для розв'язання задачі за допомогою МСЕ необхідно розділити досліджуване тіло на деяку кількість СЕ. У межах кожного елемента розподіл величин описується певними математичними залежностями, на основі яких формується деякий функціонал. Мінімум функціонала відповідає нульовим значенням похідних по всіх множниках. У подальшому алгоритмі в розв'язку відносні вузлові значення функцій, що відшукуються, зводяться до системи лінійних рівнянь. Лівою частиною такої системи є добуток так званої матриці жорсткості на вектор шуканих вузлових переміщень, правою частиною – вектор вузлових сил. Розв'язуючи систему рівнянь, отримують вузлові значення (наприклад, переміщення вузлів), після чого можна знайти всі інші величини.

Таким чином, алгоритм дослідження підземної споруди із застосуванням МСЕ складається з таких етапів: дискретизація досліджуваної системи на СЕ й призначення вузлових точок, у яких визначаються вузлові переміщення; побудова матриць жорсткості; формування системи канонічних рівнянь, що відображають умови рівноваги у вузлах розрахункової системи; розв'язання системи рівнянь і обчислення значень вузлових переміщень; визначення компонентів напружено-деформованого стану досліджуваної системи за знайденими значеннями вузлових переміщень.

Для успішного розв'язання задачі розрахунку напружено-деформованого стану тунельної оправи велике значення має тип розрахункової схеми, що приймається, і порядок ідеалізації реальної конструкції оправи. Розрахункова схема може розглядатися як сукупність граничних умов, зовнішніх і внутрішніх дій, властивостей матеріалів і називається скінченно-елементною моделлю (СЕ-моделлю). Її елементами в загальному вигляді є будь-які об'єкти, які можуть брати участь у розрахунку або просто повинні бути зображені на схемі як допоміжні умовні позначення. Елементи СЕ-моделі мають бути здатні відтворювати графічно результати розв'язання.

Відповідно до строгих рішень теорії пружності повне розсіювання напружень у пружному середовищі відбувається в нескінченному видаленні від місця прикладення навантаження. У реальних середовищах практично повне розсіювання напружень, а отже, і загасання переміщень, настає значно швидше. Тому розрахунок напружень і переміщень зводиться до визначення цих величин у деякій обмеженій області. Межі області встановлюються так, щоб за ними збурення природного поля напружень додатковим навантаженням було відносно невеликим, тобто не призвело до помітних деформацій.

Цією умовою слід користуватися для обмеження області, у якій визначається напружено-деформований стан земляного полотна. Надмірне збільшення області дослідження призводить до збільшення кількості елементів, що ускладнює розрахунок, або до збільшення розмірів цих елементів, що знижує точність розв'язання. Зменшення області дослідження може стати причиною того, що вплив граничних умов внесе спотворення в напружено-деформований стан її периферійних ділянок. При призначенні сітки дискретизації (розбивки), як правило, слід дотримуватися таких основних принципів.

У безпосередній близькості від прикладених навантажень на ділянках, де визначення напружень повинне бути виконане з великою точністю, особливо в місцях, де очікуються найбільші градієнти напружень, слід призначати трикутні елементи як найменших розмірів. Це дозволяє точніше встановити поле напружень на таких ділянках і понизити похибку через його розриви. Відповідно, на ділянках, де очікується плавна зміна напружень, розміри елементів можна збільшувати. Оскільки поле переміщень у розв'язках методом скінченних елементів безперервне, для задач, що вимагають визначення лише переміщень, можна використовувати грубішу сітку розбиття.

Якщо наперед складно визначити ділянку області, де слід деталізувати дослідження напружено-деформованого стану, можливе поетапне розв'язання задачі. На першому етапі задача розв'язується при відносно грубій сітці розбиття й для цієї сітки будується поле переміщень. Потім виділяється необхідна ділянка області, для чого будується детальна сітка розбиття, приймаються граничні умови в переміщеннях на основі попереднього розв'язку й задача зводиться до розрахунку напружень і деформацій.

Доцільно призначати таку сітку розбиття, щоб можна було скласти достатньо просту залежність, що зв'язує координати вузлових точок з номерами вершин. Усі види навантажень у методі скінченних елементів приводяться до зосереджених сил, прикладених у вузлових точках. Розподілене навантаження, що діє на якій-небудь поверхні, замінюється рівнодіючими зосередженими силами, які прикладаються до відповідних вузлів. Об'ємні сили, наприклад власна вага, також приводяться до зосереджених сил, що діють у вузлових точках.

7.2 Програмний комплекс PLAXIS

Програмний комплекс PLAXIS, призначений для виконання складних інженерних розрахунків напружено-деформованого стану системи "споруда - ґрунт" в процесі будівництва, експлуатації та реконструкції з урахуванням зміни властивостей ґрунтів і матеріалів конструкційних елементів. [6].

У PLAXIS 2D та 3D є підпрограма Tunnel designer (Конструктор тунелів) для швидкого моделювання тунелю з урахуванням тиску цементного розчину, зусиль у гідроциліндрах, тиску у забої тунелю та/або втрати об'єму. Для скельних порід зазвичай використовують дві моделі: модель Мора-Кулона і модель Хоека-Брауна. Ці моделі дозволяють оцінити напружений та граничний стан ізотропних гірських порід. Для моделювання поведінки шаруватих гірських порід доступні дві спеціальні моделі скельного ґрунту (ізотропна та анізотропна) з можливістю встановити три поверхні ослаблення з критерієм руйнування Мора-Кулона.

Проходка тунелю з пристроєм кріплення та розміщенням опорних конструкцій є тривимірним завданням, для вирішення якого необхідно використовувати PLAXIS 3D. У PLAXIS доступна модель, що враховує міцність і жорсткість тимчасового кріплення з торкретбетону, що залежить від часу, а також усадку і деформації повзучості. Ця модель, спочатку розроблена для моделювання торкретбетону, може бути корисна для моделювання ґрунтоцементних колон.

У програмному комплексі PLAXIS є можливість моделювати поведінку ґрунтового та гірського масиву внаслідок поверхневих та глибинних способів проходки тунелів.

На рис. 7.4. показано який вигляд мають результати розрахунку напружено-деформованого стану оправи кругового обрис у

програмі PLAXIS, деформація – переміщення ґрунтового масиву наведені у вигляді ізополів переміщень по горизонтальній вісі X.

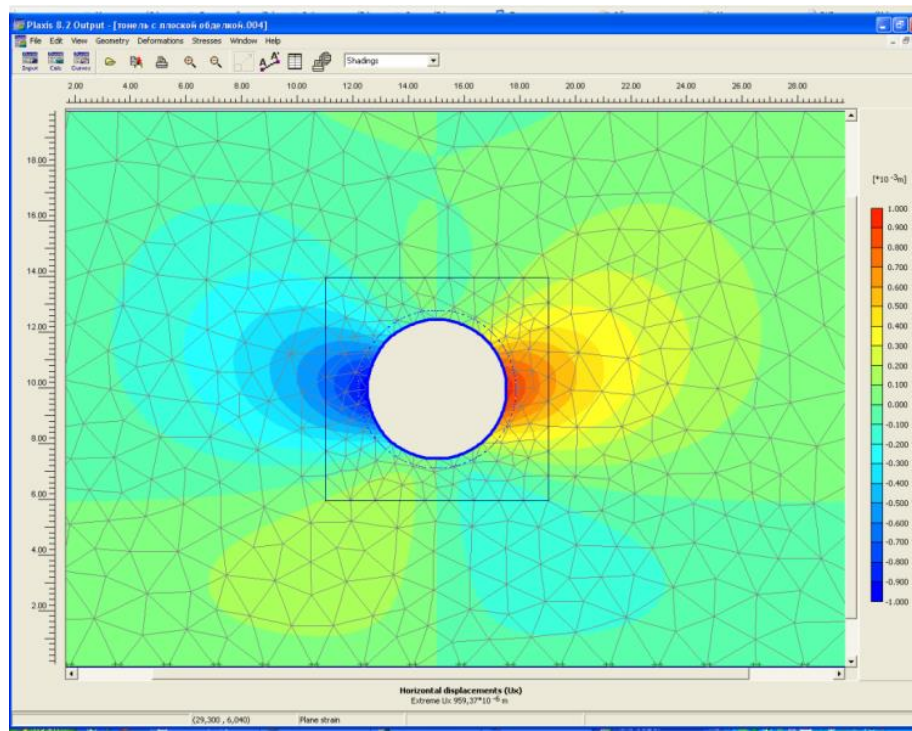


Рис. 7.4. Ізополі переміщень по вісі x у ґрунтовому масиві навколо виробки.

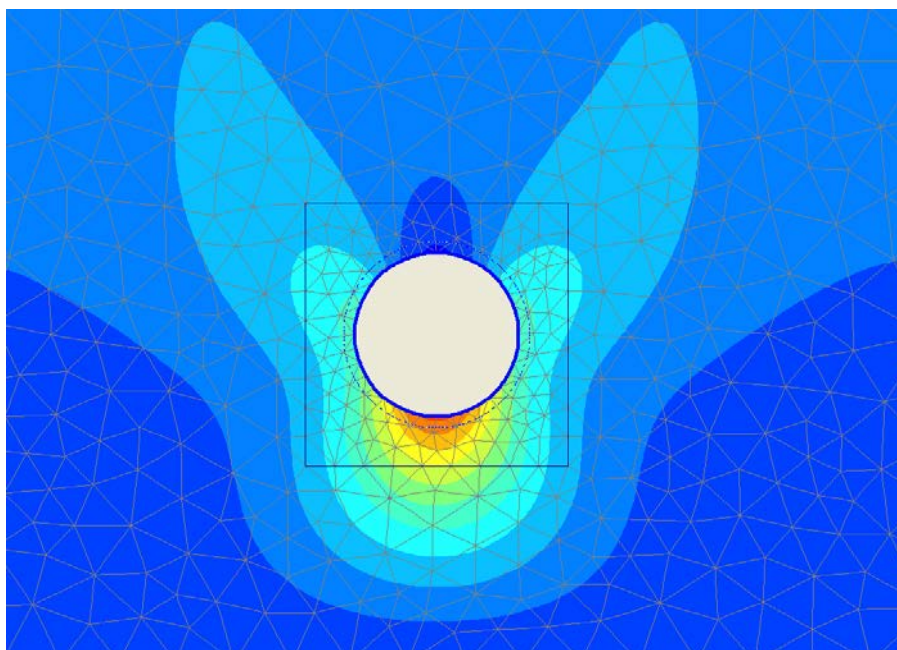


Рис. 7.5. Ізополі напружень у ґрунтовому масиві навколо виробки

7.3 Програмний комплекс SCAD

При використанні МСЕ велике значення має точне визначення міцнісних і деформаційних характеристик ґрунтів масиву, оскільки від них залежить його напружено-деформований стан, і чим точніше будуть визначені ці характеристики, тим ближче до реальних значень виявляться одержані в результаті розрахунків величини напружень і деформацій у тунельній оправі.

Важливим етапом у розрахунках напружено-деформованого стану методом скінченних елементів є обробка і представлення результатів. Якщо кінцевою метою розв'язання задачі є визначення поля переміщень, то представлення результату стає простим. Відповідно до того, що переміщення будь-якої точки області є лінійною функцією координат, за відомих значень переміщень вузлових точок легко визначаються переміщення всіх інших.

Практика показує, що точність розв'язку в цьому випадку достатньо висока навіть при грубій схемі дискретизації. Найбільші похибки можуть спостерігатися поблизу області з різко відмінними показниками. Значно складнішим є представлення результатів у вигляді полів напружень і деформацій. Ці поля мають розриви на межах між елементами. Значення напружень і деформацій залишаються постійними в межах кожного елемента, тобто можуть бути віднесені до будь-якої його точки. При недостатньо детальній сітці розбиття це може призвести до грубого наближення. У будь-якому випадку при кінцевих, навіть і малих, розмірах елементів доводиться відносити набуті в розрахунку значення напружень і деформацій до деяких точок у межах елемента.

Проектно-обчислювальний комплекс (ПОК) SCAD [...] призначений для чисельного дослідження напружено-деформованого стану конструкцій. ПОК SCAD забезпечує дослідження широкого класу конструкцій, причому розрахунки виконуються на статичні й динамічні навантаження. Тунельні конструкції, які розраховуються, можуть мати довільні обриси, локальні ослаблення у вигляді отворів і порожнин різної форми, різні умови обпирання, що важливо для виконання розрахунку тунельних оправ.

У ПОК SCAD розроблена розвинена бібліотека СЕ, яка вміщує стрижні, чотирикутні й трикутні елементи плити, оболонки, чотирикутні й трикутні елементи плити на пружній основі; просторові елементи у вигляді тетраедра, паралелепіпеда, гексаедра загального

виду; одновимірний і двовимірні (трикутні й чотирикутні) елементи для розв'язання осі симетричної задачі теорії пружності; спеціальні елементи, що моделюють зв'язок кінцевої жорсткості, пружну піддатливість між вузлами.

В основу комплексу покладено систему функціональних модулів, пов'язаних між собою єдиним інформаційним середовищем. Це середовище називається **проектом** і містить повну інформацію про розрахункову схему, її граничні умови, характеристики жорсткості, навантаження та їх комбінації, причому інформація наводиться у внутрішніх форматах комплексу й зберігається на диску у файлі (з розширенням **SPR**). Імена проекту й файлу задаються під час створення нової схеми.

Під час створення проекту виконується алгоритм, який пов'язаний із роботою з **функціональними модулями SCAD**. Функціональні модулі SCAD діляться на чотири групи. Перша група (**графічний препроцесор і графічний постпроцесор**) – модулі, які забезпечують введення початкових даних в інтерактивному графічному режимі й графічний аналіз результатів розрахунку. Друга група – модулі для виконання статичного й динамічного розрахунків (**процесор**), а також обчислення розрахункових поєднань зусиль, комбінацій завантажень, головних і еквівалентних напружень, реакцій, навантажень на фрагмент схеми, аналіз стійкості (**розрахункові постпроцесори**).

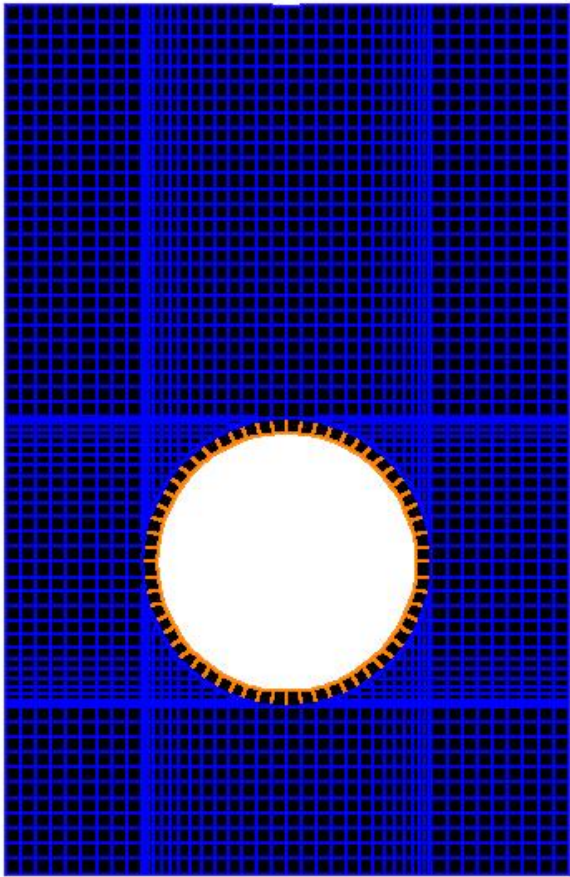
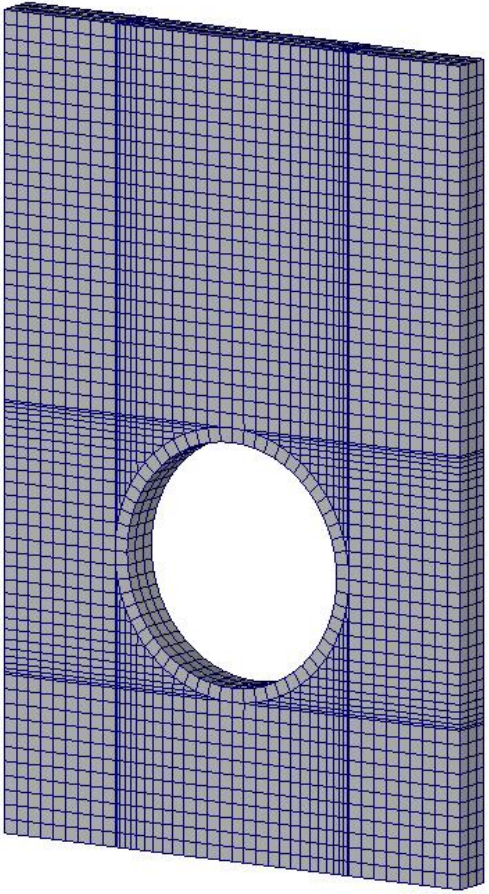
Документування результатів розрахунку виконується модулями третьої групи. Четверта група – модулі проектування (**постпроцесори моделювання**), які служать для підбору арматури в елементах залізобетонних конструкцій, а також перевірки опору й підбору перерізів елементів сталевих конструкцій.

Модульна структура дає можливість сформувати для кожного користувача таку конфігурацію SCAD, яка максимально відповідає його потребам за класом вирішуваних задач, засобами створення розрахункових схем, аналізом і документуванням результатів розрахунку.

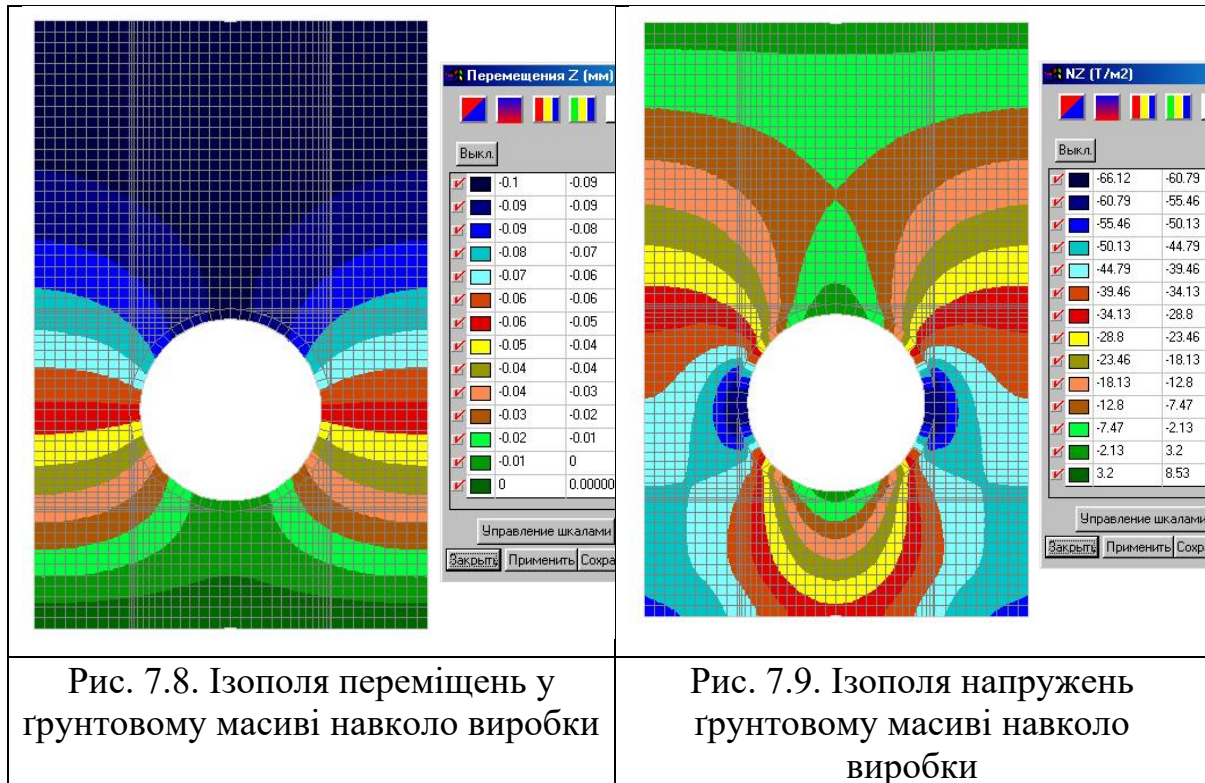
Усі функціональні модулі комплексу реалізовані в єдиному графічному середовищі. Інтерфейс, сценарії взаємодії користувача із системою, функції контролю початкових даних і аналізу результатів повністю уніфіковані, що забезпечує мінімальний час освоєння комплексу й логічну послідовність виконання операцій.

Високопродуктивний процесор дозволяє розв'язувати задачі статички й динаміки з великою кількістю степенів вільності. Розрахунок супроводжується докладним протоколом, який може бути проаналізований як у ході виконання розрахунку, так і після його завершення. Система контролю початкових даних виконує перевірку розрахункової схеми й фіксує всі знайдені помилки та попередження. Для успішного розв'язання задач пошуку напружено-деформованого стану конструкцій тунельної оправи і оточуючого ґрунтового масиву достатньо користуватися трьома групами модулів.

На рис. 7.6., 7.7. наведені приклади розробки моделі тунельної оправи з оточуючим масивом ґрунту.

	
Рис. 7.6. Розбивка сітки скінчених елементів ґрунтового масиву і тунельної оправи	Рис. 7.7. Розбивка сітки скінчених елементів ґрунтового масиву і тунельної оправи

На рис. 7.8., 7.9. наведені результати розрахунку напружено-деформованого стану ґрунтового масиву і тунельної оправи.



Отримані при результати дають можливість аналізувати напружено-деформований стан ґрунтового масиву і тунельної оправи.

7.4 Програмний комплекс LIRA

Програма ПК "ЛІРА-САПР" має спеціальні можливості: супер елементне моделювання, модулі урахування фізичної та геометричної нелінійності, набір спеціальних СЕ для моделювання тертя, проковзування, попереднього натягу. Спеціальна процедура дозволяє виконати автоматичну тріангуляцію тривимірного ґрунтового масиву, накласти отриману скінчено-елементну сітку на тривимірну модель ґрунту та призначити фізико-механічні характеристики кожному скінченному елементу залежно від його місцезнаходження. Аналіз напружено-деформованого стану подається у вигляді ізополів на довільних площинах перерізу ґрунтового масиву. Виконання автоматичної тріангуляції тривимірного масиву з призначенням фізико-механічних характеристик кожному скінченному елементу.

Моделювання оточуючого виробку ґрунтового масиву ведеться за допомогою прямокутних, універсальних чотирикутних та трикутних скінченних елементів, які враховують особливі властивості ґрунтового масиву. Робота тимчасового кріплення моделюється за допомогою стержневих скінченних елементів.

Загальний вигляд скінчено-елементної моделі частини ґрунтового масиву і оправи тунелю кругового обрису показано на рис. 7.10.

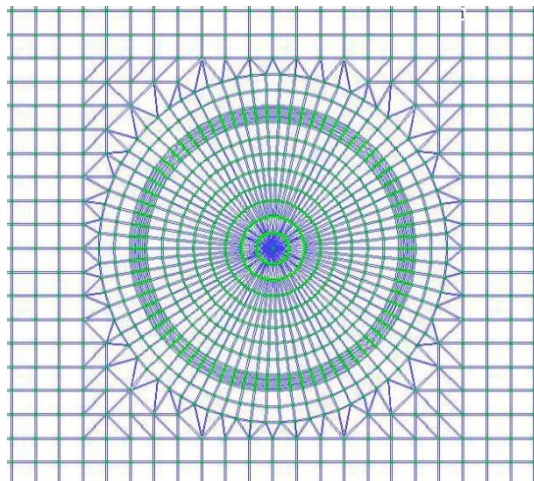


Рис. 7.10. Приклад розбивки моделі на скінченні елементи ґрунтового масиву і тунельної оправи кругового обрису

У ПК «Ліра» моделювання ґрунтового масиву в зоні взаємодії з тимчасовим кріпленням проводиться за допомогою інструменту

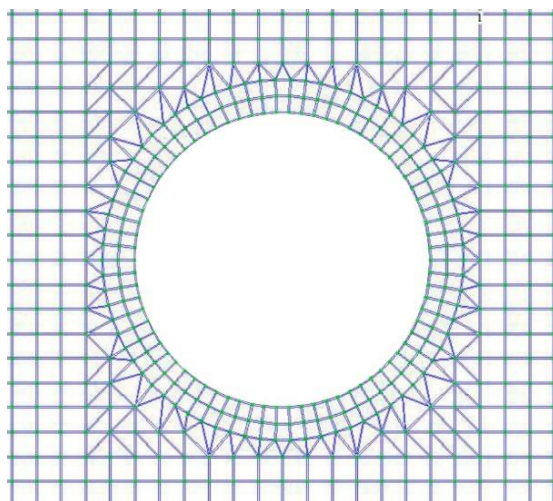


Рис. 7.11. Розбивка моделі на скінченні елементи біля тимчасового кріплення

«Створення та тріангуляція контуру». За допомогою цього інструменту програмний комплекс «Ліра» автоматично змодельє ґрунтовий масив з трикутних або чотирикутних скінченних елементів.

Результати тріангуляції контуру зображено на рисунку 7.11. моделюється етап проходки тунелю, після розробки породи до установки кріплення.

На рис. 7.12. показано який вигляд мають результати розрахунку напружено-деформованого стану оправи кругового обрису у програмі Lira, деформація – переміщення ґрунтового масиву наведені у вигляді ізополів переміщень по горизонтальній вісі X, а зусилля – у вигляді епюри моментів (рис.7.13).

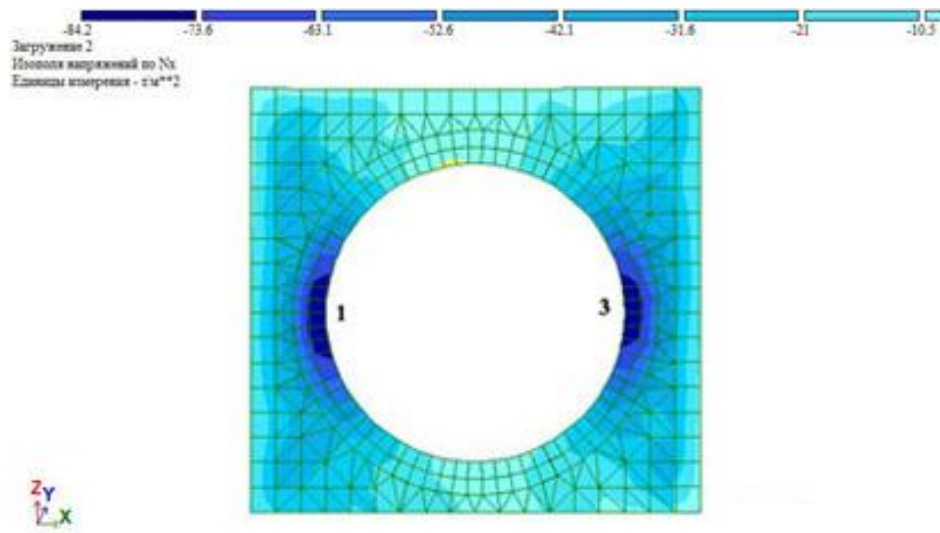


Рис. 7.12. Ізополя напружень по осі X у тунельній оправі

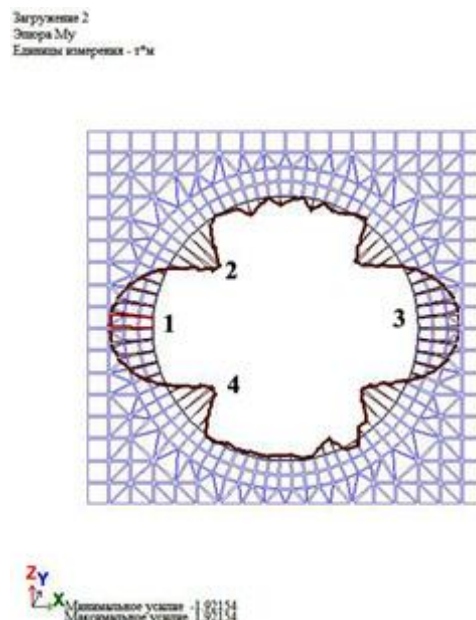


Рис. 7.13. Епюра моментів в оправі тунелю.

