

Metody budowy tuneli

Metody tarczowe¹

dr inż. Maciej Kędracki

1. Wstęp

Metoda tarczowa drążenia tuneli jest przeznaczona głównie do robót górniczych w utworach czwartorzędowych, przy nawodnieniu i innych utrudnieniach geologiczno-górniczych, a więc przede wszystkim w górotworze niestabilnym.

Tradycja tego typu robót sięga końca XIX w., kiedy to Francuz Marc Isambard Brunel (ojciec, nie mylić z synem, również genialnym konstruktorem) na zlecenie parowej kolei brytyjskiej wykonywał tunel pod Tamizą w Londynie. Roboty trwały 18 lat i zostały uwieńczone sukcesem. Tunel ten do dziś służy londyńskiemu metru. Wtedy to M.I. Brunel skonstruował i z powodzeniem zastosował tzw. tarczę. Była to rura prostokątna (a właściwie kilka rur prostokątnych umieszczonych obok siebie) o wymiarach odpowiadających wymiarom drążonego tunelu. Rura ta stanowiła tymczasową obudowę przodka, czyli zabezpieczała przodek przed zawaleniem. Wraz z postępem robót tarcza była przesuwana do przodu. Pod jej osłoną wykonywano obudowę ostateczną. Należy zauważyć, że tarcza nie tylko zabezpieczała przodek, ale również pozwalała na lepszą organizację pracy. Ten sposób z pewnymi unowocześnieniami stosuje się do dziś. Na rysunku 1 pokazano typową tarczę do drążenia tuneli wraz z jej elementami składowymi.



Rys. 1. Typowa tarcza do drążenia tuneli i jej główne elementy składowe

2. Podział tarcz do drążenia tuneli

Tarcze można podzielić na:

- otwarte z naturalnym lub mechanicznym podparciem przodka,
- zamknięte pracujące z nadciśnieniem sprężonego powietrza w komorze roboczej,
- zamknięte z zawieszoną płuczkową w komorze roboczej,
- zamknięte z równoważeniem parcia gruntu w przestrzeni roboczej.

W tarczach otwartych prace związane z urabianiem, załadunkiem i transportem urobku, wykonywaniem obudowy mogą być wykonywane ręcznie oraz z częściową lub całkowitą mechanizacją. Pozostałe typy tarcz są całkowicie zmechanizowane. Mechanizacja, zwłaszcza w zakresie urabiania, dostosowana jest do warunków geologiczno-górniczych. Tarcze tzw. pełnoprzekrojowe, to znaczy takie, w których urabianie odbywa się na całym przekroju poprzecznym tunelu, zwane są TBM (*Tunnel Boring Machine*).

Podczas tunelowania w gruntach, zwłaszcza niespoistych, luźnych i słabych skałach, szczególnie ważnym problemem jest

podparcie czoła przodka, tj. zabezpieczenie się przed niekontrolowanym przedostawaniem się urobku do środka obudowy tunelu. Przy omawianiu poszczególnych typów tarcz zostanie też podany sposób podparcia czoła przodka drążonego tunelu.

3. Tarcze otwarte

Tarcze otwarte stosuje się podczas tunelowania nad istniejącymi poziomami wody gruntowej lub gdy można łatwo i bez wpływu na otaczające środowisko czasowo obniżyć poziom wód poniżej spągu projektowanego tunelu. Konstrukcja tarczy otwartej umożliwia załodze dostęp do czoła przodka. Ułatwia to usuwanie napotkanych głazów i innych przeszkód.

Wykonywanie obudowy tunelu, podobnie jak i w innych typach tarcz, odbywa się pod osłonową częścią płaszcza tarczy.

Podparcie czoła przodka deskowaniem oraz przyporą z urobku



Podparcie czoła przodka urobkiem na półkach rozcinających

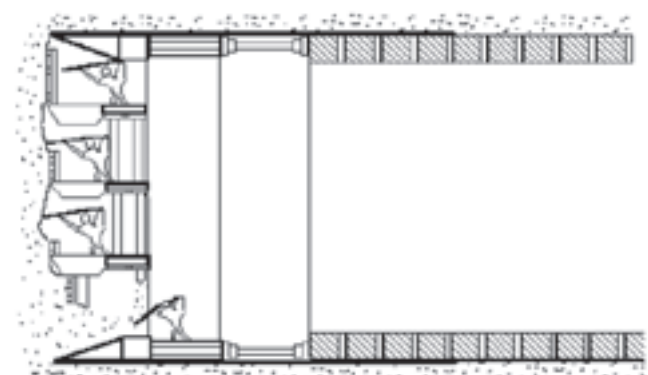


Podparcie czoła przodka mechaniczną przyporą i urobkiem



Rys. 2. Tarcze otwarte – urabianie ręczne

Typową tarczę z ręcznym urabianiem calizny oraz organizację pracy przedstawia rysunek 3.



¹ Praca została zrecenzowana przez prof. dr. hab. inż. Antoniego Tajdusia.