Завдання для самоконтролю

1. За допомогою чого ведеться моделювання оточуючого виробку ґрунтового масиву?
2. За допомогою чого ведеться моделювання тунельної оправи?
3. Що показують ізополя напружень навколо виробки?
4. Який вигляд мають результати розрахунку напружено-деформованого стану оправи кругового обрису у програмному комплексі SCAD.
5. Який вигляд мають результати розрахунку деформованого стану оправи кругового обрису у програмному комплексі Lira?
6. Який вигляд мають результати розрахунку напружено-деформованого стану оправи кругового обрису у програмному комплексі PLAXIS?

8 ПЕРЕВІРКА НА МІЦНІСТЬ ОПРАВ ТУНЕЛІВ

8.1 Епюра сил та моментів

Після розрахунку тунельної оправи та знаходження згинаючих моментів і нормальних сил у кожному перерізі будуються епюри сил та згинаючих моментів рис. 8.1. Епюри симетричні, тому будуються на одному рисунку.

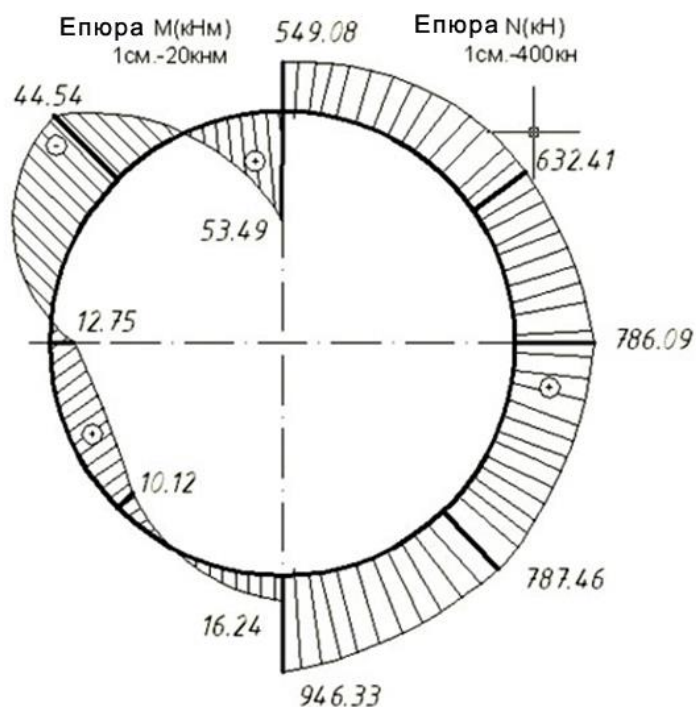


Рис. 8.1. Епюра нормальних сил та епюра згинаючих моментів

Після визначення згинальних моментів і нормальних сил у перетинах оправи роблять перевірку її на міцність відповідно до вказівок ДБН. Цей розрахунок потрібно проводити для двох перерізів із максимальними згинальними моментами різних знаків, розглядаючи блоки оправи як елементи, що працюють в умовах стиснення з вигином. Наступним шагом є знаходження самого небезпечного перерізу - для позацентрово-стиснутих залізобетонних елементів таким є переріз, де діє максимальний момент і мінімальна нормальна сила.

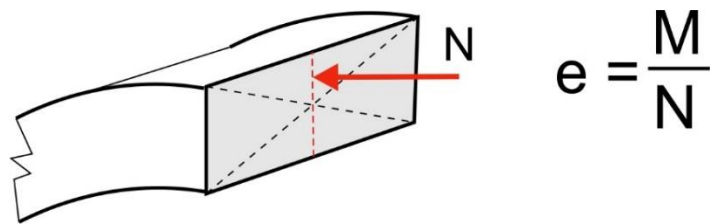


Рис. 8.2. Нормальна сила діюча у перерізі блоку, який розраховується на міцність

Перед проведенням перевірки оправи на міцність, слід виконати її армування, виходячи із правила симетричного армування блока чи тюбінгу, тобто розміщення однакової кількості арматури в розтягнутій та стиснутій зонах. Таке розміщення пояснюється тим, що нормальний блок або тюбінг може бути змонтований як у зоні від'ємних, так і в зоні додатних моментів.

Арматура елементів оправи (блоків, тюбінгів) складається з поздовжніх і поперечних стрижнів, поздовжні стрижні є робочими бо вони приймають зусилля в оправі і їхня кількість розраховується. Поперечні стержні (хомути) призначені для забезпечення проектного положення робочої арматури (арматурний каркас) і приймаються конструктивно.

Для поздовжньої робочої арматури потрібно застосовувати стрижні діаметром не менше 12 мм і не більше 40 мм. Мінімальна відстань у світлі між стрижнями арматури повинна бути не менша діаметра щебню бетону і не менша 25 мм. Найбільшу відстань між осями стержнів робочої арматури приймають не більше за 1,5 товщини елемента.

Згідно з правилами коефіцієнт армування повинен складати $\mu = 1,5 \dots 3 \%$, тобто площа поперечного перерізу арматури $A_s^{\text{сум}}$ повинна становити $1,5 \dots 3 \%$ поперечного перерізу бетону A_b . Визначення кількості стержнів робочої арматури наведено у роботі [9].

8.2 Розрахунок на міцність позацентрово стиснутих залізобетонних елементів

Розрахунок тунельних оправ з залізобетонних блоків і тюбінгів виконується відповідно до ДБН В.2.3-14:2006, як позацентрово стиснутих елементів.

Після визначення згинальних моментів і нормальних сил у перерізах оправи роблять перевірку її на міцність відповідно до вказівок вказаного ДБН.

Цей розрахунок потрібно проводити для двох перерізів із максимальними згинальними моментами різних знаків, розглядаючи блоки оправи як елементи, що працюють в умовах стиснення з вигином. При розрахунках залізобетонних оправ найчастіше зустрічається перший випадок позacentрового стиснення, що відповідає "великим" ексцентриситетам, коли задовольняється умова

$$\frac{S_{\delta}}{S_0} \leq \xi . \quad (8.1)$$

Значення коефіцієнта ξ для бетонів класу С20/25 (В20) і нижче становить 0,8, класу С25/30 (В30) - 0,7 і класу С32/40 (В40) - 0,65.

Перевірку блоків та тюбінгів на міцність проводять за формулою розрахунку перерізів, які працюють у режимі позacentрового стиску:

$$N \cdot e \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a'), \quad (8.2)$$

де N – поздовжня сила в перерізі, який перевіряється; ексцентриситет нормальної сили N відносно центра розтягнутої арматури $e = e_0 + \frac{h}{2} - a$ (геометричний параметр $a' = a$, який дорівнює сумі товщини захисного шару та половинному діаметру стержня); R_b – розрахунковий опір бетону на стиск; b – ширина елемента; x – висота стиснутої зони бетону; h_0 – геометричний параметр перерізу – висота перерізу від верхньої фібри до половини розтягнутої арматури; R_{sc} – розрахунковий опір арматури на стиск; A'_s – площа стиснутої арматури; a' – геометричний параметр перерізу – сумарна відстань від верхньої фібри до половини стиснутої арматури (рис. 6.4 і 6.5)

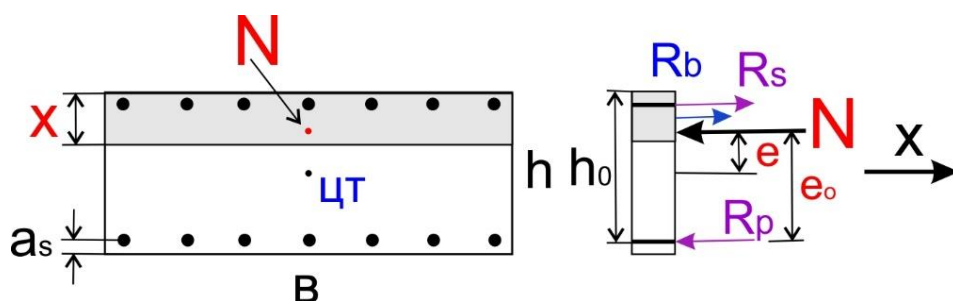


Рис. 8.1. Схема діючих зусиль у перерізі блоку

У цих формулах (рис.8.1.):

S_0 - статичний момент площі всього робочого перерізу бетону відносно осі розтягнутої арматури А;

N - величина нормальної сили в перерізі;

R_u - розрахунковий опір бетону стисненню при вигині;

R_a - розрахунковий опір стиснутої арматури;

R_{ac} - розрахунковий опір розтягнутої арматури;

F_a - площа перерізу розтягнутої арматури;

F'_a - площа перерізу стиснутої арматури;

F_0 - площа перерізу стиснутої зони бетону;

x - відстань від нейтральної осі до крайньої грані стиснутої зони бетону;

b - ширина розрахункового елемента (блоку);

e - відстань від осі розтягнутої арматури до точки дії нормальної сили;

e' - відстань від осі стиснутої арматури до точки дії нормальної сили;

h_0 - відстань від осі розтягнутої арматури до крайньої грані стиснутої зони бетону;

Мінімальну товщину бетонного захисного шару для збірних залізобетонних опор приймають при товщині елемента від 150 до 300 мм – 20 мм.

Ширина стиснутої зони x визначається з формули

$$N + R_s A_s - R_{sc} A'_s = R_b b x. \quad (8.3)$$

Оскільки $R_s A_s = R_{sc} A'_s$ при симетричному армуванні блока, то

$$x = \frac{N}{R_b b}. \quad (8.4)$$

Після проведеної перевірки залізобетонного елемента на міцність робиться висновок про її виконання. Якщо в ході перевірки з'ясовується, що міцність перерізу недостатня, тобто права сторона формули більше за ліву, то слід змінити параметри конструкції оправи за рахунок збільшення товщини перерізу, підвищення класу бетону або збільшення відсотку армування. Якщо це призводить до значного збільшення перерізу або перевірка знову не виконується, слід відмовитися від залізобетонної оправи і замінити її на чавунну.

8.3 Перевірка на міцність оправ із чавунних тюбінгів

Перевірку на міцність оправ із чавунних тюбінгів допускається проводити за формулою опору матеріалів

$$\frac{N}{F} \pm \frac{M_{y_{1,2}}}{I} \leq R_c, \text{ або } \frac{N}{F} \pm \frac{M_{y_{1,2}}}{I} \leq R_u, \quad (8.5)$$

де F - площа поперечного перетину чавунного тюбінга;

y_1, y_2 - відстані від центра ваги перетину (перерізу) до відповідної грані перерізу, що перевіряється.

Оболонку тюбінгу розраховують також на місцевий вигин як затиснуту балку товщиною t прольотом l , рівним відстані між центрами ваги вутів. При цьому враховуються навантаження: q - сумарне навантаження від розрахункового вертикального гірського тиску і гідростатичного тиску води (у зволжених породах);

$R = \frac{\sum P}{2\pi R_u}$ - тиск щитових гідроциліндрів на 1 пог.м. кільця ($\sum P$ -

спільне зусилля, що розвивається щитовими гідроциліндрами).

Сумарне стискаюче напруження в оболонці визначають за формулою

$$\sigma_1 = \frac{R}{t} + \frac{ql^2}{2t^2} \leq R_c. \quad (8.6)$$

При визначенні розтягуючих напружень тиск щитових домкратів не враховують

$$\sigma_2 = -\frac{R}{t} + \frac{ql^2}{2t^2} \leq R_u. \quad (8.7)$$

Підібрані перетини елементів оправ повинні задовольняти умовам міцності, викладеним у цьому розділі, без значних запасів.

Матеріали тунельних оправ

Бетонні і залізобетонні несучі конструкції слід виконувати із важких бетонів відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-215.

Мінімальний клас бетону за міцністю на стиск призначається не нижче наведених у таблиці 8.1.

Таблиця 8.1.

Мінімальні класи бетону оправ за міцністю на стиск

Вид конструкції	Клас бетону
Високоточні залізобетонні блоки оправ із водонепроникного бетону для тунелів закритого способу робіт	C40/50
Залізобетонні елементи оправ для закритого способу робіт	C30/35
Залізобетонні елементи оправ для відкритого способу робіт (включаючи суцільносекційні), «Стіни у ґрунті», в якості несучих конструкцій	C25/30
Портили, оголовки, набризкбетонні оправы, «Стіни в ґрунті» для тимчасового кріплення котлованів, внутрішні монолітні залізобетонні конструкції, бетонні підготовки під гідроізоляцію	C20/25
Дорожній бетонний шар верхньої будови колії, бетон внутрішніх конструкцій	C16/20
Жорстка основа колії, бетонна основа під підлогою ніш, камер та притунельних споруд, бетон для водовідвідних і кабельних лотків	C12/15

Розрахункові опори для бетону залізобетонних конструкцій в МПа наведені в табл. 8.2.

Таблиця 8.2

Характеристики матеріалів для підземного будівництва

Назва матеріалу	Розрахунковий опір, МПа		Питома вага γ , кН/м ³
	Стиску	Розтягу	
Бетони	$f_{cd} (R_b)$	$f_{cd} (R_{bt})$	
Бетон класу C20/25 (B25)	14,5	1,5	24,0
Бетон класу C25/30 (B30)	17,0	1,80	24,0
Бетон класу C30/35 (B35)	19,5	2,00	24,0
Бетон класу C32/40 (B40)	22,0	2,10	24,0

Бетон класу С35/45 (В45)	25,0	2,20	24,0
Бетон класу С40/50 (В50)	27,5	2,50	24,0
Арматура (стрижнева)	R_s	R_{sc}	
Клас А240С (А-I)) діаметром 6...40 мм	225 (225)	225 (225)	78,5
Клас (А-II)) діаметром 10...40 мм	280	280	78,5
Клас А400С (А-III) діаметром 6...8 мм	365 (355)	365 (355)	78,5
Клас А400С (А-III) діаметром 10...40 мм	375 (365)	375 (365)	78,5
Чавуни	R_c	R_u	
СЧ-21-40	1800	600	72,0
МСЧ 28-90, МСЧ 38-120	3400	1000	72,0

Примітка. В дужках наведені старі назви класів бетону та арматури.

Залізобетонні блоки і тюбінги проєктують із подвійною арматурою як елементи, які працюють в умовах стиснення з вигином, а також що мають здатність сприймати моменти різних знаків. Для поздовжньої робочої арматури потрібно застосовувати стержні діаметром не менш 12 мм і не більш 40 мм.

Площа арматури повинна бути не менше 1,5% і не більше 3% від площі розрахункового перерізу бетону. Мінімальна відстань у світу між стержнями арматури повинна бути не менша діаметру стрижня і не менша 25 мм. Найбільшу відстань між осями стержнів робочої арматури приймає не більш 1,5 товщини елемента.

Мінімальну товщину бетонного захисного шара для збірних залізобетонних опор приймають:

- а) при товщині елемента від 100 до 300 мм - 20 мм;
- б) те ж від 310 до 500 мм - 25 мм;
- в) те ж більше 500 мм - 35 мм.

В агресивному середовищі товщина шара повинна бути збільшена на 10 мм.

Завдання для самоконтролю

1. За якими формулами проводять перевірку на міцність оправ із залізобетонних блоків?
2. За якими формулами проводять перевірку на міцність оправ із залізобетонних тюбінгів?
3. За якими формулами проводять перевірку на міцність оправ із чавунних тюбінгів?
4. Як армуються залізобетонні блок?
5. Від яких параметрів залежить вибір класу бетону залізобетонних блоків?
6. Від яких параметрів залежить вибір класу арматури залізобетонних блоків?
7. Як розраховується кількість арматурних стрижнів при армуванні залізобетонних блоків?

9 КОНСТРУКЦІЯ ПРОХІДНИЦЬКОГО ЩИТА

9.1 Основні елементи немеханізованого щита

Прохідницьким щитом називають пересувне металеве кріплення (конструкцію), під захистом (огородженням) якої виконуються основні роботи по спорудженню тунелю: розробку ґрунту по всій площі забою тунелю, навантаження і відкату ґрунту, монтаж тунельної оправи.

На теперішній час існує багато видів щитів для спорудження різних типів тунелів у різних інженерно-геологічних умовах, але незмінною залишається принципова схема, що передбачає наступний порядок виконання робіт (цикл) по спорудженню тунелю рис. 9.1.

Під захистом ножового кільця 1 розробляється порода у забої на заходку L , довжина якої дорівнює ширині кільця оправи 5. Паралельно з розробкою ґрунту виконується його навантаження і відкатка до місця збору. Після очищення забою від розробленого ґрунту виконується переміщення щита до забою за допомогою щитових гідроциліндрів 3, розташованих по периметру опорного кільця 2, які опираються висувними штоками в останнє зібране кільце оправи 5. Після переміщення щита у вільний простір до забою, під захистом оболонки 4 виконується монтаж кільця оправи із елементів блоків або тубінгів. До циклу робіт входять роботи по нагнітання розчину за оправу у перше кільце, яке вийшло з під оболонки щита і чеканка швів.

Такий цикл робіт повторюється, забезпечуючи спорудження оправи на невеликій відстані від забою з забезпеченням безпеки проведення робіт з можливістю механізації більшості робіт що збільшує швидкість проходки.

Можливість проведення усіх робіт під захистом щита дає змогу споруджувати тунелі у складних інженерно-геологічних умовах.

Невеликий час, між розробкою породи і включенням у роботу оправи, зменшує гірський тиск, діючий на оправу, зменшує можливість осідання поверхні ґрунту.

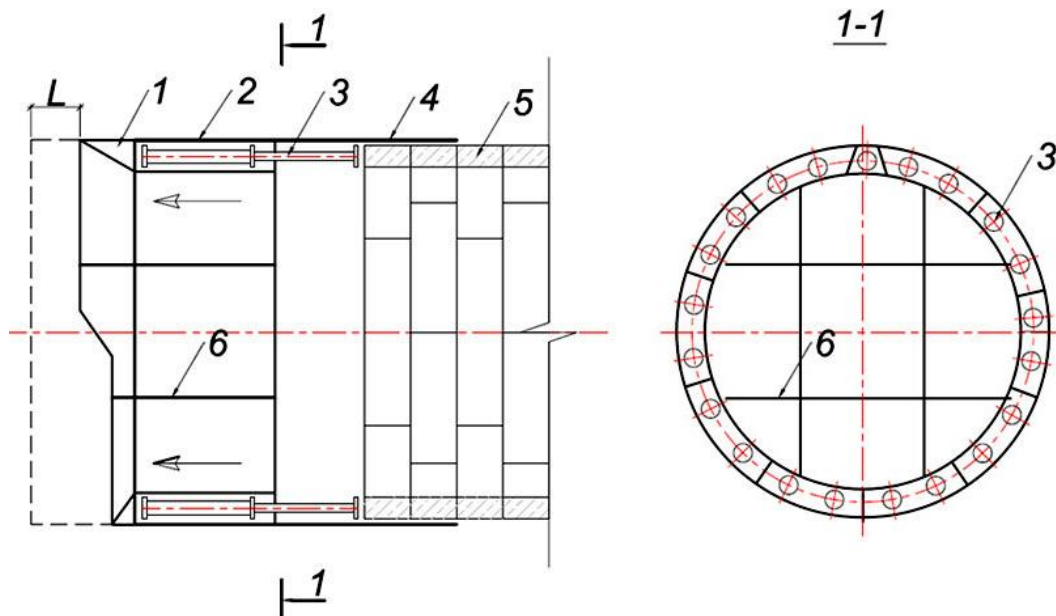


Рис. 9.1. Схема немеханізованого щита по спорудженню тунелю:

1 – ножове кільце, 2 – опорне кільце, 3 – гідроциліндр (щитовий домкрат), 4 – хвостова частина - оболонка, 5 - оправа тунелю, 6 – горизонтальні перегородки.

Основні частини щита: ножове 1 і опорне 2 кільця і оболонка 4, в межах якої монтують збірну оправу. Після розробки породи у забої, що знаходиться перед ножовим кільцем, щит за допомогою щитових гідроциліндрів 3, що спираються на останнє кільце оправи тунелю, просувають вперед, в простір, який звільнився від породи. Після цього штоки гідроциліндрів прибирають і в оболонці щита монтують чергове кільце оправи 5.

В межах опорного і ножового кілець внутрішній простір щита розділений горизонтальними перегородками 6 на яруси і вертикальними перегородками на осередки. Горизонтальні перегородки мають висувні платформи, переміщення яких забезпечують спеціальні платформні гідроциліндри.

Опорне і ножове кільця щита збирають із сталевих елементів-сегментів, з'єднують їх болтами подібно до тьюбінгів при складанні кільця оправи. Оболонка щита збирається з металевих листів.

Розробка ґрунту у забої, залежно від інженерно-геологічних умов і конструкції щита, може виконуватися вручну, ручним механізованим інструментом, буровибуховим або механізованим способами.

Пересування щита здійснюється, у стандартному варіанті, за рахунок роботи гідравлічних гідроциліндрів, які жорстко пов'язані з

конструкцією щита, а їхні плунжери опираються у останнє кільце зведеної оправи.

Оправи можуть виконуватись як у збірному, так і монолітному варіантах, з різних матеріалів та різної форми.

Форма й геометричні розміри поперечного перерізу прохідницького щита повинні відповідати обрису оправи, яка споруджується. При цьому принципова конструктивна схема щитів по суті однакова й передбачає наявність ножового й опорного кілець, а так само хвостової оболонки.

Технологічна схема спорудження тунелю немеханізованим щитом рис.9.2.

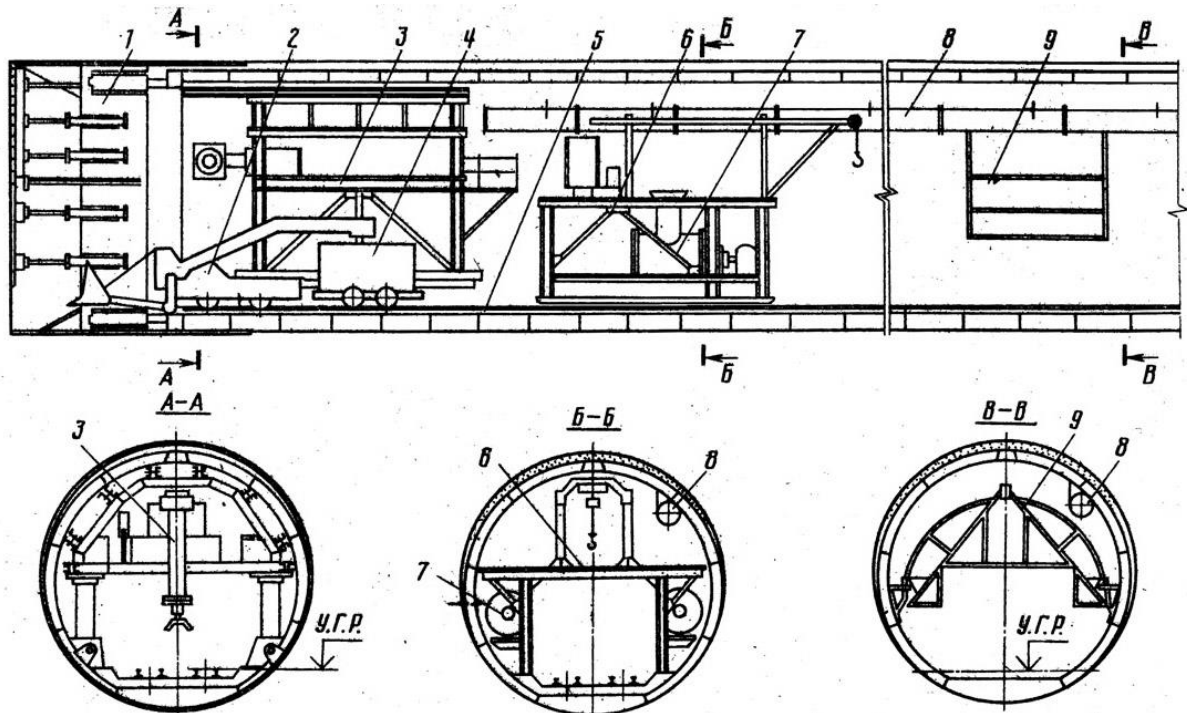


Рис. 9.2. Технологічна схема спорудження тунелю немеханізованим щитом

1 – ножове кільце, 2 – опорне кільце, 3 – гідроциліндр (щитовий домкрат), 4 – хвостова частина - оболонка, 5 - оправа тунелю, 6 – горизонтальні перегородки.

9.2 Визначення основних розмірів щита

Визначення основних розмірів щита виконується наступним чином.

1. Повна довжина щита $L_{щ}$ складає

$$L_{щ} = L_{нч} + L_{ок} + L_{хо}, \quad (9.1)$$

де $L_{нч}$ – довжина ножової частини; $L_{ок}$ – довжина опорного кільця; $L_{хо}$ – довжина хвостової оболонки щита.

2. Довжина ножової частини $L_{нч}$ приймається рівною 1,0...1,2 м.

3. Довжина опорного кільця $L_{ок}$ знаходиться з умови:

$$L_{ок} = 2b, \quad (9.2)$$

де b – ширина кільця оправи.

4. Довжина хвостової оболонки щита складає:

$$L_{хо} = l_1 + l_2 + l_3, \quad (9.3)$$

де $l_1 = (1,2...2,2)b$ – довжина перекриття кілець оправи ($1,2b$ приймається для стійких порід, $2,2b$ – для нестійких);

$l_2 = 0,6$ м – довжина виступаючої під оболонку частини щитового гідроциліндра;

$l_3 = 0,15$ м – величина зазору між опорною плитою щитового гідроциліндра і торцевою площиною оправи.

5. Внутрішній діаметр оболонки щита $D_{щ}$ повинен бути дещо більшим за зовнішній діаметр оправи $D_{зн}$ для того, щоб врахувати можливі неточності при монтажі оправи й забезпечити можливість кута повороту щита відносно оправи на криволінійних ділянках траси (0,8 % від $D_{зн}$).

Зовнішній діаметр щита $D_{щ}$ складає:

$$D_{щ} = 1,008D_{зн} + 2\delta, \quad (9.4)$$

де $\delta = 30$ мм – товщина оболонки щита.

6. Відношення $L_{щ}/D_{щ}$ називається коефіцієнтом маневреності щита. Величина цього коефіцієнта складає 0,4...0,75 для щитів великого, 0,75...1,0 – середнього і більше 1,0 – малого діаметрів.

7. Приблизна вага щита $G_{щ}$, кН:

$$G_{щ} = 85D_{щ}^2 - 250. \quad (9.5)$$

8. Величина необхідного повного зусилля щитових гідроциліндрів F :

$$F \geq (1,1 \dots 1,3)R, \quad (9.6)$$

де R – загальна сила граничного опору.

9. Загальну силу граничного опору R знаходять за формулою:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4, \quad (9.7)$$

де R_1 – опір щиту породи по лобовій поверхні; R_2 – опір щиту породи по зовнішній поверхні; R_3 – опір щиту частини кріплення, яке розміщене під хвостовою оболонкою; R_4 – опір щиту частини щитового комплексу, який переміщується разом зі щитом.

9.1. Опір щиту породи по лобовій поверхні R_1 дорівнює нулю у породах із міцністю $f \geq 1,0$; у породах із міцністю $f < 1,0$:

$$R_1 = Sq_{\Gamma}^p, \quad (9.8)$$

де S – площа поперечного перерізу щита за зовнішнім діаметром.

9.2. Опір щиту породи по зовнішній поверхні R_2 знаходять за формулою:

$$R_2 = f_{m1}[(q_{\sigma}^p + P + q_{\sigma}^3 + q_{\sigma}^n)L_{щ}D_{щ} + G_{щ}] + 1000\pi CL_{щ}D_{щ} + 0,05f_{m1}k_D\Delta L_{щ}D_{щ}, \quad (9.9)$$

де f_{T1} – коефіцієнт тертя сталі по ґрунту ($f_{T1}=0,4 \dots 0,5$);

C – питоме зчеплення між ґрунтом та сталлю щита (для сипких, напівскельних та скельних ґрунтів $C=0$; для глинястих – $C=5 \dots 10$ кН/м³);

$k_D = \frac{D_0}{D_{щ}}$ – наведений коефіцієнт пружного відпору ґрунту ($D_0=5$ м – розмірний коефіцієнт; Δ – обжимання ґрунту боковою поверхнею: при $f \geq 1,0$ він дорівнює нулю; при $f < 1,0$ він дорівнює $\Delta = \frac{1}{6f+4} - 0,077$).

9.3. Опір щиту частини кріплення, яке розміщене під хвостовою оболонкою, R_3 знаходять за формулою:

$$R_3 = f_{T2}(1,2 \dots 2,2)G_K, \quad (9.10)$$

де f_{T2} – коефіцієнт тертя пари «матеріал оправи–сталь» (для пари «чавун–сталь» $f_{T2}=0,18$; для пари «бетон–сталь» $f_{m2}=0,5$).

9.4. Опір щиту частини щитового комплексу, який переміщується разом зі щитом R_4 :

$$R_4 = k_M f_{T2} G_{щк}, \quad (9.11)$$

де $k_M=2$ – коефіцієнт місцевого опору;

$G_{щк}$ – вага частини щитового комплексу, який переміщується разом зі щитом, яка приблизно дорівнює вазі щита $G_{щ}$.

10. Зусилля одного гідроциліндра дорівнює:

$$P_o = \frac{(1,3...1,5)F}{n}, \quad (9.12)$$

де n – кількість гідроциліндрів, які визначаються з конструктивних міркувань залежно від діаметра щита (2...3 гідроциліндри на один нормальний блок).

Завдання для самоконтролю

1. Від яких параметрів залежать основні розміри щита?
2. З яких основних елементів складається прохідницький щит?
3. Під захистом якої частини щита розробляється порода?
4. Перелічите основні елементи прохідницьких щитів.
5. За рахунок чого пересувається прохідницький щит?
6. Під захистом якої частини щита монтується тунельна оправа?
7. Для чого потрібні щитові гідроциліндри?

10 БЕЗЩИТОВА (ЕРЕКТОРНА) ПРОХОДКА ТУНЕЛІВ

У стійких породах з коефіцієнтом міцності f більше 1,5, що допускають розкриття забою тунелю на повний переріз без його обвалення та вивалів, застосовують безщитовий спосіб проходки тунелю кругового обрису, оправу збирають за допомогою тьобінго- або блокоукладача.

Виробку тунелю розробляють одразу на повний переріз з установкою при необхідності кріплення покрівлі і лоба забою, що захищає робітників. Породу у забої руйнують відбійними молотками, комбайнами чи буровибуховим способом. Монтаж збірної оправу виконують безпосередньо біля забою важільним блокоукладачем.

В міцних породах може застосовуватись безщитова (еректорна) проходка тунелів без кріплення забою. Цей спосіб має таку назву, тому що всі інші операції такі самі, як і при щитовій проходці, тільки відсутній щит. Таким способом будувались перегінні тунелі першої черги метрополітену у м. Дніпро.

10.1 Розробка породи

Розробка породи виконується в залежності від міцності породи відбійними молотками (зараз використовується тільки у виняткових випадках), комбайнами або буровибуховим способом в залежності від геологічних умов, міцності породи та її абразивності.

Застосування комбайна для розробки породи рис. 10.1. має свої переваги: поєднуються роботи по розробці навантаженню і відкати породи, що збільшує швидкість проходки, контур виробки наближається до проектного, що забезпечує економію розчину для нагнітання, при цьому усувається шкідливий вплив вибухів на оточуючий виробку ґрунтовий масив, що особливо важливо при наявності тріщинуватості порід.

Недоліками використання комбайнів є великі витрати електроенергії, велика вартість різців, якими розробляють породу,

тому їх не використовують при великій абразивності порід, наприклад пісковиків та порід, які включають мінерал кварц або залізні руди.



Рис.10.1. Комбайн для розробки породи

Прохідницький цикл у забої при комбайновій технології розробки породи включає чотири основних процеси: розробка і навантаження гірської породи, її транспортування, монтаж оправи, нагнітання за оправу. Чеканка швів виконується на відстані від забою і жорстко не пов'язана з циклом робіт. Розробку породи у забої фрезою виконавчого органу комбайну виконують заходками, які дорівнюють шагу встановлення кілець оправи, а при стійких породах – до 2...3 м. При необхідності можливе використання тимчасового кріплення з набризкбетону.

При проходці тунелів з використанням буровибухового способу розробки породи (рис.10.2.) збільшується час на навантаження та відкатку породи, і прохідницький цикл включає п'ять основних процесів: буріння шпурів, заряджання та підривання зарядів, навантаження та відкатку породи, монтаж оправи, нагнітання за оправу. Треба мати на увазі, що під час заряджання та підривання ніякі інші роботи у забійній зоні проводити не можна згідно з правилами охорони праці.

Прохідницький цикл починається, як правило, з розмітки у забої місць розташування шпурів, що виконується відповідно до схеми в паспорті буровибухових робіт.

Наступною роботою циклу є буріння шпурів буровою установкою (рис. 10.3). Кількість шпурів та їх розташування визначається відповідно паспорту буровибухових робіт (рис. 10.4).

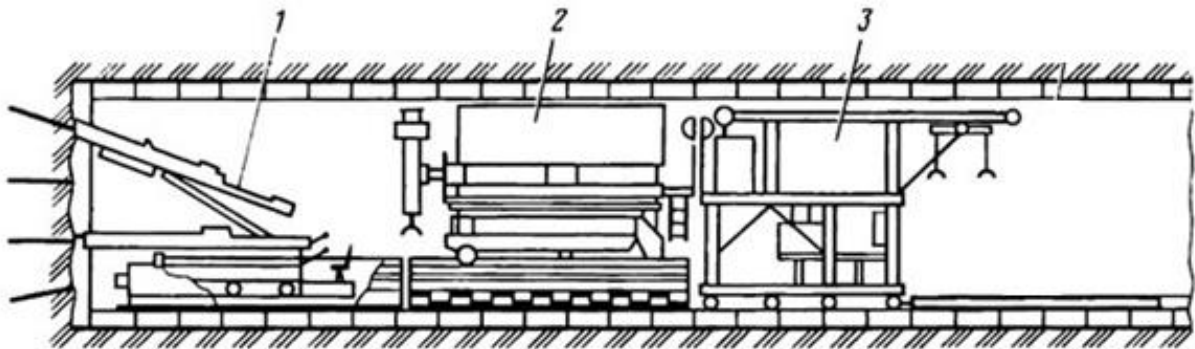


Рис.10.2. Схема проходки тунелів з використанням буровибухового способу розробки породи:

1- бурова установка, 2 – блокоукладач, 3 - пересувна платформа

Під час буріння шпурів буровою установкою, блокоукладач переміщується від забою на безпечну відстань. Час буріння шпурів залежить від кількості бурових кареток на буровій установці (рис.10.3). В залежності від проекту робіт можуть використовуватися бурові установки як на пневмоході, так і на рельсовому.



Рис. 10.3. Бурова установка

Після закінчення буріння шпурів виконується їхнє заряджання спеціальною бригадою робітників, або проходчиками, які мають право проведення буровибухових робіт. На час заряджання і підривання

зарядів усі роботи у забої припиняються, техніка переміщується на небезпечну відстань від місця проведення робіт.

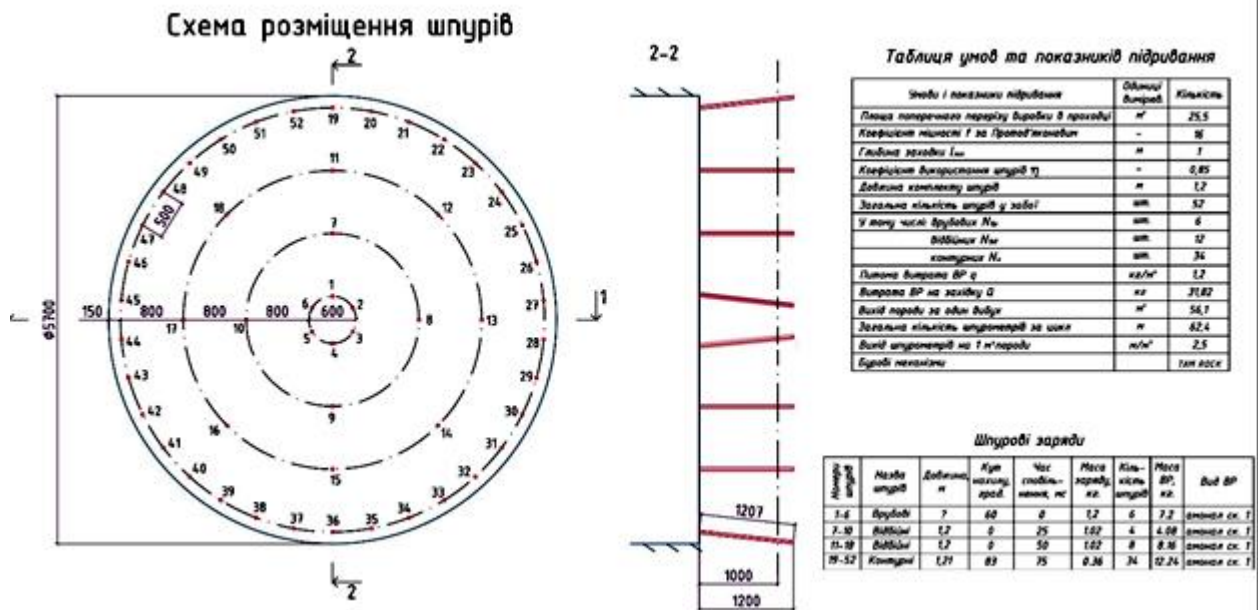


Рис.10.4. Паспорт буровибухових робіт

Після підривання, проводиться провітрювання та огляд забою спеціальними робітниками, після чого починається навантаження та відкатка породи.

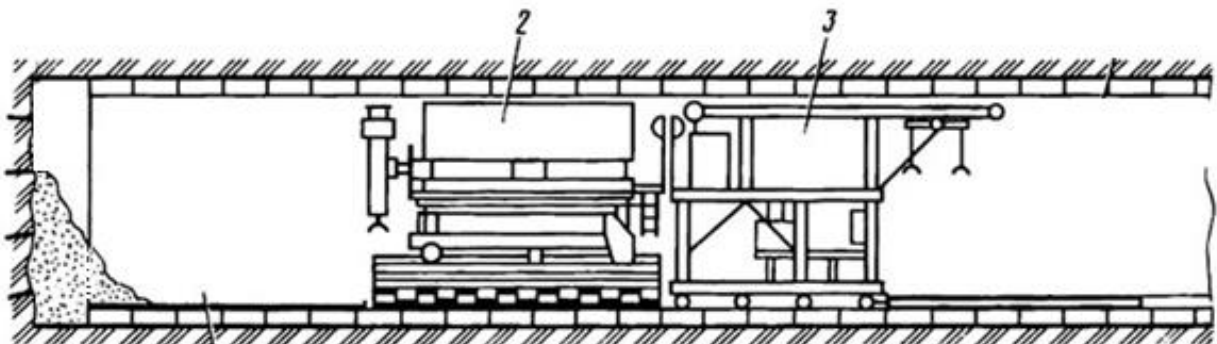


Рис.10.5. Схема провітрювання та огляд забою:

2 – блокоукладач, 3 - пересувна платформа для нагнітання розчину за оправу

10.2 Навантаження та відкатка породи

Ґрунт, який після підриву зарядів накопичився біля забою, навантажують у вагонетки (рис. 10.7.) породонавантажувальними машинами (рис. 10.8.) та переміщують до шахтного стовбуру або у передпортальну виїмку в залежності від типу тунелю, який споруджується.

При будівництві тунелів з порталів порода може транспортуватись спеціальним тунельним автомобільним транспортом.

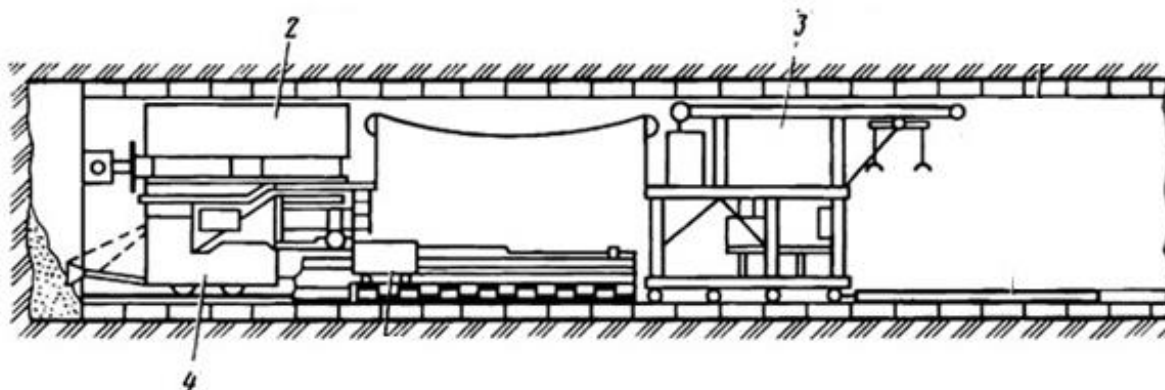


Рис.10.6. Схема навантаження та відкатки породи:

1- бурова установка, 2 – блокоукладач, 3 - пересувна платформа, 4 – машина для навантаження породи.

Кількість вагонеток у составі що перевозе породу, розраховується в залежності від типу тунельного електровозу, який може бути акумуляторним чи з контактним проводом.



Рис.10.7. Вагонетки для відкатки породи

Кількість та ємність вагонеток розраховують і приймають в залежності від об'єму породи, який необхідно вивезти за один цикл робіт.

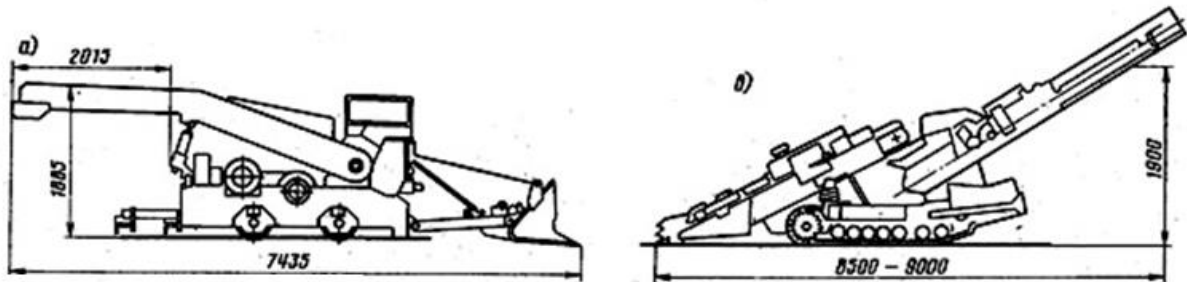


Рис.10.8. Машини для навантаження породи:

- а) ковшова навантажувальна машина періодичної дії на рельсовому ході;
- б) навантажувальна машина безперервної дії на гусеничному ході с закріпленими лапами.

Визначення основних параметрів робіт із перевезення породи, яка розробляється за цикл прохідницьких робіт. Як основний тяговий засіб для переміщення поїздів рейковим транспортом слід застосовувати контактні або акумуляторні електровози постійного струму. Для цього необхідно визначитися з типом електровоза і вагонетки.

1. Визначаємо кількість вагонеток $z_B^{зр}$, які може потягти електровоз за умови зрушення:

$$z_B^{зр} (G + G_o) \leq \frac{1000 F_T}{\omega_{зр} + \omega_i + 110 a_{зр}} - P_c, \quad (10.1)$$

де $G = 0,9 \frac{V_{вар} \gamma}{k_p}$ – маса породи у вагонетці, т;

G_o – маса порожньої вагонетки, т;

F_T – сила тяги електровоза, т;

$\omega_{зр}$ – опір зрушення вагонеток з місця (дорівнює $\omega_{зр} = 8 \dots 5$ кг/т при вазі породи $G = 6 \dots 15$ т, $\omega_{зр} = 11 \dots 9$ кг/т при вазі породи $G = 3 \dots 5$ т та $\omega_{зр} = 13 \dots 12$ кг/т при вазі породи $G = 1 \dots 2$ т); ω_i – опір уклону перегінного тунелю (збігається зі значенням уклону в промілі);

$a_{зр}$ – опір руху потяга із ґрунтом при зрушенні з місця ($a_{зр} = 0,04 \dots 0,05$ м/с²);

P_c – загальна маса електровоза, т.

Кількість отриманих вагонеток округлюється в меншу сторону.

2. Визначаємо кількість вагонеток $z_B^{гм}$, які може зупинити електровоз за умови руху вниз та гальмування:

$$z_B^{\Gamma M}(G + G_o) \leq \frac{F_T'}{110a_{\Gamma M} + \omega_i - \omega_{\Gamma M}} - P_c, \quad (10.2)$$

де $a_{\Gamma M}$ – коефіцієнт опору за умови руху вниз ($a_{\Gamma M}=0,39$ м/с², тобто при екстреному гальмуванні максимальний шлях потяга дорівнює 10 м при швидкості руху 10 км/год);

$F_T' = 1000\psi P_c$ – скоригована сила тяги електровоза (ψ – коефіцієнт зчеплення ведучих коліс з рейками, який дорівнює 0,24);

$\omega_{\Gamma M}$ – опір руху потяга із ґрунтом за умови руху вниз (дорівнює $\omega_{\Gamma M}=9...8$ кг/т при вазі породи $G=1...2$ т, $\omega_{\Gamma M}=7...6$ кг/т при вазі породи $G=3...5$ т та $\omega_{\Gamma M}=5...3$ кг/т при вазі породи $G=6...15$ т).

Кількість отриманих вагонеток округлюється в меншу сторону і для подальшого розрахунку приймається менше значення.

3. Тривалість рейсу T_p , год, складається із тривалості руху потяга $T_{руху}$ та тривалості маневрів T_m протягом рейсу (T_m дорівнює 0,3 години):

$$T_p = T_{руху} + T_m. \quad (10.3)$$

Тривалість руху потяга $T_{руху}$, год, визначається як:

$$T_{руху} = \frac{2L}{0,75V}, \quad (10.4)$$

де L – довжина відкатки, км, приймається рівною половині довжини тунелю; V – швидкість руху потяга, км/год (приймається за табл. 10 Додатка, але не більше 10 км/год із умови безпеки руху в підземних виробках).

Необхідна кількість електровозів по відкатці породи визначається за формулою

$$N = \frac{mn_0}{n_p}, \quad (10.5)$$

де m – коефіцієнт нерівномірності відкатки, $m=1,5$;

n_0 – кількість рейсів, необхідна для перевезення породи, яка розробляється за цикл, $n_0 = \frac{G_{цикл}}{ZG}$ ($G_{цикл}$ – маса породи, яка розробляється за цикл);

n_p – можлива кількість рейсів одного потяга з породою за цикл $n_p = T/T_p$ (T – час, протягом якого проводиться розробка й відкатка породи (визначають за циклограмою). Необхідна кількість електровозів округлюється в більшу сторону до цілого числа.

10.3 Монтаж тунельної оправи

Схема монтажу оправи з використанням блокоукладача важільного типу показана на рис 10.9.

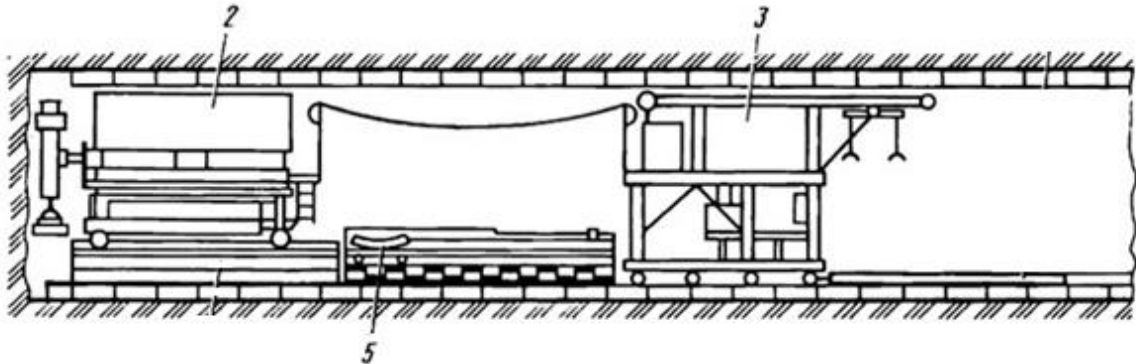


Рис.10.9. Схема монтажу оправи з використанням блокоукладача важільного типу:

2 – блокоукладач, 3 – платформа для чеканки швів, 5 – елементи оправи.

Після завершення робіт з відкатки породи від забою, до нього подається блокоукладач тунельної оправи (рис. 10.9).

Елементи оправи тюбінги або блоки подаються до забою на візках під важіль блокоукладача. Тюбінг або блок фіксується на важелі за допомогою захвату, частіше для цього використовується отвір для нагнітання у спинці тюбінга або блоку. Кільце оправи збирають з перев'язкою поздовжніх швів за рахунок зміщення блоків суміжних кілець (для збільшення жорсткості).

При монтажу кільця оправи із тюбінгів в першу чергу укладають нижній лотковий тюбінг, який має горизонтальну поверхню, до якого симетрично, з обох боків, приєднують інші нормальні тюбінги, які кріпляться і до попереднього зібраного кільця оправи. Болтові отвори у кільцевих бортах тюбінга поєднуються з болтовими отворами оправи яка вже змонтована і в них забиваються металеві конічні стержні – оправки для суміщення отворів.

Після суміщення усіх отворів, в них встановлюють болти з гідроізоляційними шайбами та затягують їх за допомогою пневмозбалчувача, оправки виймають і замінюють болтами з гідроізоляційними шайбами. Наступні тюбінги встановлюють таким же чином по порядку зліва та справа від лоткового до горизонтального діаметру оправи, при цьому важіль блокоукладача від'єднується від тюбінга тільки після його фіксації з сусідніми тюбінгами на болтове з'єднання. Під час установки тюбінгів вище горизонтального діаметру,

для їх додаткової фіксації використовуються висувні балки на візку блокоукладача. Закінчується монтаж кільця оправи установкою замкового тюрінга.

Зболчують тюрінги пневматичними зболчувачами. Під час монтажу кільця оправи ведуться геодезичні вимірювання. Відхилення кілець оправи у плані та профілі допускається не більше ± 50 мм, а еліптичність кілець укладання не повинна перевищувати ± 25 мм.

Монтаж кілець оправи із блоків при використанні важільних укладачів починають з укладання нижнього лоткового блоку.

Інші блоки укладають поперемінно та симетрично, з обох сторін до половини кільця. У попередні часи блоки не мали зав'язків у стиках тому їх з'єднували шпильками. Блоки верхньої половини кільця під час укладання підтримуються висувними балками, змонтованими на опорній конструкції укладача.

На даний час використовуються блоки зі зв'язками у стиках, тому їхній монтаж такий, як і у тюрінгів.

Взаємне зміщення блоків у кільці по поздовжнім стикам не має перевищувати ± 10 мм, а по кільцевим ± 15 мм. Після монтажу кільця оправи виконується нагнітання розчину за оправу.

Монтаж оправи - одна з головних операцій, яка визначає швидкість спорудження тунелю. Під час монтажу оправи в забої неможливо проводити інші роботи, але на відстані, паралельно може проводитися робота по гідроізоляції швів - чеканочні роботи.

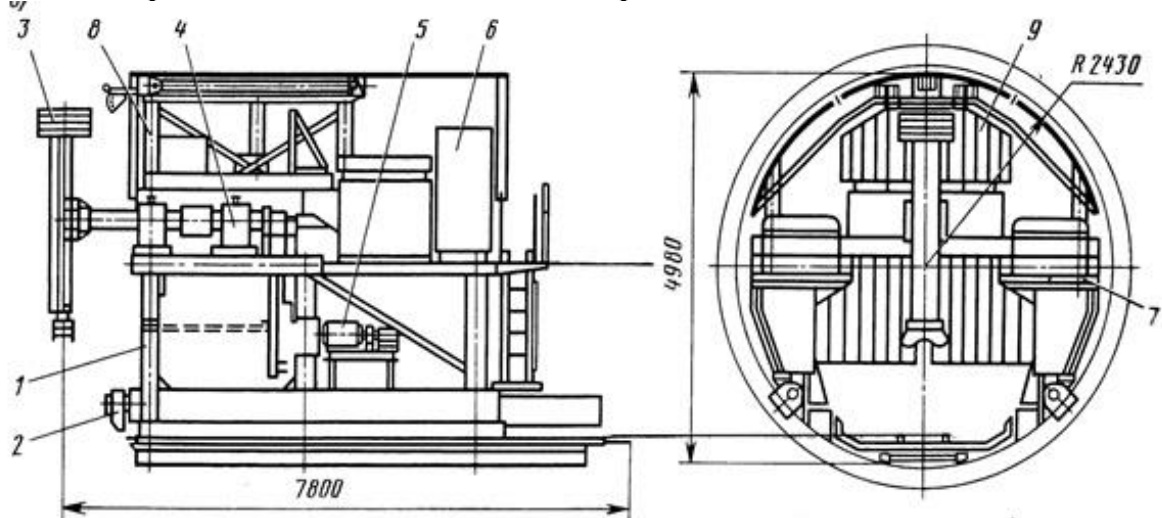


Рис.10.10. Укладач збірної оправи тунелю важільного типу:

- 1 – візок блокоукладача, 2 – тяги, 3 – важіль, 4 – привід обертання важіля, 5 – електромотор, 6 – електрошкитова, 7 – висувні платформи, 8, 9 – захист від підривання.

Під час монтажу кільця оправи ведеться контроль за щільністю з'єднання елементів оправи. Для забезпечення безпеки робіт, команди машиністу блокоукладача подає тільки одна людина – бригадир. Не допускається знаходження робітників під важелем блокоукладача, не допускається залишати закріплений елемент у підвішеному стані під час перерви у роботі.

10.4 Нагнітання за оправу

Нагнітання за оправи виконується для заповнення порожнечі між оправою і породою з метою включення у спільну роботу оправи з оточуючим ґрунтом та запобігання розвитку гірського тиску і більш рівномірний його розподіл по оправі. У той же час піщано-цементний розчин служить гідроізоляцією, яка не пропускає воду у тунель.

Схема встановлення ін'єкторів для нагнітання наведена на рис. 10.11.

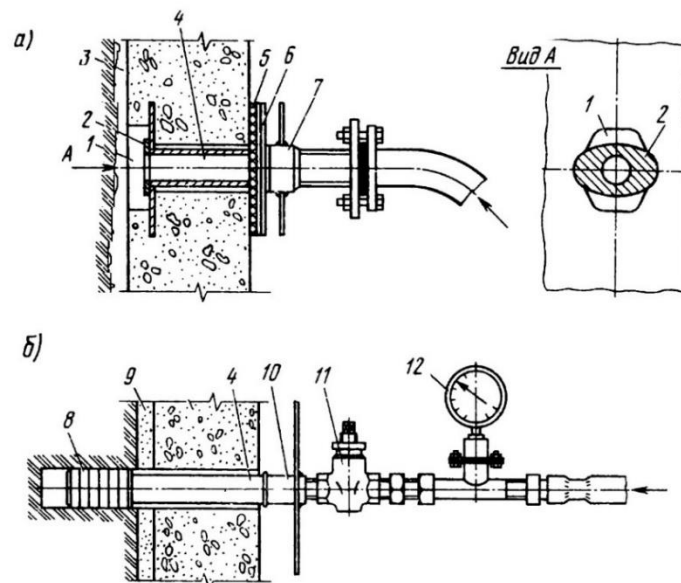


Рис.10.11. Схема ін'єктору для залізобетонних елементів оправи:

а) первинне нагнітання, в) контрольне нагнітання.

1 – овальний отвір у спинки блоку, 2 – овальна металева пластина, 3 – залізобетонний елемент оправи, 4 – трубка ін'єктору, 5 – резинова прокладка, 6 – металева пластина, 7 – затискна гайка, 8 – ущільнювач, 9 – шар первинного нагнітання, 10 – натяжна гайка, 11 – пробковий кран, 12 – манометр.

Нагнітання виконується у два етапи, первинне нагнітання, а потім контрольне. Розчини для нагнітання готуються на місці провадження робіт у бетономішалках перед проведенням нагнітання. Для покращення водонепроникності в їх склад додають спеціальні добавки. На рис. 10.11. показано один із варіантів конструкції ін'єктору для залізобетонних елементів оправи, для чавунних тюбінгів він відрізняється, за допомогою якого з'єднують бетоновід з оправою. Для чавунних тюбінгів ін'єктор має на кінці металеву трубку з різьбленням на поверхні, яка співпадає з різьбленням отвору у спинки тюбінгу.

Роботи проводяться з інвентарних візків, які мають обладнання для приготування піщано-цементного розчину та насос і бетоновід для подачі його за оправу. Кількість приготовленого розчину має вистачити для безперебійної роботи по його нагнітання за одне кільце.

Первинне нагнітання проводиться в останнє зібране кільце знизу вгору по кільцю в усі отвори у спинках тюбінгів, починаючи з лоткового, поперемінно з різних боків. У міцних породах дозволяється проводити нагнітання до горизонтального діаметру але з відставанням не більше трьох кілець оправи. Розчин нагнітають до тих пір, поки він не дійде до рівня отворів, розміщених вище, тоді ін'єктор переставляють у отвір, який знаходиться вище, а отвір після зняття ін'єктору закривають пробкою.

Контрольне нагнітання проводиться метою заповнити пустоти, які утворилися після усадки бетону первинного нагнітання і можливі тріщини після деформації оправи.

Контрольне нагнітання роблять чисто цементним розчином при тиску до 1 МПа, зазвичай на відстані 30...50 м. від забою. В обводнених породах контрольне нагнітання за оправу із збірного залізобетону виконують після чеканки швів та отворів для первинного нагнітання, за чавунну оправу – до чеканки швів. У сухих породах при всіх видах оправ контрольне нагнітання виконують після чеканки швів оправи.

Нагнітання розчину не виконують у пливунах і водонасичених пісках, а також за збірну, обтиснуту у породу оправу. Для монолітно-пресованої оправи у слабких і сильно тріщинуватих породах застосовують лише контрольне нагнітання.

10.5 Гідроізоляція. Чеканка швів збірних оправ

Гідроізоляція оправи. При оправі з чавунних тюбінгів гідроізоляцію виконують одночасно зі зведенням оправи. Під час з'єднання тюбінгів болтами встановлюють гідроізоляційні шайби з азбестобітуму, які стискаються сталевими сферичними шайбами (рис. 10.2).

Шви між тюбінгами чеканять за допомогою спеціальних молотків замазкою з цементу, що розширюється або швидко твердне і розширюється, а в більш відповідальних випадках - освинцьованим шнуром з азбестобітумним сердечником.

На рис. 10.12 показано гідроізоляція болтових з'єднань та чеканка швів.

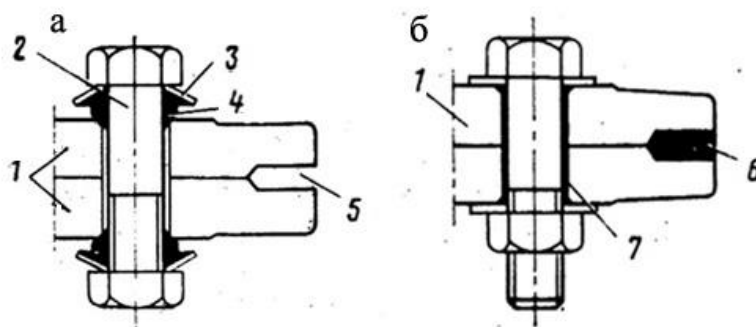


Рис.10.12. Схема улаштування гідроізоляції болтових з'єднань та чеканки для чавунних тюбінгів:

а) – до затяжки болтів, б) – після затяжки болтів.

1 – тюбінги, 2 – болт, 3 – металеві шайби, 4 – азбестобітумні шайби,

5 – чеканочна канавка, 6 – чеканочна канавка, заповнена розчином,

7 – азбестобітумне заповнення болтового отвору.

Гідроізоляцію залізобетонної оправи виконують на відстані не менше 25 м від забою. Стики в залізобетонній оправі ізолюють замазкою з цементу, що розширюється без чеканки, епоксидно-фурановою мастикою і ущільнюючим складом БУС, що швидко схоплюється.

Для гідроізоляції стиків і отворів залізобетонної оправи застосовують також розчини зі звичайного портландцементу з добавками, що спінуються, що обходиться дешевше застосування цементів і БУС.

10.6 Циклічність робіт при спорудженні тунелю еректорним способом

Основним принципом організації тунельних робіт є циклічність їх виконання. Під циклом розуміють завершений процес виконання певного обсягу робіт, що повторюється через однакові проміжки часу. Обсяг робіт у циклі визначають за сумою обсягів робіт усіх операцій, в результаті виконання яких фронт робіт робочої зони, наприклад, передового забою, переміщається вперед зі швидкістю будівельного потоку (на глибину заходки).

Тривалість циклу має бути такою, щоб за зміну або добу завершилося ціле число циклів. При більшій тривалості робіт циклу в нього повинне укладатися ціле число змін.

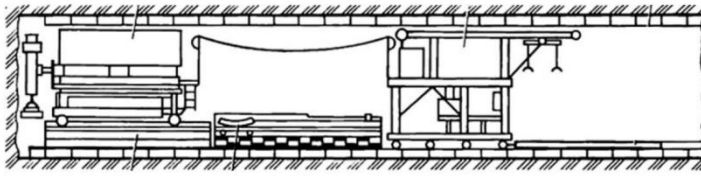
Для скорочення тривалості циклу поєднують у часу можливо більше окремих операцій. Раціональна тривалість циклу мусить бути кратної зміні чи добі, тобто, щоб за добу чи зміну завершувалося ціле число циклів. Це дозволяє краще організувати роботу змінних бригад робітників.

Графічне зображення послідовності всіх операцій циклу з урахуванням їх тривалості називають циклограмою (рис.10.13). Її складають виходячи з обсягів робіт окремих операцій циклу та нормативного часу їх виконання робітниками відповідної професії та кваліфікації. При цьому потокова організація робіт вимагає однакової швидкості просування фронту робіт у кожній робочій зоні. Цю швидкість встановлюють переважно за швидкістю просування передового забою – робочої зони з найбільшою трудомісткістю. Циклограми для всіх інших робочих зон становлять з цієї швидкості, змінюючи склад бригад і продуктивність прийнятого устаткування.

Прогресивна організація робіт в метробудуванні передбачає застосування потокового методу з циклічним виробництвом гірничопрохідницьких і будівельно-монтажних робіт.

При роботах по проходці тунелів один цикл найчастіше вимірюють протяжністю (кількістю метрів) готового тунелю, що споруджується за одну добу. До складу циклу входять основні роботи (розробка забою, прибирання породи, зведення оправи) і допоміжні роботи (укладання рейкових шляхів, пересування прохідницького устаткування, нарощування комунікацій, нагнітання розчинів за оправу та ін.).

Побудува циклограми робіт та визначення швидкості проходки тунелю метрополітену еректорним сособом.



Тр. витр. - Буріння шпурів. - 0,1 ч.г. на 1 п.м. шпура
50 шпурів на цикл
Тр. витр. - Навантаження породи. - 30 ч.г. на 100 м³
V породи - 24 м³, Kp = 1.2
Тр. витр. - Монтаж оправи. - 200 ч.г. на 100 м³
V оправи - 5.0 м³
Трудовитр. - нагнітання за опр. - 50 ч.г. на 100 м²
F нагнітання - 15 м²

№. по пор.	Найменування робіт	Один. виміру	Об'єм на цикл	Трудо-витрати на один чол. год	Трудо-витрати на цикл	1 зміна						2 зміна						3 зміна						4 зміна					
						1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	Буріння шпурів	п. метр шпура	50	0,1	5	2	2,5											2	2,5										
2	Заряджання шпурів	кількість шпурів	50	0,05	2,5			2	1,25											2	1,25								
3	Підривання та провітрювання				0,5 год.				0,5												0,5								
4	Огляд забою				0,5 год.					0,5												0,5							
5	Навантаження породи	м ³	24	0,3	7,2						3												3						
6	Монтаж оправи	м ³	5,0	0,2	10,0						2,4													2,4					
7	Нагнітання за оправу	м ²	15,0	0,5	7,5																								
8	Допоміжні роботи																												

Рис. 10.13. Циклограма робіт

Циклічність пред'являє підвищені вимоги до кожного члена бригади: він повинен ясно представляти всю послідовність робіт циклу, знати час, відведений для кожної роботи, мати навички, необхідних її виконання у встановлені терміни. Циклічна робота неможлива без чіткого та своєчасного забезпечення кожної робочої операції відповідним справним інструментом, машинами та механізмами, необхідними матеріалами. Вона вимагає налагодженої роботи транспорту, безперебійного постачання водою, електроенергією, стисненим повітрям, надійної роботи вентиляції та водовідливу, правильного використання робочої сили, оперативного та продуманого керівництва всім виробничим процесом.

На основі циклограм складають графік виконання робіт зі спорудження тунелю, який відображає послідовність та строки виконання робіт у цілому по об'єкту, зв'язок між роботами та загальний термін будівництва. Відповідно до цього графіка встановлюють графіки потреби в будівельних конструкціях, виробках, деталях, напівфабрикатах та матеріалах, машинах та механізмах, робочих кадрах.

Завдання для самоконтролю

1. Від чого залежить спосіб розробки породи при еректорному способу проходки?
2. В якій послідовності виконуються роботи при еректорному способу проходки?
3. Яке устаткування використовують для монтажу оправи при еректорному способу проходки?
4. Для чого виконується нагнітання за оправу?
5. Як виконується гідроізоляція оправи при еректорному способу проходки?
6. Який основний принцип організації робіт використовується при еректорному способу проходки?
7. Як називається графічне зображення послідовності всіх операцій циклу з урахуванням їх тривалості?

11 КОНСТРУКЦІЯ МЕХАНІЗОВАНИХ ЩИТІВ

Механізовані щити є головною частиною тунелепрохідницького комплексу або TUNNEL BORING MACHINES.

Механізовані щити як частина прохідницького механізованого комплексу виконують усі операції зі спорудження тунелю. Вони оснащені виконавчим робочим органом, за допомогою якого розробляється порода у забої, пристроями з видалення породи за межі щита, а також зведенню оправи. Виконавчий орган розміщено на місці ножового кільця чи всередині нього.

Механізовані щити застосовують для проходки тунелів як малих, так і середніх комунальних, гідротехнічних, перегінних тунелів метрополітенів діаметром 2,5...6 м., діаметром 8,5...9,5 м. для спорудження станційних тунелів метрополітену, а також для проходки залізничних та автодорожніх тунелів діаметром 10...19 м.

Визначальними ознаками механізованих щитів будь-якого діаметра є тип і принцип дії робочих органів, які дуже різноманітні і залежать від міцності та стійкості порід, що розробляються. Через великі відмінності фізико-механічних властивостей скельних та нескельних порід створення щита з виконавчим універсальним органом являє собою складне технічне завдання, яке ще не знайшло задовільного рішення. Тому певний тип механізованого щита може ефективно використовуватись лише у відповідних інженерно-геологічних умовах.

11.1 Класифікація прохідницьких щитів

1. По площі поперечного перерізу:

- малого діаметра розміром до 3,2 м. включно;
- середнього діаметра розміром від 3,2 до 6,0 м. включно;
- великого діаметра розміром більше 6,0 м.

2. По області використання:

- для проходки в нестійких водонасичених ґрунтах з коефіцієнтом міцності $f < 1$;

- для проходки в необводнених сипучих піщаних ґрунтах з коефіцієнтом міцності $f < 1$;

- для проходки в необводнених ґрунтах з коефіцієнтом міцності $f < 1$;

- для проходки в ґрунтах з коефіцієнтом міцності $f > 1$.

3. За формою поперечного перерізу:

- кругова;

- еліптична;

- прямокутна;

- трапецієвидна;

- склепінчаста;

- будь-якій конфігурації, що відповідає обрисові підземної виробки.

4. За ступенем механізації:

- немеханізовані (всі процеси крім пересування щита здійснюються вручну);

- частково механізовані (всі процеси, крім пересувки щита й зведення оправи, здійснюються вручну, ступінь механізації 25-30 %;

- механізовані (ступінь механізації 90-95 %).

5. По типу робочого органу, який розробляє породу:

- безперервної дії;

- періодичної дії.

6. По типу навантажувального механізму:

- безперервної дії;

- періодичної дії.

7. По способу пересування:

- відштовхуються від оправи;

- відштовхуються від розпирного на ґрунті пристрою;

- переміщуються за рахунок почергового висування секцій.

8. За технологією виготовлення й несучої здатності:

- суцільнозварні (малого діаметра);

- збірнозварні (середнього діаметра, масою до 60 т., використовуються при невеликих величинах гірського тиску);

- збірнолиті (середнього й великого діаметрів, масою (120-350) т., використовуються при значних величинах гірського тиску.

Основна перевага механізованих щитів у тому, що процес розробки породи робочим органом виконується неперервно і поєднується за часом з процесом монтажу оправи. Це дозволяє зменшити

технологічні перерви в прохідницькому циклі та забезпечити високі швидкості проходки з мінімальними трудовитратами.

До недоліків механізованих щитів відносяться складність конструкції робочого органу та можливість його використання лише за певного типу порід за міцністю та стійкістю, велика витрата різців, особливо в абразивних породах, високі вартості щитових комплексів (від 500 тис. доларів на 1 м діаметра щита).

Але, незважаючи на це, застосування механізованих щитів у багатьох випадках виправдано, оскільки забезпечується ефективна технологія проходки тунелів у найскладніших інженерно-геологічних умовах з високими швидкостями при забезпеченні охорони праці робітників.

11.2 Щити із планетарним робочим органом

Щити із планетарним робочим органом (рис. 11.1.) використовувалися в основному для будівництва перегінних тунелів метрополітенів.

Робочий орган щита має 2-6 дискових фрез, укріплених на водилі. Водило та диски обертаються в одному напрямку, і різці, встановлені на дисках, здійснюючи складний планетарний рух, сколюють породу. Зруйнована порода ківшами забирається через лотки та конвеєри за межі щита.

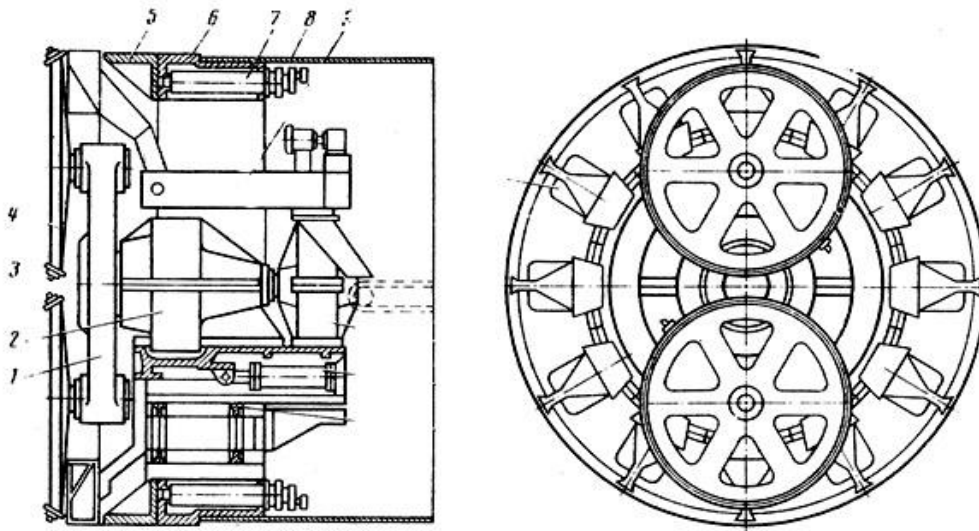


Рис. 11.1. Щит з планетарним робочим органом:

1 – водило, 2 – головний привід, 3 – різець, 4 – дискова фреза, 5 – ножове кільце, 6 – опорне кільце. 7 – щитовий гідроциліндр, 8 – хвостова оболонка щита.

Дані конструкції призначені для будівництва тунелів у сухих і щільних суглинках, глинах, мергелях і глинистих сланцях з коефіцієнтом міцності ґрунту $1 < f < 3$. Нижня межа коефіцієнта міцності визначається необхідністю мати стійкий забій, верхня можливістю стрижневих різців до розробки ґрунтів.

Число дисків звичайно коливається від двох до шести, кількість різців на дисках від шести до вісімнадцяти.

На водилі 1 обертаються дві дискові фрези 4, водило й диски обертаються в протилежних напрямках. Обертання передається від електродвигуна системою передач на зубчасте колесо, що обертає зовнішні диски шестірнями. Траєкторія руху різців - гіпоциклоїдна.

Розроблені ґрунти збираються ківшами, закріпленими на кільці, піднімаються у верхню частину щита й через проріз попадають у лоток і на конвеєр. Забій оконтурюється копір-різцем. Кільце збірної оправи монтується із елементів блокоукладачем під хвостовою частиною щита - оболонкою. Щит переміщується вперед за допомогою щитових гідроциліндрів, які опираються у останнє зібране кільце оправи.

Переваги щитів планетарної дії: однаковий крутний момент для всіх різців і, отже, їх рівномірне зношування; мінімальний крутний момент, що викликає поворот щита навколо його осі; порівняно невеликі енерговитрати на розробку породи.

Нестатками є: складність конструкції та утримання машини; практична неможливість створення великих зусиль подачі на забій; значне пилоутворення через зайве подрібнення породи.

11.3 Щити з роторним робочим органом

Для розробки скельних, напівскельних та твердих глинистих порід у широкому діапазоні за міцністю ($f = 2-6$) застосовують механізовані щити з променевим роторним робочим органом.

Робочий орган оснащений стрижневими різцями, армованими твердими сплавами, для руйнування нескельних та напівскельних порід з f до 4-5 або шарошками для руйнування скельних порід з f до 6-8.

Дані конструкції мають найбільше поширення серед механізованих прохідницьких щитів.

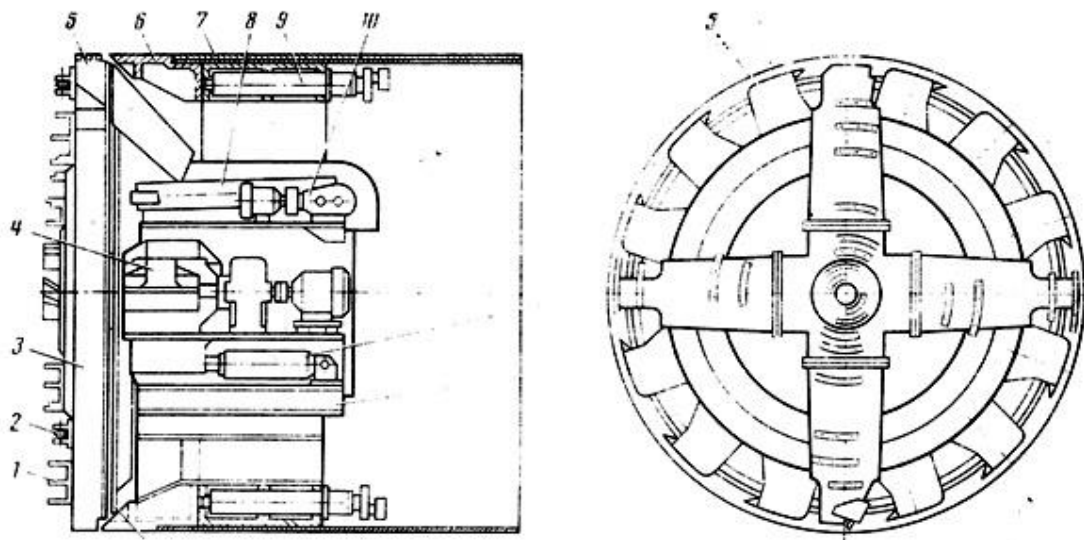


Рис. 11.2. Щит з роторним робочим органом:

1 - різцетримач, 2 - дисковий різець, 3- ротор, 4 - головний привід, 5 - черпак, 6 - ножове кільце, 7 - опорне кільце, 8 - транспортер, 9 - щитовий гідроциліндр, 10 - хвостова оболонка щита.

Ротор обертається на центральному валу зі швидкістю 2,93 об/хв. На його чотирьох променях закріплені різцетримачі 1, на які встановлені різці. Порода у забої руйнується різцями 2. Центральна частина забою руйнується так само різцями, закріпленими на різцетримачах, змонтованих на диску 2. Загальне число різців - 91 шт. Оконтурування забою виконується копіррізцем. На сегментах 2 закріплене дванадцять черпаків 5, призначених для збирання розроблених ґрунтів, які попадають у лоток і на конвеєр.

Елементи збірної оправи монтуються за допомогою блокоукладача. Щит переміщується вперед за допомогою щитових гідроциліндрів 9.

Основні переваги щита такого типу:

- широка область застосування;
- можливість, при необхідності, закриття забою;
- суцільне руйнування ґрунтового масиву по всьому перерізу забою;
- регулювання швидкості обертання й зусиль подачі ротора на забій з метою оптимального режиму розробки ґрунтів;
- відносно високі швидкості проходки тунелів.

Основні недоліки:

- складність конструкції робочого органу;
- велика маса робочого органу;

- труднощі заміни різучого інструменту;
- відносно велика потужність двигунів робочого органу;
- наявність реактивного крутного моменту й напірного зусилля.

11.4 Щити з екскаваторним робочим органом

Щити з екскаваторним робочим органом (рис. 11.3.) використовуються при наявності стійкого забою в ґрунтах з коефіцієнтом міцності $1 < f < 2,5$. Об'єм ківшу може мати обсяг від $0,05 \text{ м}^3$ і більше. Існують щити з одним двома трьома ківшами в залежності від діаметру щита.

Ківші змонтовані на телескопічних стрілах і можуть здійснювати рухи у всіх напрямках.

Зруйновану породу підбирають навантажувачом, передають на щитовий транспортер і видаляють за межі щита. Для руйнування кам'янистих включень у порушених і сильнотріщинуватих напівскельних породах в щитах монтують ударні породоруйнуючі інструменти – навісні гідро молоти з енергією удару до 15 тис. дж.

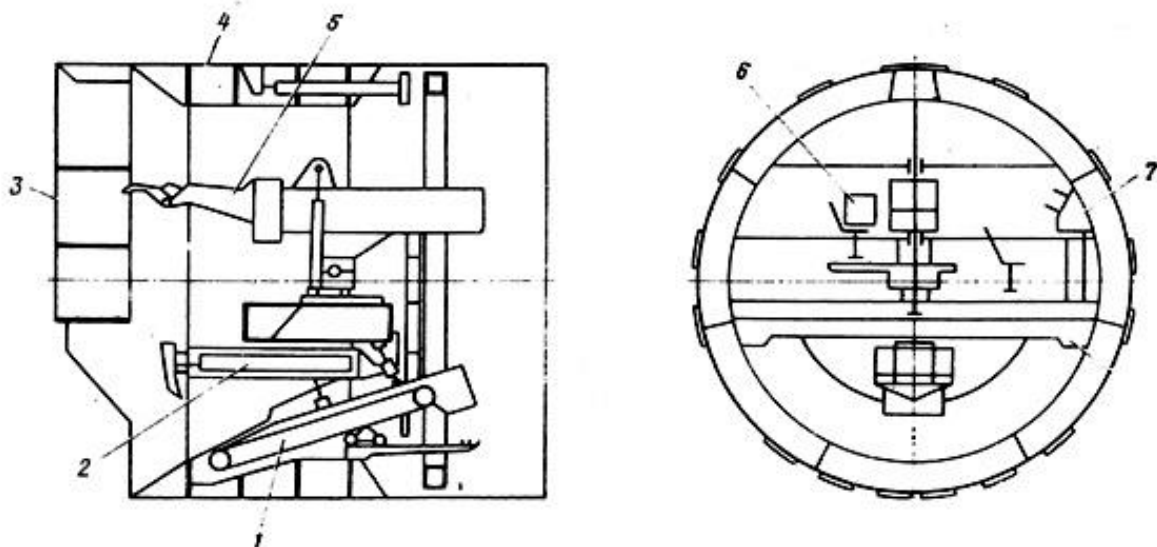


Рис. 11.3. Щит з екскаваторним робочим органом:

- 1 - щитовий транспортер, 2 – навантажувальна машина, 3 – горизонтальні перегородки, 4 – опорне кільце, 5 – екскаваторний орган, 6 – пульт машиніста екскаватора, 7 – пульт машиніста щита.

Основні переваги щита такого типу:

- поперечний переріз щита може бути будь-якої форми;
- можливість проникнення прохідників до забою;
- гарний огляд забою;

- можливість модернізації робочого органу;
- відносна простота конструкції робочого органу.

Основні недоліки:

- обмежена область застосування;
- великі динамічні навантаження, які передаються на конструкцію щита;
- складність керування робочим органом;
- циклічність роботи робочого органу.



Рис. 11.4. Щит з екскаваторним робочим органом

Щит з екскаваторним робочим органом великого діаметру

Використовуються при наявності стійкого забою в ґрунтах з коефіцієнтом міцності $1 < f < 2,5$. Об'єм ківшів може мати величини від $0,05 \text{ м}^3$ і більше.

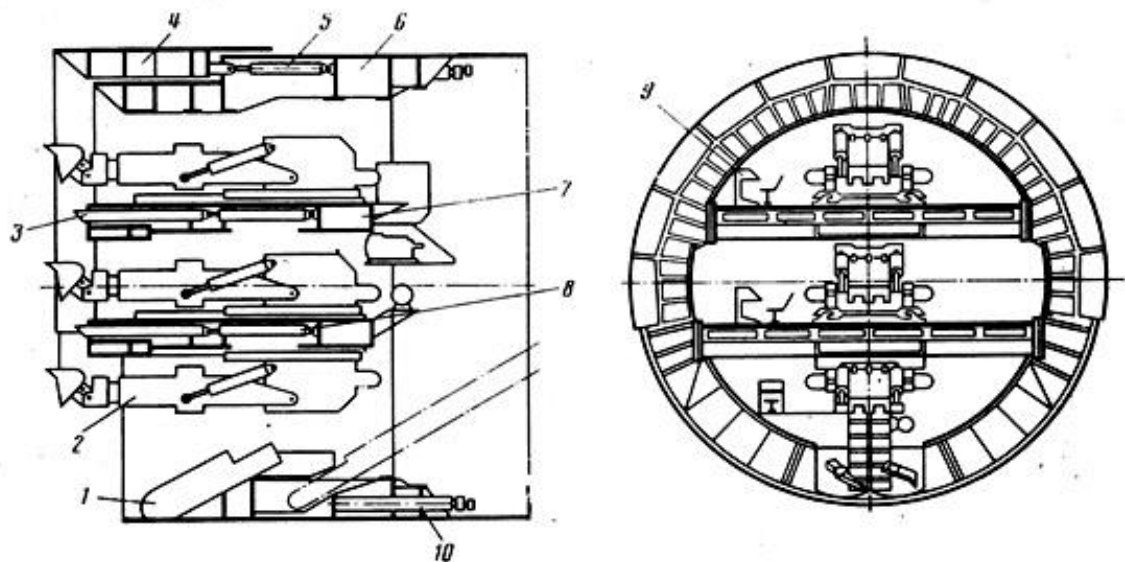


Рис. 11.5. Щит з екскаваторним робочим органом великого діаметру:

1 - навантажувальна машина, 2 – екскаваторний робочий орган, 3 – висувні горизонтальні перегородки, 4 – висувний захисний козирок, 5 – гідроциліндр висувного козирка, 6 – опорне кільце, 7 – пульт машиніста щита, 8 – гідроциліндр висувної перегородки, 9 - пульт машиніста екскаватора, 10 – щитовий гідроциліндр.

Основні переваги щита з екскаваторним робочим органом великого діаметру:

- поперечний переріз щита може бути будь-якої форми;
- можливість проникнення прохідників до забою;
- гарний огляд забою;
- можливість модернізації робочого органу;
- відносна простота конструкції робочого органу.

Основні недоліки:

- обмежена область застосування;
- великі динамічні навантаження, які передаються на конструкцію щита;
- складність керування робочим органом;
- циклічність роботи робочого органу.

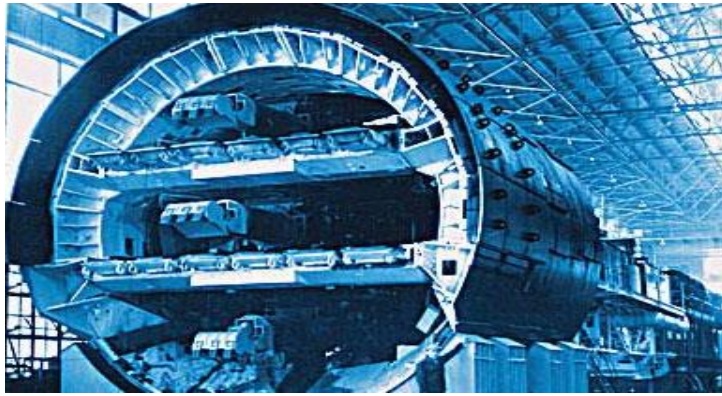


Рис. 11.6. Щит з екскаваторним робочим органом великого діаметру.

11.5 Щит зі стріловим фрезерним робочим органом

У скельних порушених породах, щільних глинах, мергелях, вапняках ($f = 1-3$) застосовують механізовані щити з робочим органом стрілового типу, подібно до тунелепрохідницьких машин виборчої дії. На майданчиках щита змонтовано телескопічні стріли та маніпулятори, оснащені фрезами з різцевими коронками діаметром 600-1000 мм.

Щити мають діаметром від 3 до 5 м. Щити зі стріловим фрезерним робочим органом (рис. 11.7.) використовуються при наявності стійкого забою в ґрунтах з коефіцієнтом міцності i $f < 5$, але у породах з невеликою абразивністю і незакварцованих (глинисті сланці, вапняки).

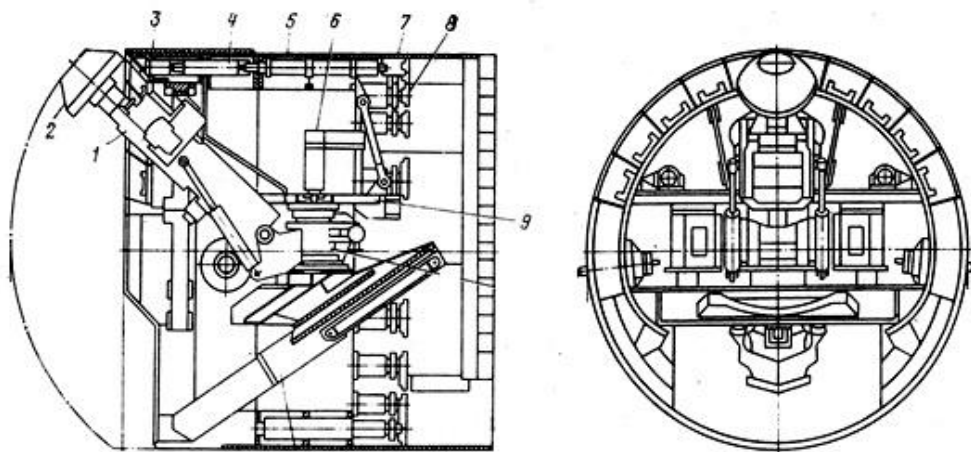


Рис. 11.7. Щит зі стріловим фрезерним робочим органом:

1 - фрезерний робочий орган, 2 – фреза, 3 – висувний козирок, 4 – гідроциліндр, 5 – опорне кільце, 6 – пульт управління, 7 – хвостова оболонка щита, 8 – щитові гідроциліндри, 9 – горизонтальна перегородка.



Рис. 11.8. Щит зі стріловим фрезерним робочим органом

При розробці породи у забої різцеву коронку рухом стрілі-маніпулятора підводять до будь-якої точки забою і руйнують породу при обертанні коронки поступово по всій площі забою.

Переваги щитів стрілового типу з фрезерним робочим органом є:

- розробка будь-якої форми перерізу виробітки;
- зручність обслуговування та заміни різців;
- вільний огляд відкритого забою;
- висока продуктивність при економних витратах енергії.

Недоліки:

- керування щитом вимагає високої кваліфікації машиніста;
- велике пилоутворення при розробці породи (зазвичай використовують пиловловлюючу установку).

11.6 Щити з щелепним робочим органом

Щит з щелепним робочим органом (рис. 11.9.) використовується для слабких супіщаних ґрунтів з глинястими прошарками $f < 1$.

Під ножовим кільцем розташовані три горизонтальні перегородки з висувними платформами, на кожній із них розташовані щелепні механізми для розробки ґрунту по всьому контуру виробки. У нижній частині щита розташована навантажувальна машина, яка передає ґрунт до стрічкового транспортера.

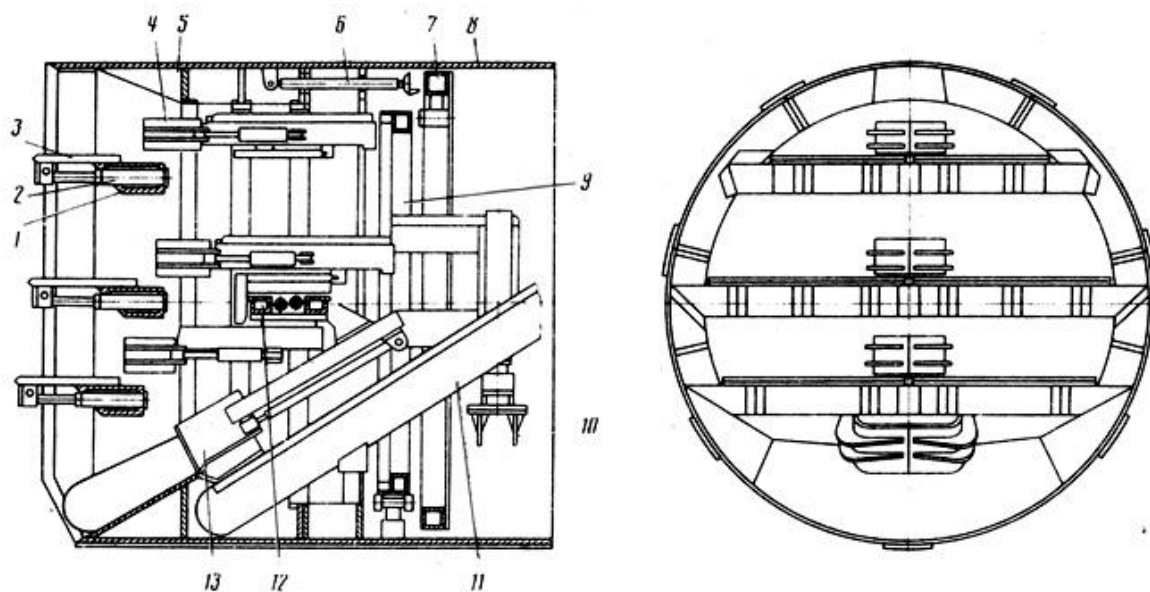


Рис. 11.9. Щит з висувними горизонтальними платформами і щелепними механізмами розробки породи:

- 1 – горизонтальна перегородка, 2 – гідроциліндр, 3 – висувна платформа, 4 – щелепний механізм, 5 – ножове кільце, 6 – гідроциліндр замкового блоку, 7 - ущільнювальне кільце, 8 – хвостова оболонка щита, 9 – блокоукладач, 10 – захват блоків, 11 - скребковий транспортер, 12 – опорна горизонтальна перегородка, 13 – породонавантажувальна машина.

В хвостовій частині щита розташовано блокоукладач тунельної оправи кільцевого типу, який дозволяє одночасно з монтажем оправи переміщувати ґрунт від забою по стрічковому транспортеру до місця накопичення, що дозволяє прискорити проходку тунелю.

Для досягнення високих техніко-економічних показників при щитовій проходці та забезпечення повного використання продуктивності щита необхідно виконати низку умов: максимально механізувати прохідницькі роботи, створити потокову організацію робіт при безперервності операцій, що послідовно виконуються, розробити оптимальне поєднання окремих видів робіт у прохідницькому циклі.

Завдання для самоконтролю

1. У яких випадках застосовують закриті й відкриті способи робіт?

2. Які конструкції тунельних оправ застосовують при закритому способі?
3. У яких умовах застосовуються чавунні тюбінги?
4. Перелічить основні елементи прохідницьких щитів.
5. У чому складається відмінність механізованих прохідницьких щитів від немеханізованих?
6. Які призначення й пристрій укладачів оправи?
7. Які типи навантажувальних машин застосовуються в тунелебудуванні?

12 ТУНЕЛЕПРОХІДНЕЦЬКІ МЕХАНІЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ (ТПМК)

Комплексна механізація спорудження тунелів передбачає паралельну технологію робіт механізованим способом всіх основних виробничих процесів від забою до готової частини оправи тунелю. При цьому швидкість проходки регламентується використовуваною системою робочого органу щита і встановленого на ньому інструменту, решта обладнання підбирається за продуктивністю по відношенню до зазначених. Всі допоміжні роботи виконуються при можливості паралельного їх виконання з основними. Необхідний комплект обладнання для вирішення цієї задачі прийнято називати тунелепрохідницьким комплексом або щитовим механізованим комплексом.

До складу тунелепрохідницького комплексу входять: прохідницький щит, укладальник збірної оправи або обладнання для зведення монолітно-пресованої оправи, технологічна платформа, на якій змонтовані перевантажувальний та стрічковий конвеєри з бункером для завантаження породи у вагонетки, обладнання для нагнітання розчинів за оправу та устаткування для виконання гідроізоляційних робіт.

Механізованими тунелепрохідницькими комплексами споруджують тунелі у досить складних гірничо-геологічних умовах за наявності повної механізації процесів проходки та зведення оправи. В багатьох випадках управління щитами автоматизовано за допомогою бортових комп'ютерів, які забезпечують проходку тунелю в оптимальному режимі.

Під час роботи механізованих тунелепрохідницьких комплексів виконуються такі технологічні операції:

- 1) механізована розробка породи у забої з використанням різних виконавчих робочих органів залежно від гірничо-геологічних умов;
- 2) кріплення забою в нестійких породах різними механізованими та стабілізаційними системами: розсікаючими площадками, шандорами з гідродомкратами, тиксотропним або ґрунтовим привантаженням;

3) видача розробленої породи за межі щитового комплексу та навантаження породи у транспортні засоби із застосуванням навантажувачів, вбудованих у корпус щита, та стрічкових транспортерів;

4) монтаж збірних оправ або укладання монолітно-пресованого бетону за допомогою відповідних механізованих пристроїв (тюбінгоукладальників, пресуючих кілець);

5) автоматизоване ведення щита по лазерному променю з використанням бортових комп'ютерів.

У цьому розділі розглядається лише невелика частина з величезної кількості щитових тунелепрохідницьких комплексів.

12.1 Тунелепрохідницький комплекс з щитом екскаваторного типу

На рис. 12.1 показано тунелепрохідницький комплекс з щитом екскаваторного типу для проходки тунелів середнього діаметру у ґрунтах середньої міцності, які можуть розроблятися екскаваторним робочим органом. При зміні геологічних умов робочий орган екскаваторного типу може замінюватись робочим органом фрезерного типу (рис. 11.7).

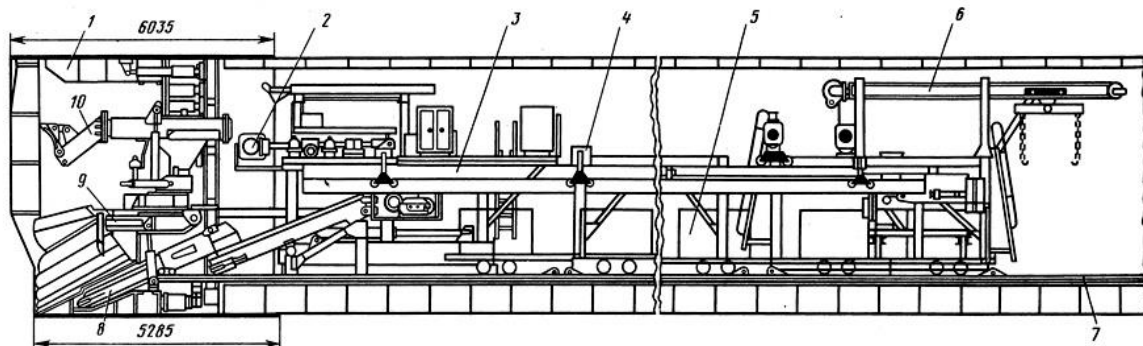


Рис. 12.1. Тунелепрохідницький комплекс з щитом екскаваторного типу:

1 – щит, 2 – блокоукладач, 3 – стрічка транспортера, 4 – пересувні візки, 5 – вагонетка, 6 – візок для нагнітання, 7 – пересувна платформа, 8 – щитовий транспортер, 9 – навантажувальна машина, 10 – екскаваторний робочий орган.

Цикл проходки починається з розробки породи у забої екскаваторним робочим органом 10, який розташовано під ножевим кільцем щита 1. Порода розробляється на глибину заходки, яка дорівнює ширині кільця оправы тунелю. Розроблена порода за

допомогою навантажувача вбудованого у корпус щита потрапляє на стрічку транспортера 3 і по ній подається до вагонеток 5, які відкатують породу до місця перевантаження.

Після збирання усієї розробленої породи і її відкатки щит 1 за допомогою щитових гідроциліндрів (домкратів), які опираються у останнє зібране кільце оправи, пересувається до забою, звільняючи місце під хвостовою оболонкою щита для монтажу чергового кільця оправи.

Монтаж (збирання) кільця оправи виконується за допомогою блокоукладача 2 важільного типу, тому під час монтажу оправи роботи по розробці породи у забої припиняються.

Після закінчення монтажу чергового кільця оправи починається наступний цикл проходки – розробка породи у забої, але паралельно з розробкою ведуться роботи по нагнітання розчину за кільце оправи, яке вийшло з під оболонки щита, за допомогою теліжки 6, та чеканку швів між кільцями оправи і між елементами у кільці.

На рис. 12.2 показано тунелепрохідницький комплекс з щитом екскаваторного типу для проходки тунелів великого діаметру у ґрунтах середньої міцності, які можуть розроблятися екскаваторним робочим органом.

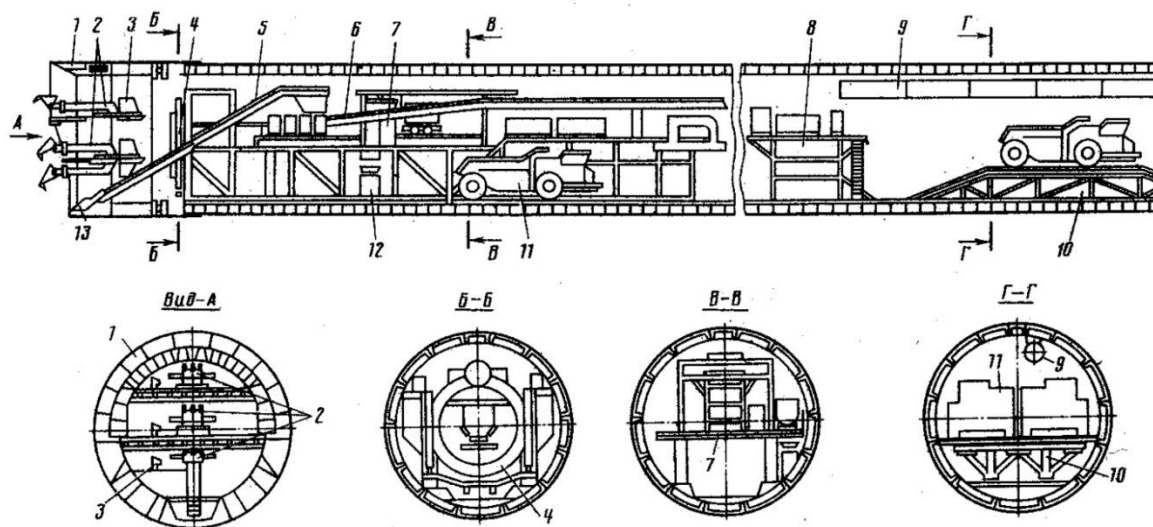


Рис. 12.2. Тунелепрохідницький комплекс з щитом екскаваторного типу:

1 – висувні шандори на щиті, 2 – екскаваторні робочі органи, 3 – пульт управління, 4 – блокоукладач тунельної оправи кільцевого типу, 5 – щитовий транспортер, 6 – стрічка транспортера, 7 – пересувна платформа, 8 – платформа для чеканки швів, 9 – повітропровід, 10 – платформа для роз'їзду, 11 – машина для відкатки породи, 12 – устаткування нагнітання розчину.

Для спорудження залізничних та автодорожніх тунелів великого щити обладнуються декількома екскаваторами.

Цикл проходки починається з розробки породи у забої екскаваторними робочими органами 2, які розташовані під ножевим кільцем щита і зверху прикриті висувними шандорами, які розташовані на щиті. Порода розробляється на глибину заходки, яка дорівнює ширині кільця оправи тунелю. Розроблена порода за допомогою навантажувача вбудованого у корпус щита потрапляє на стрічку щитового транспортера 5 і по ній подається до стрічкового транспортера 6 і у автомашини для відкатки породи у відвали породи, які розташовані у передпортальній виїмці.

Після збирання усієї розробленої породи і її відкатки щит за допомогою щитових гідроциліндрів (домкратів), які опираються у останнє зібране кільце оправи, пересувається до забою звільняючи місце під хвостовою оболонкою щита для монтажу чергового кільця оправи.

Монтаж (збирання) кільця оправи виконується за допомогою блокоукладача 4 кільцевого типу, тому під час монтажу оправи роботи по розробці породи у забої не припиняються що дає змогу збільшити швидкість проходки.

Після закінчення монтажу чергового кільця оправи починається наступний цикл проходки – розробка породи у забої, але паралельно з розробкою ведуться роботи по нагнітання розчину за кільце оправи, яке вийшло з під оболонки щита, за допомогою теліжки 6, та чеканку швів між кільцями оправи і між елементами у кільці.

12.2 Тунелепрохідницький комплекс з щитом роторного типу

Для спорудження тунелів у міцних однорідних ґрунтах з міцністю f менше 3, таких, як сухі глини, мергелі, глинясті сланці, вапняки, використовуються щити з роторним робочим органом.

На рис. 12.3 показано тунелепрохідницький комплекс з щитом роторного типу для проходки тунелів середнього діаметру зі збірними залізобетонними оправами.

Робочий орган щита має різці, які закріплені на чотирьох променях, при оберті яких розробляється порода (рис. 12.3).

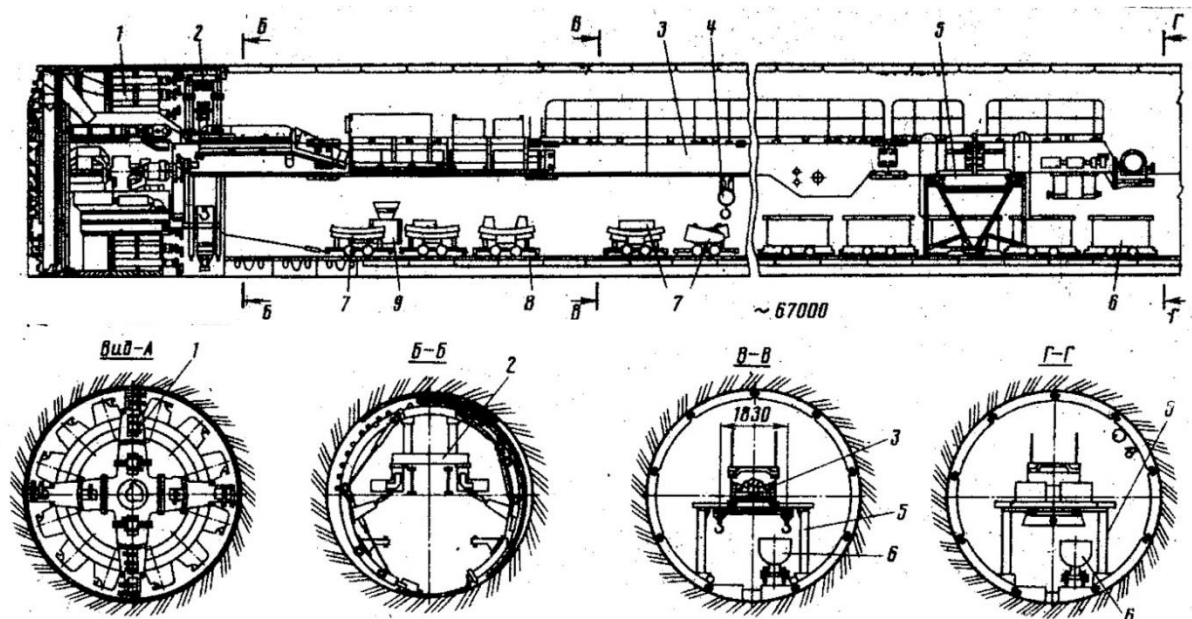


Рис. 12.3. Тунелепрохідницький комплекс з щитом роторного типу:

1 – робочий орган щита, 2 – блокоукладач тунельної оправи, 3 – стрічка транспортера, 4 – тельфер, 5 – платформа, 6 – вагонетка для відкати породи, 7 – візок для подачі блоків, 8 – платформа для чеканки швів, 9 – машина для приготування розчину.

Цикл проходки починається з розробки породи у забої робочими органами 1, який обертається і різцями руйнує породу, яка під дією ваги падає до низу щита, де черпаками підіймається уверх і пересипається у бункер, який направляє її до стрічки транспортера і далі до вагонеток. Порода розробляється на глибину заходки, яка дорівнює ширині кільця оправи тунелю.

Після збирання усієї розробленої породи і її відкати щит за допомогою щитових гідроциліндрів, які опираються у останнє зібране кільце оправи, пересувається до забою звільняючи місце під хвостовою оболонкою щита для монтажу чергового кільця оправи.

Монтаж (збирання) кільця оправи виконується за допомогою блокоукладача 2, тому під час монтажу оправи роботи по розробці породи у забої не припиняються що дає змогу збільшити швидкість проходки.

Після закінчення монтажу чергового кільця оправи починається наступний цикл проходки – розробка породи у забої, але паралельно з розробкою ведуться роботи по нагнітання розчину за кільце оправи, яке вийшло з під оболонки щита, за допомогою платформи 5, та чеканку швів між кільцями оправи і між елементами у кільці.

12.3 Тунелепрохідницький комплекс з щитом щелепного типу для спорудження монолітно-пресованої бетонної оправи

Для спорудження тунелів у міцних однорідних ґрунтах з f менше 3, таких, як сухі глини, мергелі, глинясті сланці, вапняки використовуються щити з робочим органом щелепного типу для спорудження монолітно-пресованої бетонної оправи (рис. 12.4).

Цикл проходки починається з розробки породи у забої робочими органами 2 щелепного типу, що розташовані під ножовим кільцем щита на висувних платформах, які розташовані на щиті. Порода розробляється на глибину заходки, яка дорівнює ширині кільця оправи тунелю. Розроблена порода за допомогою навантажувача 3, вбудованого у корпус щита, потрапляє на стрічку щитового транспортера і по ній подається до накопичувального бункера 1, а потім у вагонетки.

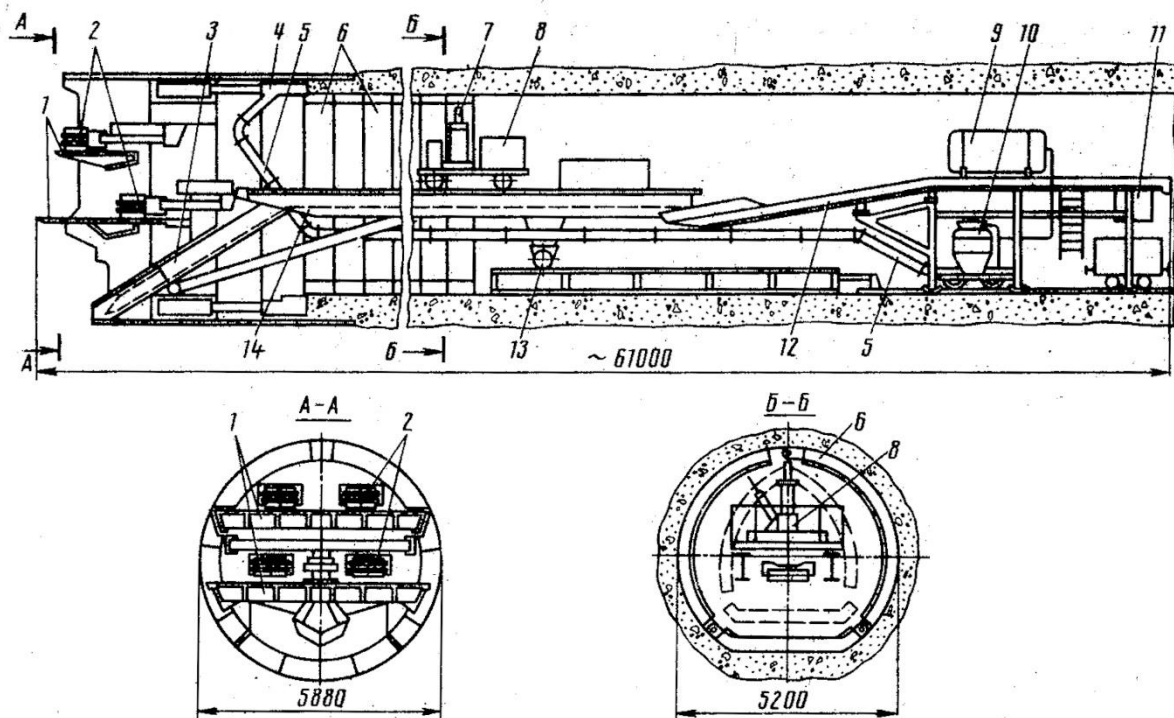


Рис. 12.4. Тунелепрохідницький комплекс з щитом щелепного типу:

1 – висувні платформи, 2 - робочий орган щита щелепного типу, 3 – породонавантажувальна машина, 4 – пресувальне кільце, 5 – бетоновід, 6 – секція пересувної опалубки, 7 – гідроциліндр пересувної опалубки, 8 – пристрій для перестановки опалубки, 10 – пневматичний бетоноукладач, 11 – накопичувальний бункер, 12 – стрічковий транспортер, 13 – опора стрічкового транспортера.

Після збирання усієї розробленої породи і її відкатки щит за допомогою щитових гідроциліндрів (домкратів), які опираються у пресуюче кільце 4, пересувається до забою, ущільнюючи розчин бетону між хвостовою оболонкою щита і пересувною опалубкою, оболонка щита пересувається у перед разом з щитом, розчин заповнює простір між породою і опалубкою.

Монтаж чергової секції пересувної опалубки виконується за допомогою перестановника опалубки. Паралельно з розробкою породи, пневматичний бетоноукладач заповнює простір між опалубкою і хвостовою частиною щита, і цикл повторюється.

Перевагами монолітно-пресованої оправи є:

- відсутність стиків між блоками і кільцями збірної оправи і необхідність виконувати чеканку швів;
- міцний контакт бетону оправи і породи і відпадає необхідність виконувати нагнітання за оправу;
- ущільнення бетону оправи при пересуванні щита, що зменшує водопроникність бетону оправи.

Останнім часом розроблені технології, які дозволяють застосовувати армування монолітно-пресованої оправи.

Завдання для самоконтролю

1. У яких випадках застосовують закриті й відкриті способи робіт?
2. Які конструкції тунельних оправ застосовують при закритому способі?
3. У яких умовах застосовуються чавунні тюбінги?
4. Перелічить основні елементи прохідницьких щитів.
5. У чому складається відмінність механізованих прохідницьких щитів від немеханізованих?
6. Які призначення й пристрій укладачів оправи?
7. Які типи навантажувальних машин застосовуються в тунелебудуванні?

13 УСТАТКУВАННЯ МЕХАНІЗОВАНОГО ТУНЕЛЕПРОХІДНИЦЬКОГО КОМПЛЕКСУ

ВСТУП

Деякі основні види робочого устаткування, яке застосовується на механізованих прохідницьких комплексах, мають визначені особливості, що обумовлюються необхідністю виконання різного виду процесів при спорудженні тунелів.

13.1 Розробка породи

Розробку породи у забої проводять у механізованих щитах виконавчим породоруйнівним органом – робочим органом, який знаходиться на місці ножового кільця і оснащений інструментом який руйнує породу.

Ефективність виконавчого органу прохідницького щита багато в чому залежить від правильного підбору типу інструменту та його якості.

Інструмент, який руйнує породу поділяється на три групи:

- пластинчасті різці, для руйнування слабких ґрунтів (глини, супіски, піски, лес) з коефіцієнтом міцності $0,5 < f < 1,2$;
- стрижневі різці, для руйнування не абразивних слабких й середньої міцності ґрунтів з коефіцієнтом міцності $1,2 < f < 5$;
- шарошечний інструмент, для руйнування ґрунтів середньої міцності й міцних с коефіцієнтом міцності $f \geq 5$.

Багато різних типів різцевого інструменту з різними наплавками та характеристиками застосовуються на прохідницьких щитах у світовій практиці.

Для руйнування не абразивних слабких і середньої міцності порід ($1,2 < f < 5$), застосовуються стрижневі різці (рис.13.3), які розміщуються на робочому органі щита (рис. 13.1).



Рис. 13.1. Робочий орган щита роторного типу, оснащений стрижневими різцями



Рис.13.2. Стрижневі різці закріплені на робочому орані щита

На рис. 13.3 представлена конструкція різних видів стрижневих різців.

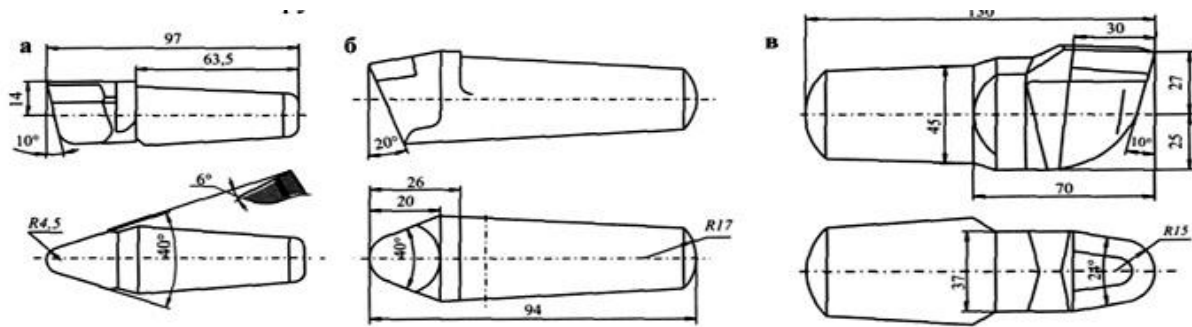


Рис. 13.3. Види стрижневих різців

Для руйнування міцних порід ($f = 1,5 - 12,0$), застосовуються дискові різці рис.13.5, які розміщуються на робочому органі щита (рис. 13.2).

На рис. 13.4. показано робочий орган щита оснащений різцями різного виду.



Рис.13.4. Робочий орган щита оснащений різцями дискового типу.

Для руйнування порід середньої міцності, міцних застосовується шарошечний інструмент (рис. 13.5.). Шарошки бувають зубчасті, штирові та дискові з різною геометрією та схемами розміщення на виконавчому органі (рис. 13.5).

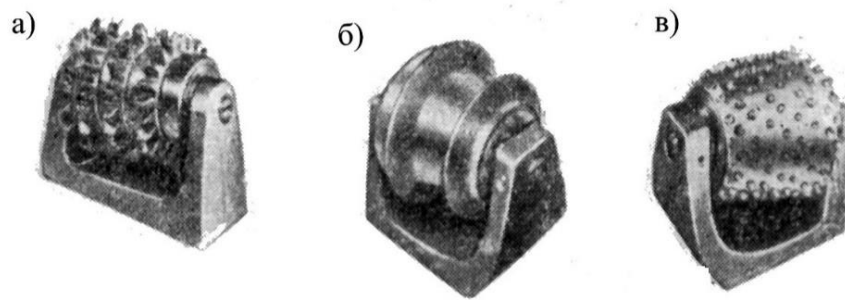


Рис. 13.5. Шарошки: а – зубчасті, б – дискові, в – штирові.

Дискові шарошки створюють більше руйнівне зусилля, ніж стрижневі різці, оскільки з породою одночасно контактує менша довжина ріжучої кромки дискової шарошки. І так як загальна довжина ріжучої кромки дискової шарошки більша ніж довжина контакту з породою, термін її служби в кілька разів більший за термін стрижневих різців.

Діаметр дискових шарошок від 200 до 400 мм, кут загострення леза від 30 до 60 градусів, радіус закруглення леза від 1 до 3 мм в залежності від породи, що розробляється.

Шарошки бувають однодискові та багатодискові. Багатодискові можуть бути цільними з жорстко пов'язаними між собою дисками, а можуть бути складовими з дисками, що обертаються незалежно один від одного.

На рис. 13.6. наведені види дискових шарошок різних виробників.

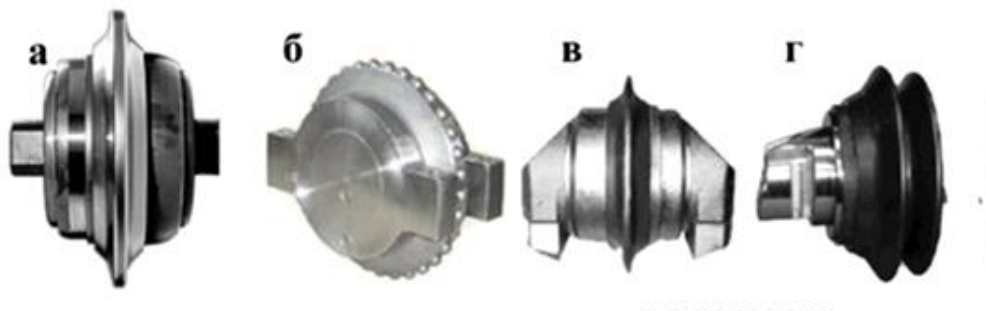


Рис. 13.6. Види дискових шарошок: а – Herrenknecht, б, в, г – Wirth.

На рис. 13.4. робочий орган щита роторного типу для розробки міцних порід, оснащений шарошками дискового виду.



Рис. 13.4. Робочий орган щита роторного типу для розробки міцних порід



Рис. 13.7. Схеми розташування ріжучого інструменту на робочих органах щитів: а, б – шарошки дискового типу, в – стрижневі різці

13.2 Навантаження і відкатка породи

Навантаження породи при роботі механізованих щитів виконується одночасно з її розробкою завдяки конструкції робочих органів.

Прохідницькі щити обладнуються механізмами, що забезпечують відбір розробленої у забої породи та навантаження її на транспортери або безпосередньо у вагонетки. У механізованих щитах вантажні

органи виконують у вигляді різних конструкцій роторних вантажників, що нагрібають, шнекових механізмів або пластинчастих скребків.

У щитах з роторним робочим органом навантаження породи на стрічку транспортера (рис. 13.7.) здійснюють безпосередньо обертовим ротором, усередині якого є черпаки, що подають породу по направляючих на стрічку транспортера. В середину ротора розроблена порода потрапляє через вікна в його лобовій частині, вирізані ззаду породоруйнівного інструменту, а в нижній частині забою захоплюється скребками і вантажиться на стрічку транспортеру, по якій переміщується до накопичувального бункера, а потім на поверхню.



Рис. 13.7. Стрічковий транспортер

У низці конструкцій щитів зі стріловим виконавчим органом знаходять застосування шнекові вантажні органи (рис. 13.8.) або органи з лапами, що нагрібають.

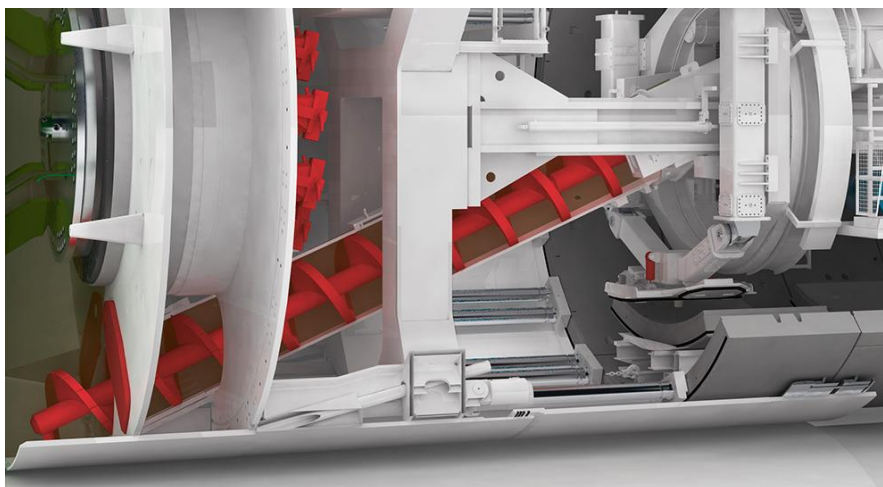


Рис. 13.8. Шнековий транспортер

Останні виконують в основному двох типів – з двома лапами, кожна з яких закріплена на консольній осі, ексцентрично розташованої щодо центру обертання, або у вигляді рами, що здійснює зворотно-поступальний рух, з двома шарнірами, навколо яких примусово повертаються лапи. В обох випадках вантажні органи встановлюються у ножовій частині щита під кутом до горизонту. Шнеки чи лапи переміщують породу на стрічку транспортера.

13.3 Монтаж тунельної оправи

При щитовому способі проходки оправа тунелів виконується збіркою з чавунних тюбінгів та залізобетонних тюбінгів чи блоків. Монтаж збірних оправ роблять за допомогою спеціальних укладальних машин – тюбинго- та блокоукладачів, які розміщені безпосередньо на щиті або на спеціальному візку і мають електричний, пневматичний або комбінований привід.

За принципом дії розрізняють укладальники важільного, кільцевого, дугового, касетного та конвеєрного типів. Найбільшого поширення в тунелебудуванні набули укладачі важільного та кільцевого типів. Важільні укладачі переважно застосовують з немеханізованими щитами, а кільцеві укладачі входять до складу прохідницьких комплексів механізованих щитів. Укладачі цих типів

дозволяють виконувати монтаж як чавунних тюбінгів, так і блоків залізобетонних оправ.

Види блокоукладачів для монтажу тунельних оправ.

Укладачі важільного типу складаються з телескопічного важеля з висувною штангою, який змонтований на рамі або на опорному кільці щита та може повертатися навколо центральної осі щита (рис. 13.9).

На висувній штанзі є захоплення для кріплення до тюбінг або блоку, а на іншому кінці важеля – противага. Монтаж оправи виконують знизу вгору. Черговий тюбінг або блок закріплюють на висувній штанзі, піднімають нагору і обертанням важеля переміщують його до місця укладання. Потім висувають штангу в радіальному напрямку та встановлюють тюбінг (блок) на місце.

При використанні важільного блокоукладача, під час монтажу оправи роботи по розробці породи не виконуються.

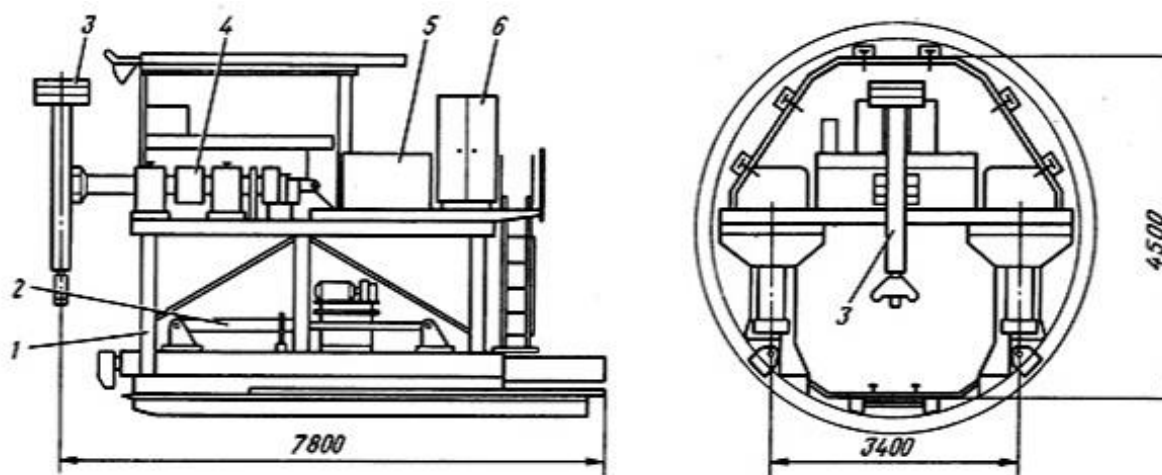


Рис. 13.9. Блокоукладач важільного типу:

1 – візок блокоукладача, 2 – тяги для пересування, 3 – важіль, 4 – привід обертання важеля, 5 – гідро устаткування, 6 – електрощитова.

Елементи оправи укладають поперемінно та симетрично з обох боків до половини кільця. Тюбінги зболчують між собою, а блоки з'єднують за допомогою фіксуючих шпильок. При укладанні блоків верхньої половини кільця підтримують їх балки з упорами, змонтовані на опорній рамі укладача. Перевага важільних укладачів полягає у простоті конструкції та надійності в роботі, а недолік – у неможливості поєднання монтажних та вантажно-транспортних робіт.

Кільцеві укладачі мають перевагу перед важільними у можливості поєднання робіт монтажу кільця оправи та транспортування породи від забою щита. Робочий орган укладача кільце, через яке пропущений стрічковий транспортер, який обертається на коткових опорах, закріплених на рамі укладача (рис.13.10). До торця кільця прикріплений механізм висування, що складається із двох паралельних штанг, на яких навішена траверса із захопленням. Штанги висуваються за допомогою гідроциліндрів.

При використанні кільцевого блокоукладача, під час монтажу оправи роботи по розробці породи виконуються.

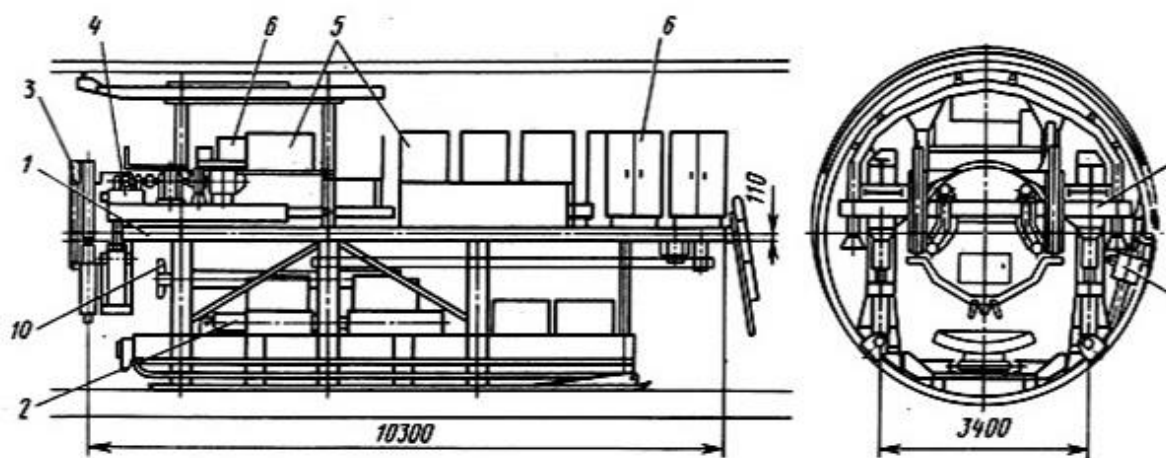


Рис. 13.10. Блокоукладач кільцевого типу:

1 – візок блокоукладача, 2 – тяги для пересування, 3 – важіль, 4 – привід обертання важеля, 5 – гідроустаткування, 6 – електрощитова, 7 – висувні платформи, 8 – висувна арка, 9 – висувні балки.

Кільцеві укладачі встановлюють як на окремих візках, так і на щиті. У цьому випадку укладальник монтує до опорного кільця щита, в якому є порожнистий вал для розміщення транспортера.

Укладачі дугового типу застосовують для монтажу оправи переважно з великих залізобетонних блоків. Укладач являє собою напрямну дугу з роликів, розміщену в межах хвостової оболонки щита на візку чи опорному кільці щита (рис. 13.11). За допомогою лебідок та канатів блоки по чергові затягують по хвостовій оболонці на напрямну дугу і переміщують по ній у потрібне положення, де закріплюють висувними фіксаторами.

Встановлення блоків у проектне положення по контуру кільця виконується допоміжними радіальними гідроциліндрами. Укладання

блоків починається зверху. Дугові укладачі дозволяють монтувати важкі блоки масою до 5 т і дають можливість поєднувати укладання оправи з розробкою породи та транспортуванням її за межі щита.

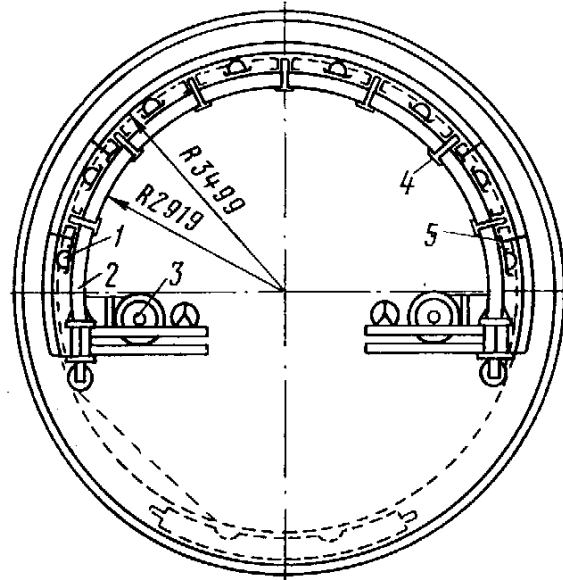


Рис. 13.11. Дуговий укладальник, розташований на щиті: 1 – ролики; 2 – дуга; 3 – лебідки; 4 – радіальні гідроциліндри; 5 – фіксатори

Завдання для самоконтролю

1. У яких випадках застосовують закриті й відкриті способи робіт?
2. Які конструкції тунельних оправ застосовують при закритому способі?
3. У яких умовах застосовуються чавунні тюбінги?
4. Перелічите основні елементи прохідницьких щитів.
5. У чому складається відмінність механізованих прохідницьких щитів від немеханізованих?
6. Які призначення й пристрій укладачів оправи?
7. Які типи навантажувальних машин застосовуються в тунелебудуванні?

14 ПІДГОТОВЧІ РОБОТИ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ТУНЕЛІВ ЩИТОВИМ СПОСОБОМ

Будівництво транспортних тунелів, нових ліній метрополітену розпочинають, як правило, із створення будівельних майданчиків. Це дозволяє до початку основних будівельно-монтажних робіт забезпечити об'єкт тимчасовими комунікаціями (дороги, енерго- та водопостачання тощо), санітарно-побутовими та виробничими приміщеннями, змонтувати механізовані установки, необхідні для роботи шахтного стовбура.

Розташовують будівельні майданчики поблизу траси у передпортальній виїмці при відкритому способі робіт рис. 14.1., або біля стовбура шахти рис. 14.2. при закритому способі робіт.



Рис. 14.1. Тунелепрохідницький комплекс на будівельному майданчику у передпортальній виїмці.

На будівельному майданчику для будівництва тунелів закритим способом зводять (як правило, до проходження шахтного стовбура)

комплекс будівель та споруд, необхідних для забезпечення нормальної роботи гірничого комплексу.



Рис. 14.2. Шахтний стовбур на будівельному майданчику

На рис. 14.2. показано шахтний стовбур при будівництві метрополітену, який має діаметр перегінного тунелю метрополітену і зібраний із чавунних тюбінгів. Шахтний стовбур, такого діаметру, не дозволяє опускати під землю устаткування великого розміру.

У минули часи при спорудженні тунелів немеханізованими щитами, які мали невеликий розмір, підготовчі роботи при щитовій проходці включали спорудження монтажних камер, доставку щитового обладнання в розібраному вигляді та монтаж щита у монтажній камері (рис. 14.3).

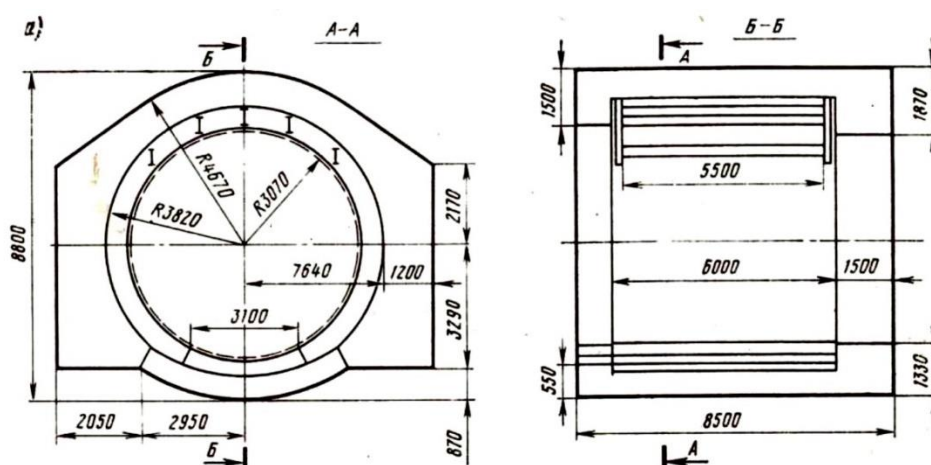


Рис. 14.3. Схема монтажної камери

Монтажні камери розміщувалися на трасі тунелю, що споруджується так, щоб була можливість їх повторного використання для монтажу щита протилежного напрямку або для демонтажу щита, що закінчив проходку. За конструкцією камери поділяються на два типи: з монолітного бетону, споруджувані одним з гірських способів в залежності від геологічних умов, і з чавунних та залізобетонних тубінгів оправи кругового контуру.

Внутрішні габарити камери обумовлені розмірами щита, що монтується, та вимогами розміщення підйомних та монтажних пристроїв.

Висота і ширина камери визначається діаметром щита та зазорами: між щитом і склепінням камери в межах 0,5-0,75 м. та з боків щита 0,75-0,8 м. Довжина камери 6-8,5 м. Для монтажу щитів камери обладнають підйомними механізмами – лебідками вантажопідйомністю 3-5 т. та талями. У склепінні камери для переміщення блоку та талій закріплюють поздовжні балки. У лотку камери влаштовують бетонну подушку із забетонованими напрямними рейками.

Зазвичай на монтажні роботи та випробування щита витрачають 1-2 місяці. Після закінчення монтажу щита та монтажу обладнання щита вводять у забій. Для пересування щита з камери використовують нижні щитові домкрати (гідроциліндри), упором для яких використовують тубінги оправи, що укладаються в лотковій частині камери.

У даний час, коли тунелепрохідницькі механізовані комплекси мають великий розмір, як у діаметрі до 20 метрів, так і у довжину десятки метрів, використання монтажних камер обмежено, а спосіб монтажу таких щитів залежить від умов будівництва і може бути: у котловані (рис. 14.4, 14.5.) або опускання частин щита через шахтний стовбур (рис. 14.6.), або у зібраному виді (рис. 14.7).

При будівництві гірських тунелів у передпортальній виїмці (рис. 14.1., 14.9).



Рис. 14.4. Монтаж щита у котловані (місце введення)



Рис. 14.5. Монтаж щита у котловані (вид з поверхні)



Рис. 14.6. Монтаж щита через шахтний стовбур

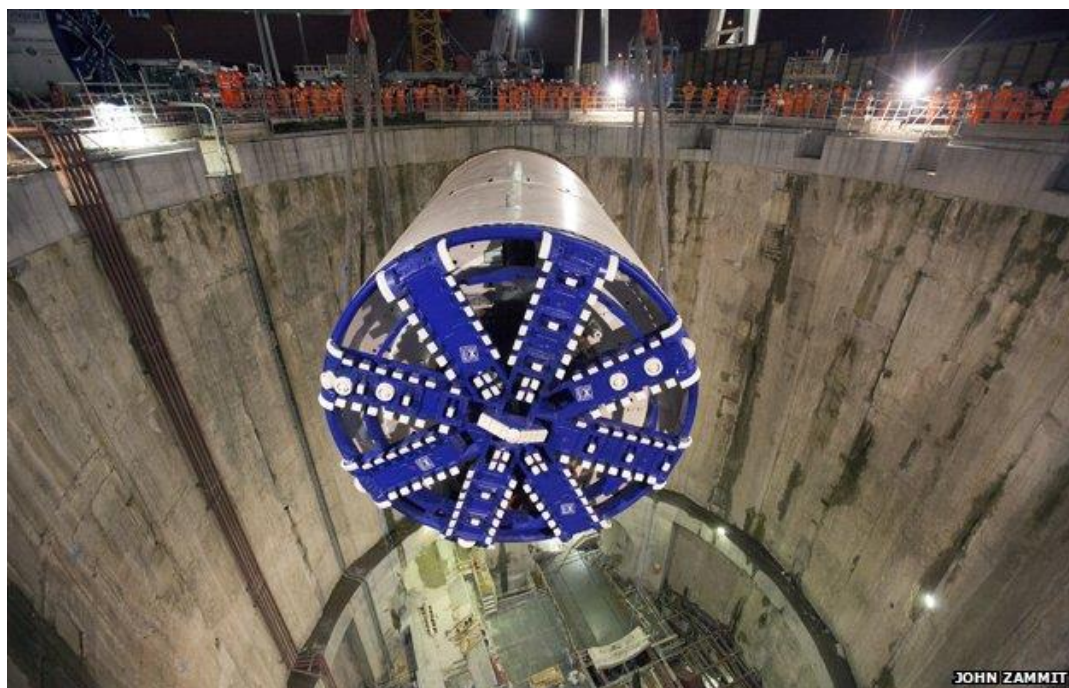


Рис. 14.7. Опускання щита у шахтний стовбур (вид з поверхні)



Рис. 14.8. Шахтний стовбур великого діаметру на будівельному майданчику у міських умовах.

Будмайданчики гірських тунелів влаштовують зазвичай поблизу порталу тунелю. Загальна корисна площа будмайданчиків у гірських умовах коливається залежно від необхідної кількості будівель та споруд та рельєфу місцевості. На майданчику крім місця збирання щитового комплексу розміщуються побутові та виробничі споруди, необхідні в процесі спорудження тунелю: вентиляційна будівля, бетонний завод, опалубні та арматурні майстерні, склади обладнання, матеріалів та елементів оправи, механічні майстерні, кузня, котельня, компресорна, електропідстанція, депо відстою та ремонту електровозів, склади лісоматеріалів, гараж та склади паливно-мастильних матеріалів, а також адміністративно-побутовий комбінат, їдальня та, за необхідності, гуртожиток.

На будівельному майданчику у міських умовах нема необхідності у гуртожитку, їдальні, бетонному заводі та інших будівлях (рис. 14.6.) і його площа обмежується міськими умовами.

Крім того, на будмайданчику обов'язково влаштування очисних споруд. Будмайданчик оснащується комунікаціями тепло- та

водопостачання, побутовою та виробничою каналізацією, комунікаціями електропостачання, електроосвітлення та зв'язку.



Рис. 14.9. Монтаж щитового комплексу у передпортальній виїмці

Завдання для самоконтролю

1. У яких випадках застосовують закриті й відкриті способи робіт?
2. Які конструкції тунельних оправ застосовують при закритому способі?
3. У яких умовах застосовуються чавунні тюбінги?
4. Перелічить основні елементи прохідницьких щитів.
5. У чому складається відмінність механізованих прохідницьких щитів від немеханізованих?
6. Які призначення й пристрій укладачів оправи?
7. Які типи навантажувальних машин застосовуються в тунелебудуванні?

15 ТУНЕЛЕПРОХІДНИЦЬКІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ СЛАБКИХ І ЗМІШАНИХ ГРУНТІВ

В останнє десятиліття зарубіжними компаніями створено значне число нових високопродуктивних механізованих прохідницьких щитових комплексів з різними типами виконавчих органів для будівництва тунелів в різних інженерно-геологічних умовах.



Рис.15.1. Щит фірми Herrenknecht при будівництві метро у м. Київ

Визнаними лідерами в області створення тунелепрохідницької техніки є компанії "Herrenknecht", "Wirth" (Німеччина); "LOVAT" (Канада); "Robbins" (США). "Мицубісі", "Ишикавадзима-Харима", "Кавасакі" і "Хітачі" (Японія).

15.1 Тунелепрохідницькі комплекси для слабких ґрунтів

Щити з активним привантаженням забою. При будівництві тунелів в слабких нестійких ґрунтах, робочий орган щита герметизують, відділяють перегородкою (діафрагмою), і створюють тиск, який утримує забій за допомогою стиснутого повітря, рідини, або ґрунту, насиченого тиксотропним розчином під тиском.

Для м'яких, зв'язних ґрунтів рекомендується використовувати тунелепрохідницькі щити із ґрунтопривантаженням забою.

На рис. 15.2. показан щит компанії "Herrenknecht" для проходки тунелів у слабких породах з ґрунтопривантаженням забою.

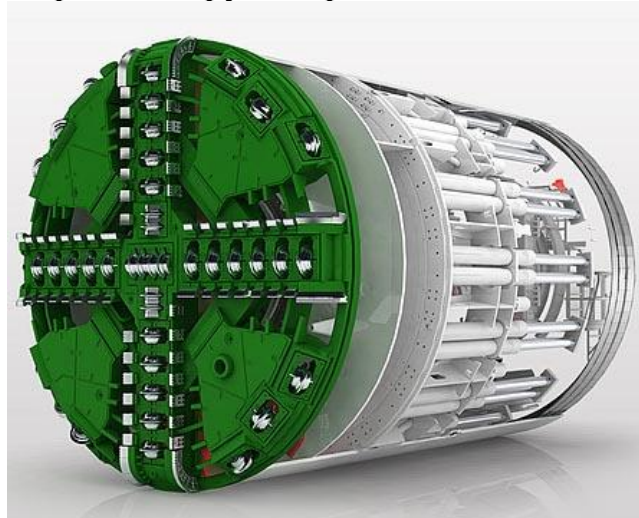


Рис. 15.2. Загальний вигляд щита EPB (Earth Pressure Balance) Schild німецької фірми «Herrenknecht»

У прохідницьких щитах із ґрунтопривантаженням (EPB - Earth Pressure Balance) розроблений ґрунт подрібнюють в однорідну масу, яка використовується для ґрунтопривантаження, що дозволяє компенсувати тиск породи в забої, уникнути неконтрольованого проникнення ґрунту в щит й створити умови для швидкої проходки з мінімальним осіданням порід на денній поверхні.

Особливістю прохідницьких щитів із ґрунтопривантаженням є те, що в них використовується розроблений ґрунт для створення привантаження. Цей метод є пріоритетним у зв'язних ґрунтах з високим змістом глини й мулу й низкою водопроникністю.

На рис. 15.3. показана схема роботи ґрунтопривантаження забою.

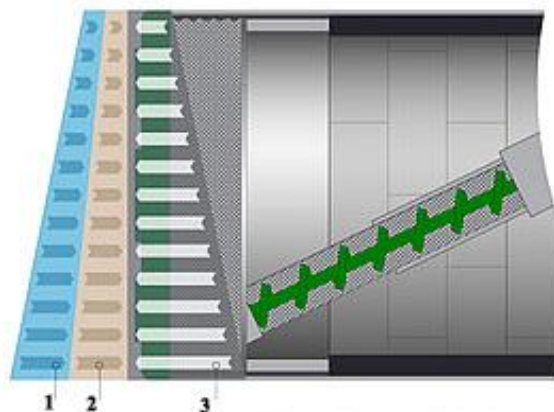


Рис. 15.3. Схема роботи ґрунтопривантаження забою:
1 – гідростатичний тиск, 2 – тиск ґрунту, 3 – тиск ґрунтопривантаження

Робочий орган оснащений різальним інструментом (залежно від геологічних умов, наприклад, різцями, шарошками тощо), притискається до забою й розробляє ґрунт. Ґрунт надходить у призабійну камеру через технологічні отвори, де переміщується із вже наявною там ґрунтовою пастою. Ребра на робочому органі й герметичній перегородці змішують ґрунтову масу, поки вона не досягне необхідної консистенції. Герметична перегородка передає тиск щитових гідроциліндрів на податливу ґрунтову масу, тиск контролюється за допомогою датчиків. Коли тиск ґрунтової маси в призабійній камері зрівнюється з тиском навколишньої породи й ґрунтових вод, досягається необхідний баланс.

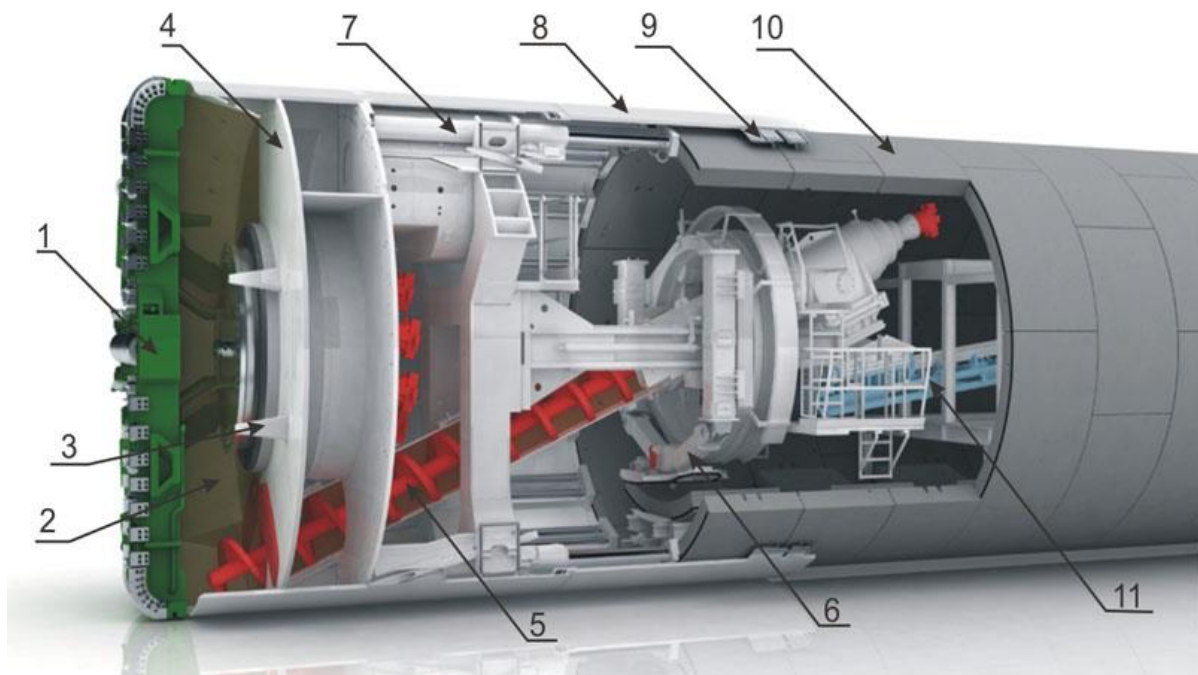


Рис. 15. 4. EPB (Earth Pressure Balance) Schild німецької фірми «Herrenknecht»

1 - робочий орган 2 - призабійна камера. 3 - мішалки. 4 – перегородка. 5 - шнековий конвеєр. 6 – блокоукладальник. 7 - гідравлічні циліндри. 8 – оболонка щита - хвостова частина щита. 9 – хвостовик. 10 - оправа тунелю. 11 - стрічковий транспортер.

Робочий орган 1 обертається і розробляє породу, яка потрапляє у призабійну камеру 2, у якій пластична маса ґрунту передає необхідний тиск привантаження на забій. Мішалки 3 на робочому органі й перегородці змішують ґрунт у призабійній камері, перегородка 4 не дає ґрунту потрапляти до щита. Шнековий конвеєр 5 переміщує розроблений ґрунт на стрічковий транспортер 11, яким ґрунт

передається від забою до місця навантаження. Тиск у шнековому конвеєрі, такий як і у призабійній камері. Після пересування робочого органу на ширину кільця оправи під оболонкою щита 8 (хвостовою частиною) за допомогою блокоукладальника 6, маніпулятора з дистанційним керуванням, виконується монтаж кільця оправи із елементів - блоків. Після монтажу кільця оправи гідравлічні циліндри 7, що розташовані під щитом, переміщують робочий орган уперед і цикл розробки ґрунту повторюється. Хвостовик 9, в якому щіткові ущільнення закривають зазор між внутрішньою частиною хвостовика установки й зовнішньою частиною оправи, яка вже зібрана не дозволяє породі потрапляти до щита.

На рис. 15.5. показано зібраний щит ЕРВ (Earth Pressure Balance) з ґрунтопривантаженням забою на будівельному майданчику.



Рис. 15. 5. ЕРВ (Earth Pressure Balance) Schild німецької фірми «Herrenknecht» на будівельному майданчику.

15.2 Тунелепрохідницькі комплекси для неоднорідних ґрунтів

У більшості випадків будівництва тунелів великої довжини, гірські породи, які перетинає тунель, змінюються. У таких випадках при будівництві тунелів гірничим способом, на окремих ділянках змінюється технологія проходки, але при невеликому водопритокі до виробки. При будівництві щитовим способом зміна щита, при зміні геологічних умов неможлива, тому технологія "Миксщит" запропонована компанією Херренкнехт може бути прийнята як альтернатива гірничим способам.

Технологія "Миксщит" (Mixshield) Herrenknecht спеціально призначена для безпечної й ефективної проходки в неоднорідних ґрунтах.

Розроблена в компанії "Херренкнехт" технологія "Миксщит" (рис.15.6) має ряд переваг у порівнянні із традиційною технологією гідропривантаження. Тиск привантаження в призабійній камері точно регулюється за допомогою автоматично контрольованої повітряної подушки. Це означає, що стабільність проходки в неоднорідних ґрунтах і при тиску води понад 15 бар (1,5 МПа) може безпечно підтримуватися навіть при дуже великих діаметрах виробок.

Призабійна камера у вигляді простору безпосередньо за робочим органом розділена перегородкою. Передня секція призабійної камери повністю заповнена суспензією для забезпечення привантаження забою в процесі проходки тунелю. У задній секції між перегородкою й герметичною перемичкою (робоча камера) обсяг суспензії досягає рівня горизонтального діаметру установки. Необхідний на забій додатковий тиск досягається за допомогою стиску повітряної подушки у верхній частині задньої секції. Зв'язок між двома секціями у призабійній камері здійснюється через отвір у нижній частині перегородки.

Повністю автоматизовані системи керування постійно контролюють величину тиску в робочій камері й забезпечують значно більш точне регулювання тиску, чим у звичайних системах з однією камерою. Відділення секції із циркулюючою суспензією від секції привантаження на забій забезпечує більшу універсальність і безпеку в процесі проходки тунелю. Завдяки можливості безпосереднього реагування за допомогою повітряної подушки навіть невеликі коливання тиску й обсягу в неоднорідних ґрунтах можуть точно

контролюватися. Все це забезпечує кращий контроль за зрушенням і осіданням ґрунту, який варто уникати, особливо при роботі в умовах малого перекриття.

На рис. 15.6 показано загальний вигляд щита компанії "Herrenknecht" для проходки тунелів у змішаних ґрунтах.

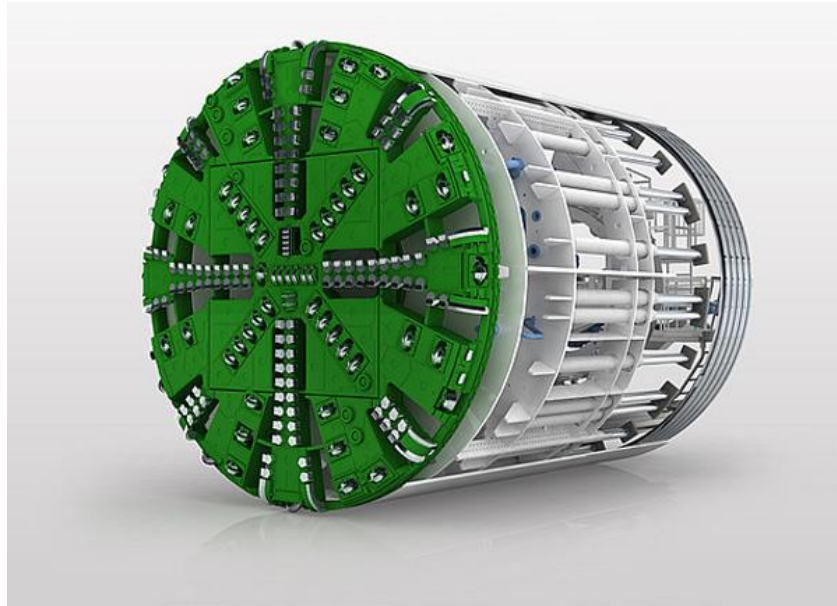


Рис. 15. 6. Загальний вигляд щита для проходки у змішаних ґрунтах "Миксцит"

Миксцити компанії "Herrenknecht", завдяки своєму замкнутому гідравлічному контуру, можуть безпечно застосовуватися навіть в умовах високого тиску ґрунтових вод - понад 15 бар. Для цього Миксцити обладнані декількома герметизуючими системами.

Ущільнення головного привода виконано у вигляді системи з окремими герметизуючими камерами, що містять запресований ущільнювач. У задній частині установки кільцевий зазор між внутрішньою частиною хвостовика й зовнішньою частиною елементів оправи ізолюється за допомогою декількох рядів щіткових ущільнень, що блокують проникнення ґрунту і ґрунтових вод під конструкцію щита.

Кільцевий зазор між розробленим ґрунтом і зовнішньою частиною оправи тунелю безупинно заповнюється цементно-піщаним розчином.

На рис. 15.7, показана схема розташування устаткування щита компанії "Herrenknecht" для проходки тунелів у змішаних ґрунтах.

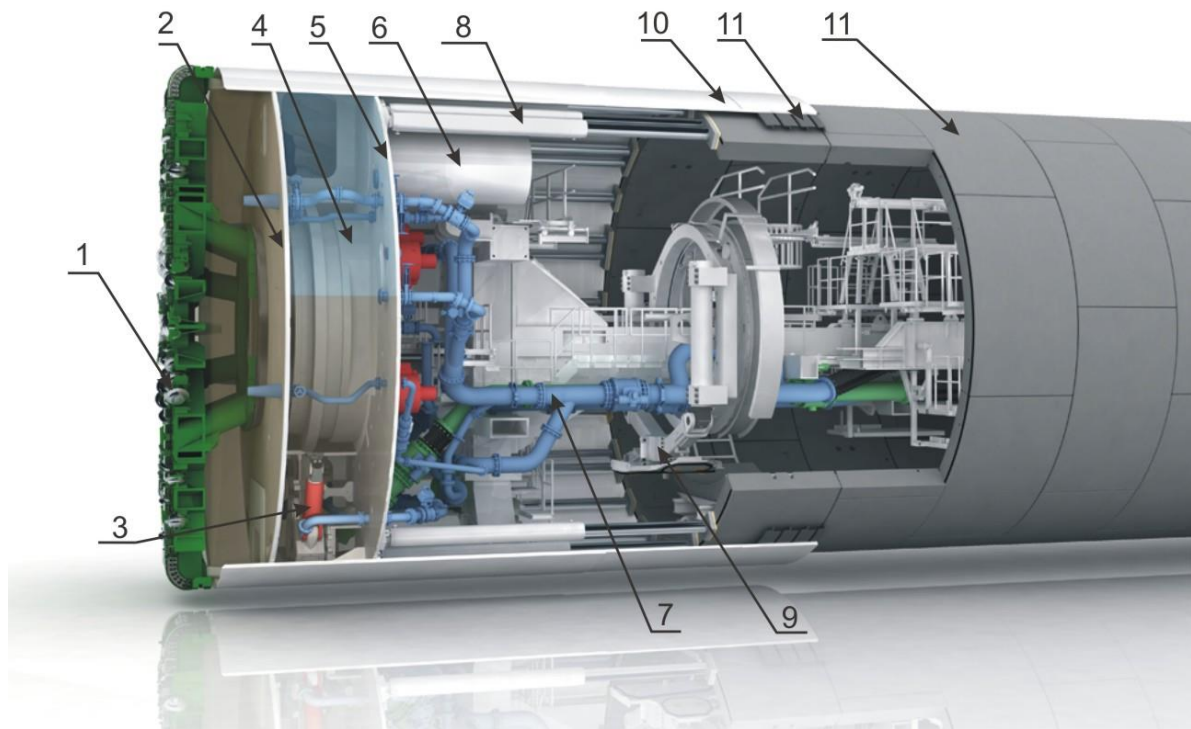


Рис. 15.7. Миксцит (Mixshield) Herrenknecht

1 - робочий орган. 2 - перегородка. 3 – щекова дробарка. 4 – повітряна подушка. 5 - перемичка. 6 - кесонна камера. 7 - транспортний контур. 8 - гідравлічні циліндри. 9 - блокоукладач. 10 – оболонка щита. 11- хвостовик. 12 - оправа тунелю.

Обертаючись, робочий орган 1, який оснащений різним різальним інструментом залежно від геологічних умов, наприклад, різцями або шарошками, розробляє породу у забої. Перегородка 2 передає зусилля продавлювання масі розробленого ґрунту у призабійній камері. Щекова дробарка 3, яка розташована перед приймальною сіткою, механічно подрібнює уламки породи до прийняттого розміру. Повітряна подушка 4 забезпечує точний контроль тиску привантаження у призабійній камері. Перемичка 5, яка відокремлює частину щита, що є під впливом атмосферного тиску, від області призабійної камери з надлишковим тиском. Кесонна камера 6 служить для входу спеціально навчених робітників у призабійну камеру, що перебуває під тиском для профілактичних робіт. Транспортний контур 7, що транспортує пульпу для створення привантаження у призабійній камері й суміш пульпи й розробленого ґрунту назад до сепараційної установки. Гідравлічні циліндри 8, які розташовані під щитом по контуру, пересувають робочий орган у сторону забою. Після того, як

під оболонкою щита 10 звільняється місце, за допомогою блокоукладача, пересувного вакуумного маніпулятора з дистанційним керуванням, виконується монтаж чергового кільця оправи із блоків під захистом хвостової частини щита. Хвостовик установки 11 за допомогою щіткового ущільнення закриває зазор між внутрішньою частиною хвостовика й зовнішньою частиною оправи.

Окремо треба звернути увагу на устаткування, яке використовується у Миксцитах компанії "Herrenknecht" для подрібнення великих уламків, які можуть зустрічатися по трасі тунелю. Такі уламки повинні бути здрібнені до прийнятного розміру для того, щоб їх можна було видалити по гідроканалам транспортного контуру.

У Миксцитах для цього використовується щекова дробарка (рис. 15.8), що розташована в передній частині прийомної сітки. Розмір уламків, що дробляться, варіюється відповідно до конструкції дробарки й діаметром щита. Крім того, приймальня сітка встановлена на усмоктувальному отворі пульпопроводу для захисту установки від часток, розмір яких може викликати проблеми. Сітка утримує уламки великого розміру доти, поки вони не будуть перероблені в дробарці до необхідного розміру. Якщо по трасі проходки очікується дрібнозернистий зв'язний ґрунт, у передній частині установки як альтернатива сітці встановлюється барабанна дробарка. Вона виконує функцію захисту впускного отвору в процесі дроблення. Дві бічні мішалки підтримують надходження матеріалу в нижню секцію.

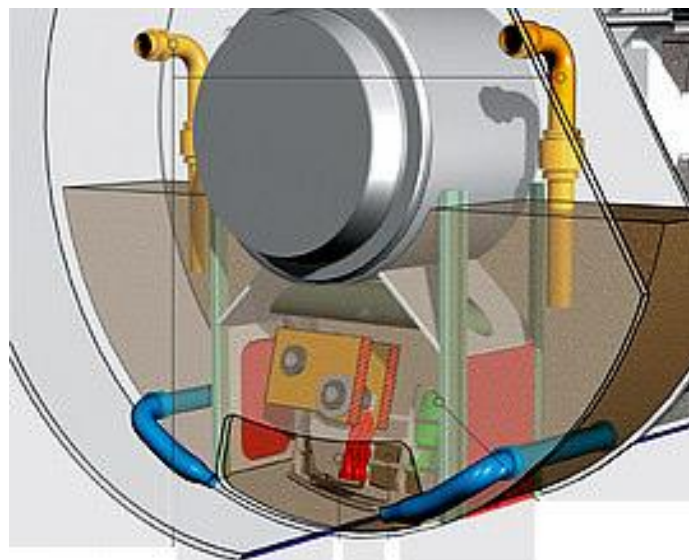


Рис. 15. 8. Щекова дробарка миксщита

На рис. 15.9. показано Миксцит (Mixshield) Herrenknecht на будівельному майданчику.



Рис. 15. 9. Миксцит (Mixshield) Herrenknecht на будівельному майданчику.

Завдання для самоконтролю

1. У яких випадках застосовують закриті й відкриті способи робіт?
2. Які конструкції тунельних оправ застосовують при закритому способі?
3. У яких умовах застосовуються чавунні тюбінги?
4. Перелічить основні елементи прохідницьких щитів.
5. У чому складається відмінність механізованих прохідницьких щитів від немеханізованих?
6. Які призначення й пристрій укладачів оправи?
7. Які типи навантажувальних машин застосовуються в тунелебудуванні?

16 ТУНЕЛЕПРОХІДНЕЦЬКІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ МІЦНИХ ГРУНТІВ

16.1 Тунелепрохідницькі комплекси для міцних ґрунтів з одинарним щитом

У минулі роки, при будівництві тунелів у скельних породах, використовувалися гірничі способи проходки або еректорний спосіб з буровибуховим способом розробки скельної породи. Останнім часом з розвитком технологій у світі почали використовувати ТПМК для будівництва транспортних тунелів і у скельних породах.

Лідерами у розробці і використанні таких ТПМК є компанії "Herrenknecht" (Німеччина), "Robbins" (США) та японські компанії.

Розглянемо спорудження тунелів у скельних породах на прикладі устаткування німецької компанії "Herrenknecht" [12].

На рис. 16.1, 16.2. показано щит компанії "Herrenknecht" для проходки тунелів у скельних породах.

Проходка тунельних виробок з використанням тунелепрохідницького механізованого комплексу з одинарним щитом фірми "Херренкнехт" ефективно виконується в міцних скельних породах.

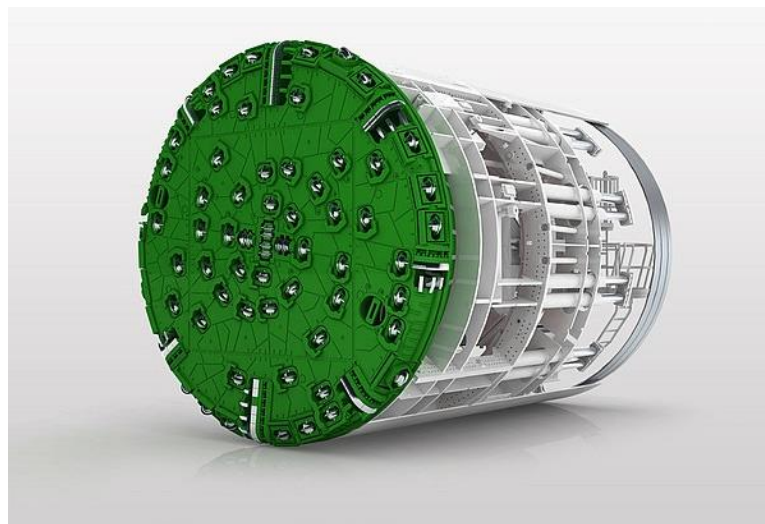


Рис. 16.1. Загальний вигляд щита "Херренкнехт" для проходки у міцних породах

При проходці тунелю з використанням ТПМК із одинарним щитом, робочий орган якого обертається, оснащений шарошками, які притискаються до забою з тиском до 32 тон на кожен шарошку, що дозволяє розробляти гірську породу з міцністю до $f = 25$.

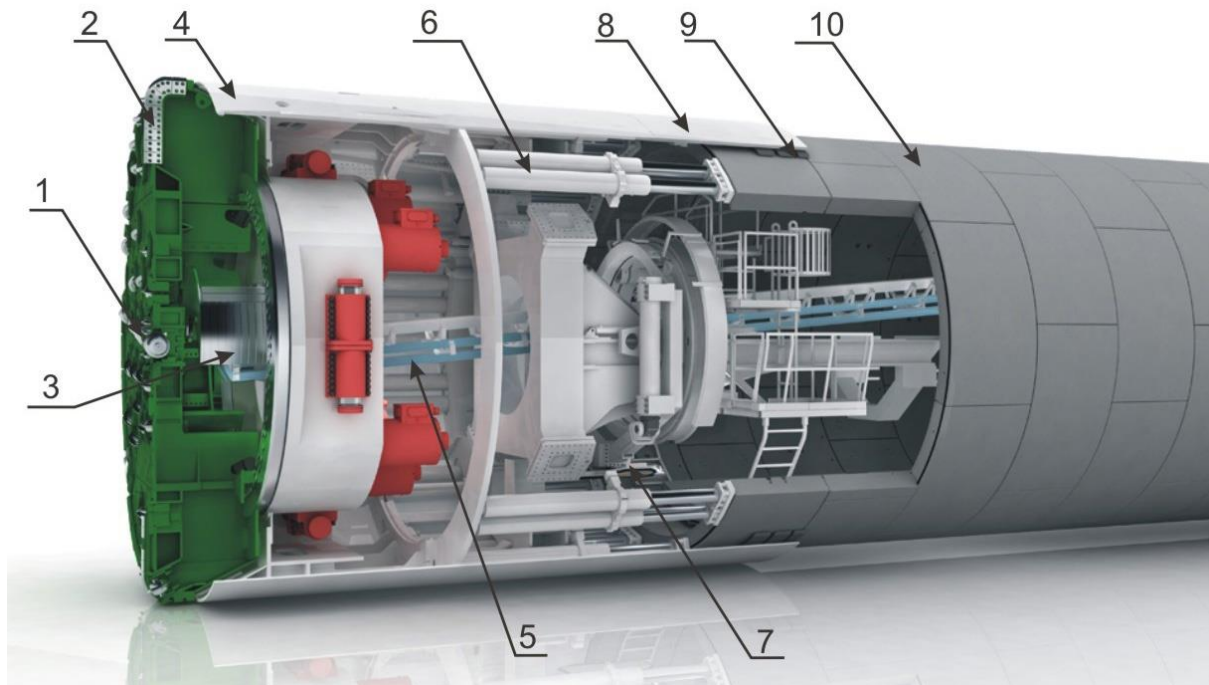


Рис. 16.2. ТПМК із одинарним щитом "Херренкнехт"

1 - робочий орган. 2 - черпаки. 3 - шламове кільце. 4 - щит. 5 - транспортер. 6 - гідравлічні циліндри. 7 – блокоукладач. 8 – оболонка щита. 9 - хвостовик установки. 10 - оправа тунелю.

При обертанні робочого органу 1 і великого контактного тиску шарошок на породу у забої окремі уламки – так звана бурова крихта – відколюються від скельної породи. Черпаки 2, які установлені на робочому органі, забирають розроблену породу і, завдяки силі ваги під час обертання робочого органу, уламки породи переміщуються у шламове кільце 3 по направляючим і потім падають крізь воронкоподібне кільце на транспортер машини 5 (рис. 16.3).

Струмені води охолоджують робочий інструмент і зменшують утворення пилу. Наприкінці транспортера порода попадає на стрічковий конвеєр або в вагонетки і транспортується із тунелю.

Усі процеси виконуються під оболонкою щита 8, що забезпечує високий рівень безпеки персоналу й установки, зокрема в тріщинуватих гірських породах. Гідравлічні циліндри 6 (щитові

домкрати), розташовані по колу, переміщують щит уперед, опираючись на раніше споруджене кільце оправи тунелю 10.

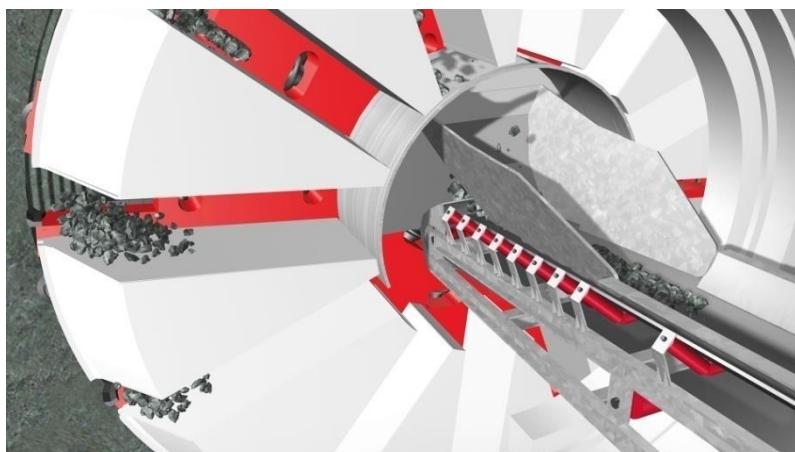


Рис. 16.3. Перенесений черпаками розроблений ґрунт падає крізь воронкоподібне шламове кільце.

Блокоукладач 7 (еректор) - пересувний вакуумний маніпулятор з дистанційним керуванням використовується для переміщення блоків під час монтажу кільця оправи. Хвостова частина щита захищає місце монтажу оправи. Щіткові ущільнення закривають зазор між внутрішньою частиною хвостовика 9 й зовнішньою частиною оправи 10, яка складається із елементів блоків або тьубінгів.

ТПМК із одинарним щитом проходить виробку, діаметр якої перевищує розміри самого щита. Крім того, вісь робочого органу розташована трохи вище, ніж вісь щита. Це збільшення діаметра виробки дозволяє регулювати роботу щита й захистити його від заклинювання у скельному ґрунті.

Для контролю положення щита використовуються або жорстко встановлені приводи із гідроциліндрами керування, або рухливі приводи з підшипниками, або додатковими циліндрами поздовжнього зсуву. Це дозволяє проводити проходку з дуже малим радіусом. Для всіх типів приводів робочий орган може бути відсунутий назад для забезпечення прямого доступу до забою. Це дозволяє зношені в процесі роботи шарошки легко замінювати. Ще одна особливість ТПМК із одинарним щитом - робочий орган може обертатися в обох напрямках, що істотно знижує ризик реактивного крутіння машини.

На рис. 16.4. показано робочий орган щита під час монтажу на будівельному майданчику.



Рис. 16.4. Робочий орган ТПМК із одинарним щитом "Херренкнехт"

Проходка крізь тверді породи міцністю до $f = 25$ в деяких місцях вимагає величезних зусиль. Шарошки можуть зруйнувати скельну породу тільки при створенні дуже високого тиску в місці контакту. Якщо скельна крихта велика, то це є доказом швидкої й ефективної проходки з оптимальним тиском і низьким ступенем зношування шарошок. Якщо контактний тиск занадто низький, то порода не руйнується належним чином, а шарошки зношуються швидше.

На рис. 16.5. показано робочий орган щита після проходки і виходу у підготовлену виробку.



Рис. 16.5. Вид робочого органу щита "Херренкнехт" після проходки тунелю

При невеликих діаметрах виробок й обмеженому просторі для різального інструменту варто приділяти пильну увагу конструкції робочого органу, крутному моменту й контактному тиску, з урахуванням інженерно-геологічних властивостей порід. Оптимальне розташування шарошок на робочому органі й приводів з високим крутним моментом і високим контактним тиском є найбільш важливими факторами в забезпеченні швидкої проходки тунелю з максимально низьким зношуванням породоруйнуючого інструменту (шарошек).

16.2 Тунелепрохідницькі комплекси для міцних ґрунтів з подвійним щитом

ТПМК з подвійним щитом є одними з найбільше технічно складних тунелепрохідницьких комплексів. Вони поєднують принципи функціонування гриперних ТПМК і ТПМК із одинарним щитом в одній установці. В умовах постійної геології така комбінація методів дозволяє споруджувати оправу тунелю одночасно із процесом проходки (розробки породи), досягаючи тим самим високої продуктивності. Ця потужна технологія ідеально підходить для проходки довгих тунелів у твердих породах.

На рис. 16.6. показано загальний вигляд ТПМК "Херренкнехт" для проходки у міцних породах з подвійним щитом.

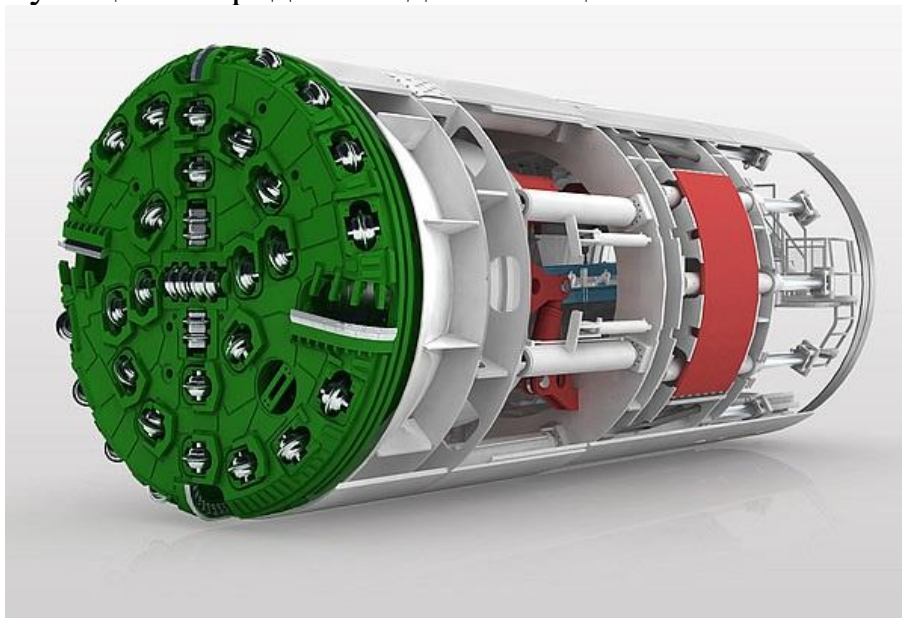


Рис. 16.6. Загальний вигляд щита "Херренкнехт" для проходки у міцних породах

На рис. 16.7. показана конструкція ТПМК с подвійним щитом, проходка тунелів яким відрізняється від проходки ТПМК с одинарним щитом.

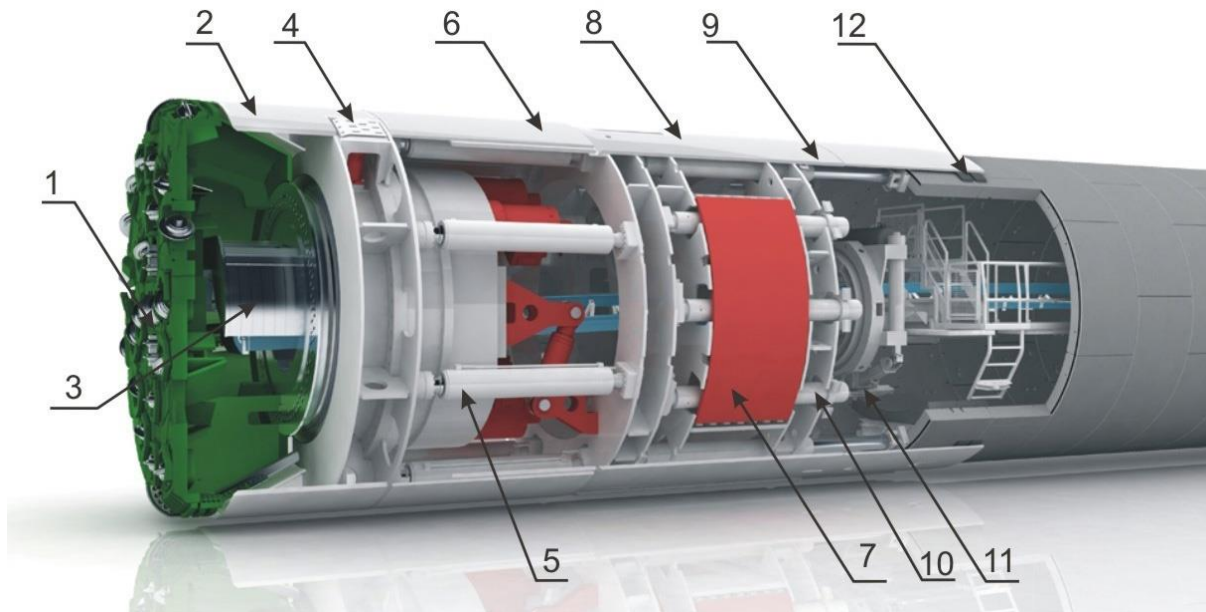


Рис.16.7. ТПМК с подвійним щитом "Херренкнехт"

1 - робочий орган. 2 - ножове кільце. 3 - шламове кільце. 4 - стабілізатори. 5 - щитові головні гідроциліндри. 6 – передній щит. 7 – розпірки. 8 – телескопічний щит. 9 - задній щит. 10 – допоміжні гідроциліндри. 11 - Еректор - блокоукладач. 12 – щіткові ущільнення.

ТПМК із подвійним щитом складається із двох основних компонентів: переднього щита з робочим органом, головним підшипником і приводом і заднім щитом із гриперним пристроєм, додатковими гідроциліндрами й хвостовиком. Головні гідроциліндри, які використовуються для пересування робочого органу з'єднують дві частини щита. Вони захищені телескопічним щитом; у цьому місці передній і задній щити встановлені в перетин. Тому ТПМК із подвійним щитом також іноді називають телескопічним щитом. У стійкому ґрунті щит кріпиться радіально в тунелі за допомогою розпиркових пристроїв. Це означає, що передній щит може просуватися вперед незалежно від заднього щита за допомогою головних гідроциліндрів.

Головною відмінністю ТПМК з подвійним щитом є телескопічний щит рис. 16.8. Розташування в перетин переднього і заднього щитів з внутрішнім телескопічним щитом утворює розсувний телескопічний щит.

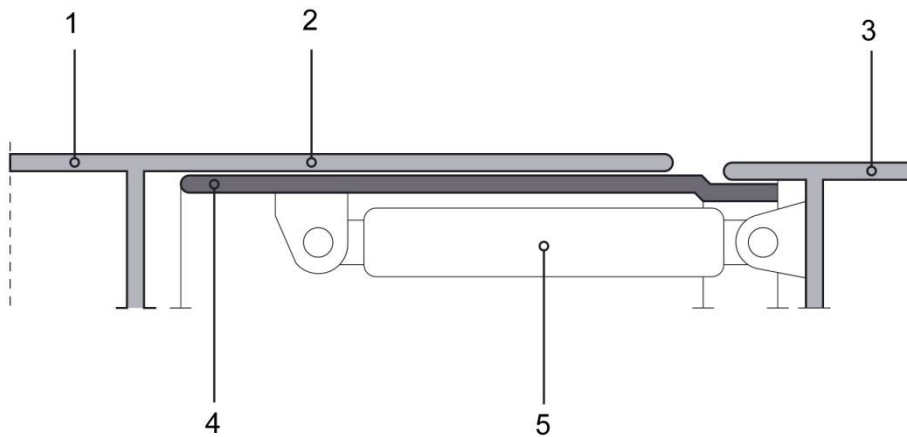


Рис. 16.8. Телескопічний щит – з перетином переднього й заднього щитів утворюють розсувний телескопічний щит.

1 – передній щит. 2 – зовнішній телескопічний щит. 3 – задній щит. 4 – внутрішній телескопічний щит. 5 – допоміжні гідроциліндри.

Ножове кільце щита 2 містить у собі робочий орган 1, а також основний підшипник і головний привід, формуючи передню частину телескопічного щита. Під час обертання робочого органу 1 шаршки для скельного ґрунту руйнують породу на уламки шляхом обертання й надання високого контактного тиску на породу. Перенесений у верх черпаками розроблений ґрунт падає крізь воронкоподібне шламове кільце 3 на стрічковий конвеєр і транспортується у місце навантаження (рис. 16.3).

Головні щитові гідроциліндри 5 відштовхуються від заднього щита 9 й переміщують робочий орган 1, який обертається до забою. Перетин переднього й заднього щитів утворить розсувний телескопічний щит 8. Антипроворотні циліндри 4 поглинають крутний момент робочого органу для запобігання провороту.

Розпірки 7 фіксують ТПМК із подвійним щитом з боків у тунелі за допомогою гідроциліндрів. Задній щит містить у собі розпірний пристрій, допоміжні гідроциліндри продавлювання й хвостовик, утворюючи задню частину телескопічного щита. Допоміжні гідроциліндри продавлювання фіксують положення вже встановлених сегментів і просувають уперед задній 9 щит. Блокоукладач - пересувний вакуумний маніпулятор з дистанційним керуванням для переміщення блоків під час монтажу кільця оправи.

16.3 Тунелепрохідницькі комплекси для міцних ґрунтів. Гриперні (Gripper) конструкції щитів

Гриперні ТПМК відносяться до відкритих тунелепрохідницьких установок і не оснащені закритою захисною круговою оболонкою. Тому продуктивність спорудження тунелю залежить від часу, необхідного для стабілізації породи. У складних геологічних умовах гриперні ТПМК від "Херренкнехт" дозволяють застосовувати цілий комплекс мер по тимчасовій стабілізації породи безпосередньо за робочим органом. У робочій зоні стабілізація переважно проводиться за допомогою анкерів, сталевих сітки й сталевих аркових кріплень.

Відбір проб і при необхідності закріплення ґрунту перед тунелепрохідницьким комплексом можливі при використанні додаткових установок випереджального буріння. Вода, що просочується з породи, відкачується за допомогою дренажної системи у нижній частині машини. Пройдені ділянки тунелю за тунелепрохідницьким комплексом постійно підтримуються за допомогою торкретбетону. У пройдених ділянках установлюється все необхідне для роботи устаткування. Найчастіше для стабілізації породи застосовується крім постійного торкретування також і установку лоткових блоків.

Гриперний ТПМК від компанії "Херренкнехт" у багатьох випадках є ефективним рішенням для швидкого механізованого тунелебудування в скельних породах.



Рис.16.9. Гриперний ТПМК від компанії "Херренкнехт"

Проходка гриперним тунелепрохідницьким комплексом виконується без монтажу кілець оправи, тому використання таких комплексів можливо тільки у породах середньої й високої міцності. Для більше тріщинуватих порід безпосередньо на ТПМК montуються різні системи для екстреної підтримки склепіння тунелю за робочим органом.

На рис. 16.10. показана конструкція гриперного тунелепрохідницького комплексу.

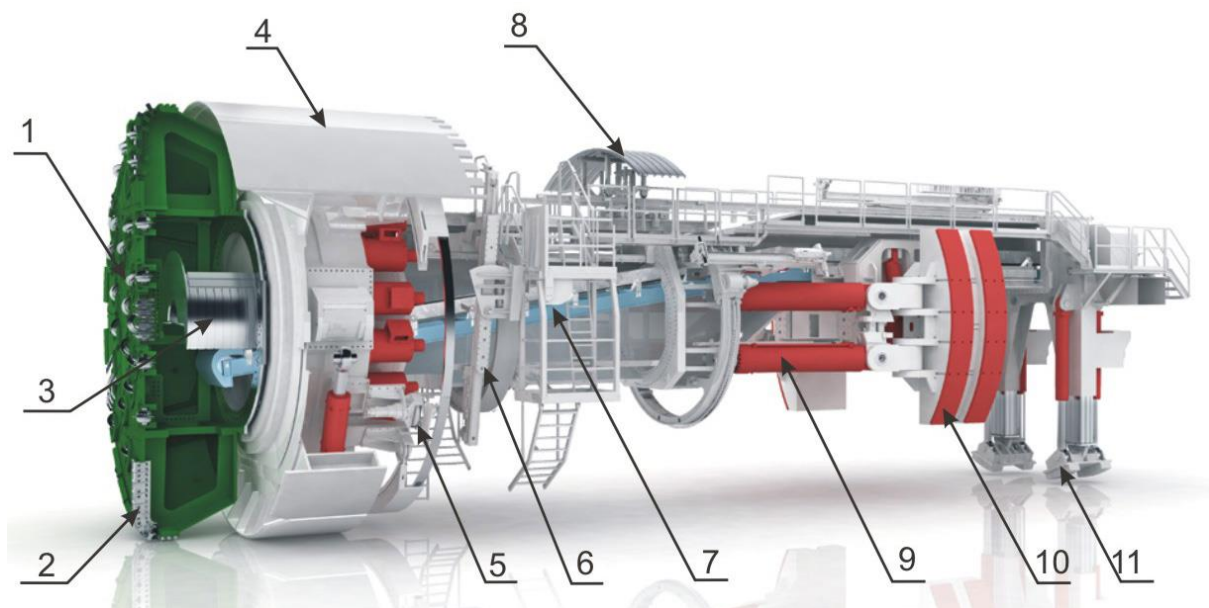


Рис.16.10. Гриперний ТПМК від компанії "Херренкнехт"

- 1 - робочий орган. 2 - черпаки. 3 – шламове кільце. 4 - верхній щит.
 5 - арочний еректор. 6 – буровий станок для установки анкерів. 7 – стрічковий транспортер. 9 - гідроциліндри. 10 - грипер. 11 - опори установки.

Перед початком кожного циклу робіт гриперний ТПМК фіксується в раніше пройденій ділянці тунелю за допомогою бічних розсувних гідроциліндрів – гриперів, які фіксують прохідницький комплекс опираючись у бокові стінки тунелю. Змонтовані з боків розпірки грипери 10 є ключовими елементами установок цього типу, звідси відбувається й назва установки.

Потім гідроциліндри 9 впираються в гриперний пристрій і переміщують робочий орган, який обертається, до забою тунелю. Кілька телескопічних щитів компенсують вібрації від процесу буровлення, тим самим знижуючи зношення устаткування. Низ щита

також служить як пересувна опора для ТПМК. Бічні частини щита притискаються до породи для забезпечення стабілізації. Верхня частина щита при необхідності може бути оснащена додатковими щитовими елементами з можливістю висунання назад, що забезпечує захист від обвалення гірської породи. По завершенні циклу розробки породи процес проходки зупиняється, а гриперний пристрій просувається вперед.

Процес різання породи такий самий, як і у щитах описаних у розділі 16.3. При обертанні робочого органу 1 під дією великого контактного тиску шарошок на породу у забої окремі уламки відколюються від скельної породи. Черпаки 2, які установлені на робочому органі, піднімають розроблену породу і завдяки силі ваги при обертанні робочого органу уламки породи переміщуються у шламове кільце 3 по направляючим і потім падають крізь воронкоподібне кільце на транспортер машини 5 (рис. 16.3).

Арочний еректор 5 встановлює металеві опорні арки для стабілізації склепіння тунелю. Буровий станок пробурює радіальні шпури для встановлення анкерів, що призводить до стабілізації породи склепіння за верхнім щитом 4 (рис. 16.11).

Стрічковий транспортер 7 переміщує розроблений ґрунт від робочого органу до місця навантаження у вагонетки або тунельні машини. Після чого цикл проходки повторюється.

На рис. 16.11. показана схема буріння радіальних шпурів для установки анкерів.

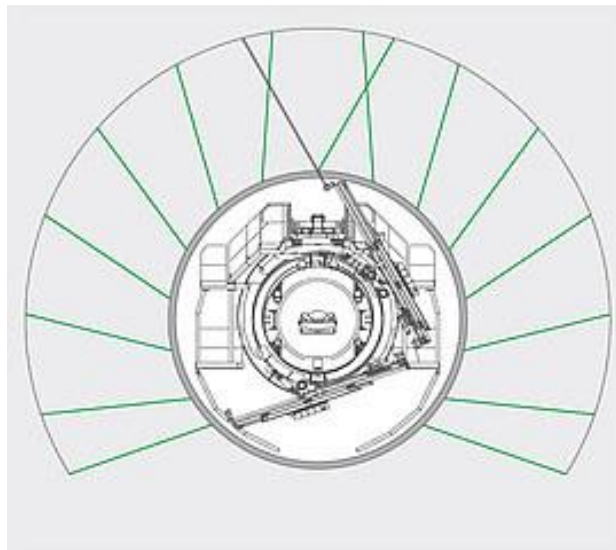


Рис. 16.11. Схема буріння радіальних шпурів для установки анкерів

На рис. 16.12. показано гриперний ТПМК від компанії "Robbins" на будівельному майданчику.

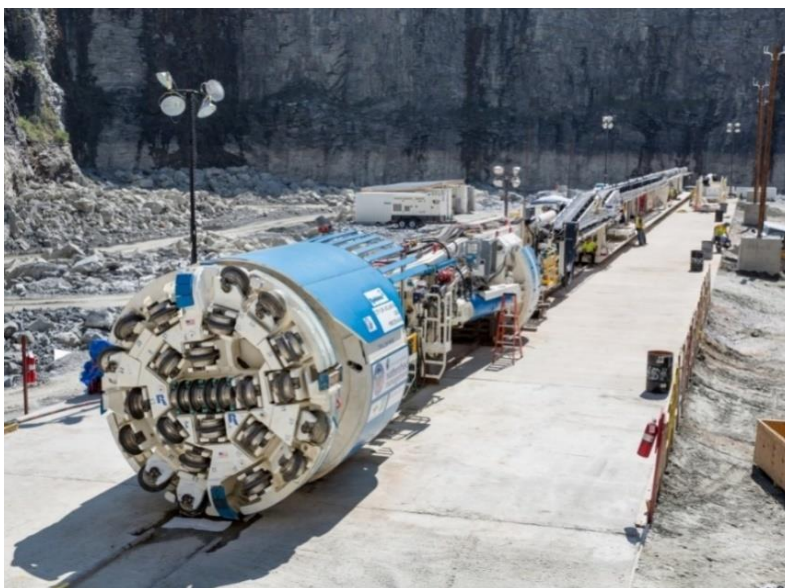


Рис.16.12. Гриперний ТПМК від компанії "Robbins" на будівельному майданчику

На рис. 16.13. показано забій породи під час зупинки роботи ТПМК і перевірки шарошеч.

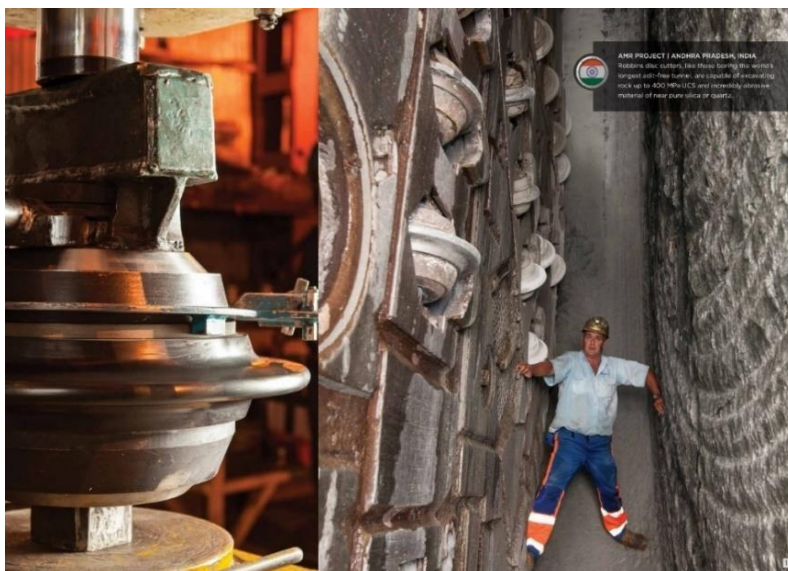


Рис.16.13. Забій породи і робочий орган ТПМК під час зупинки роботи.

Завдання для самоконтролю

1. У яких випадках застосовують закриті й відкриті способи робіт?
2. Які конструкції тунельних оправ застосовують при закритому способі?
3. У яких умовах застосовуються чавунні тюбінги?
4. Перелічить основні елементи прохідницьких щитів.
5. У чому складається відмінність механізованих прохідницьких щитів від немеханізованих?
6. Які призначення й пристрій укладачів оправи?
7. Які типи навантажувальних машин застосовуються в тунелебудуванні?

Бібліографічний список

1. Айвазов Ю. М. Проектування метрополітенів : навч. посіб. : у 3 ч. Київ : НТУ, 2006. Ч. 1. 166 с.
2. Айвазов Ю. М. Проектування метрополітенів : навч. посіб. : у 3 ч. Київ : НТУ, 2009. Ч. 2. 216 с.
3. ДБН В.2.3-7:2018. Метрополітени. Основні положення. На заміну ДБН В.2.3-7-2010 ; чинний від 2019-09-01. Вид. офіц. Київ : Міністерство України, 2019. 70 с.
4. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Зі Зміною № 1. На заміну СНиП 2.03.01-84* ; чинний від 2020-06-01. Вид. офіц. Київ : М-во розвитку та територій України, 2020. 71 с.
5. Дорофєєв В. С. Проектування тунелів глибокого розташування : навч. посіб. Одеса : ОДАБА, 2015. 97 с.
6. Самедов А. М. Будівництво міських підземних споруд : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 400 с.
7. Тунелі і метрополітени. Навчально-методичні рекомендації для курсового проектування «Спорудження тунелів щитовим способом» / уклад. О. Л. Тютюкін, В. П. Купрій, В. А. Мірошник. Дніпро : Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2023. 60 с.
8. ДСТУ Б ГОСТ 24451:2011. Тунелі автодорожні. Габарити наближення будівель і устаткування (ГОСТ 24451-80, IDT). На заміну ГОСТ 24451-80 ; чинний від 2012-12-01. Вид. офіц. Київ : М-во регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України, 2012. 6 с.
9. ДСТУ Б В.2.3-29:2011. Габарити наближення будівель і рухомого складу залізниць колії 1520 (1524) мм (ГОСТ 9238-83, MOD). На заміну ГОСТ 9238-83 ; чинний від 2012-12-01. Вид. офіц. Київ : М-во регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України, 2012. 44 с.
10. Айвазов Ю. М. Вишукування і проектування гірських транспортних тунелів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. : у 3 ч. Київ : НТУ, 2005. Ч. 1. 186 с.
11. Айвазов Ю. М. Вишукування і проектування гірських транспортних тунелів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. : у 3 ч. Київ : НТУ, 2008. Ч. 2. 230 с.

Інформаційні ресурси

1. Tunnelling. *Herrenknecht AG – Pioneering Underground Together*. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/tunnelling/> (date of access: 11.11.2023).
2. Купрій В. П. Дистанційний курс в СДН «ЛІДЕР». Тунелі і метрополітени (частина II) © (Щитовий спосіб спорудження тунелів). *Український державний університет науки і технологій*. URL: <https://lider.diit.edu.ua/course/view.php?id=384> (дата звернення: 06.11.2023).

Навчальне видання

*Тютькін Олексій Леонідович, Купрій Володимир Павлович,
Мірошник Віталій Анатолійович*

**Тунелі і метрополітени.
Щитовий спосіб спорудження тунелів**

Навчальний посібник

Електронне видання

Відповідальний редактор В. П. Купрій
Комп'ютерна верстка В. П. Купрій
Дизайн обкладинки В. П. Купрій

Експертний висновок склав д-р техн. наук, проф. В. Д. Петренко

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 669 від 26.12.2023)

Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк. 10,35. Обл.-вид. арк. 5,22.
Зам. № 68

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, ауд. 263 (наукова бібліотека)
м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022