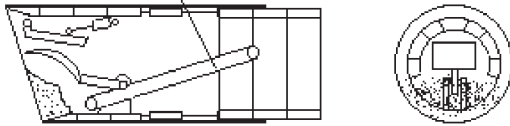


Rys. 3. Tarcza z ręcznym urabianiem calizny

Przykłady tarcz otwartych z mechanicznym urabianiem calizny:

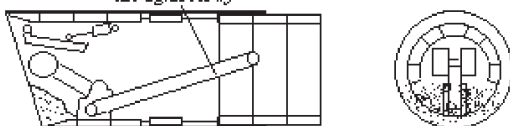
Podparcie czoła przodka mechaniczną przyporą i urobkiem, urabianie koparką

przenośnik taśmowy lub zgrzebiowy

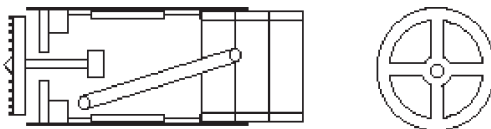


Podparcie czoła przodka mechaniczną przyporą i urobkiem, urabianie głowicą skrawającą

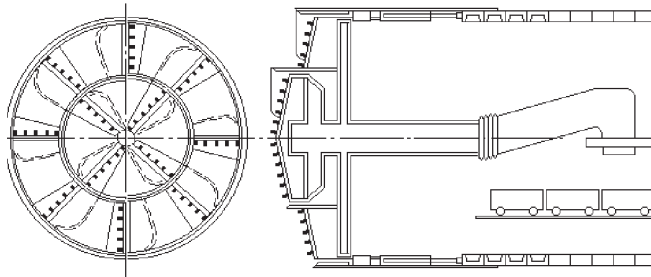
przenośnik taśmowy lub zgrzebiowy



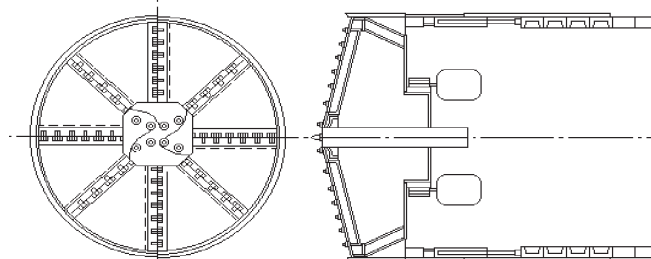
Podparcie czoła przodka kołem urabiającym i płytami oporowymi



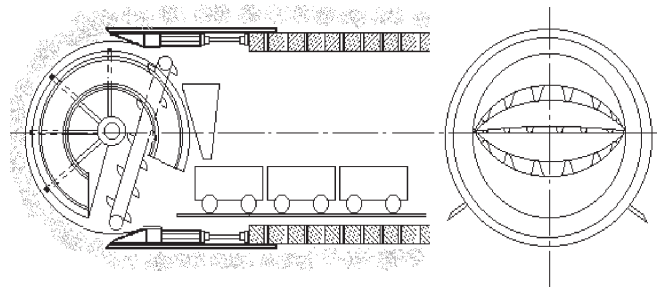
Rys. 4. Tarcze otwarte – urabianie mechaniczne



Rys. 5. Tarcza otwarta uzbrojona w koparkę kołowo-czerpakową



Rys. 6. Tarcza otwarta uzbrojona w koło frezujące



Rys. 7. Starsza odmiana tarczy otwartej, wyposażona w koparkę kulową systemu Hallingera

4. Tarcze zamknięte pracujące z nadciśnieniem sprężonego powietrza w komorze roboczej

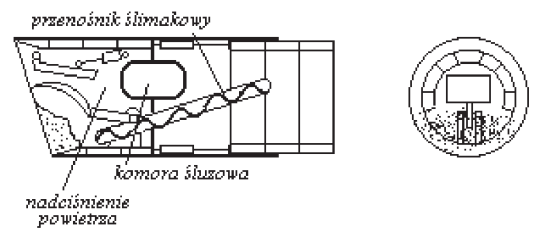
Tarcze zamknięte posiadają szczelną przegrodę oddzielającą część przodkową od pozostałych części tarczy. Nadciśnienie powietrza utrzymywane w przodkowej części tarczy równoważy statyczne ciśnienie wody gruntowej, nie pozwalając na przedostanie się jej do wnętrza tarczy. W szczelnej przegrodzie umieszczona jest śluza, przez którą można przedostać się do przodka.

Aby zapobiec ucieczkom powietrza z przodkowej części tarczy, przyjmuje się, że minimalny nadkład nad stropem tunelu nie powinien być mniejszy od średnicy tunelu. Ucieczki powietrza są szczególnie prawdopodobne podczas prowadzenia robót w gruntach niespoistych gruboziarnistych, w strefach nieciągłości górotworu i w gruntach nasypowych. W takich przypadkach szczelność uzyskuje się poprzez natrysk i iniekcje zawiesiny ilowej na caliznę.

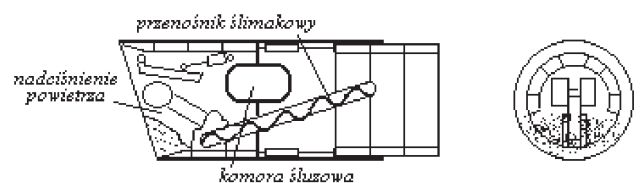
W tarczach zamkniętych do transportu urobku stosuje się przenośniki ślimakowe zakończone dozownikiem, uniemożliwiającym ucieczki powietrza z przodkowej części tarczy.

Podczas drażenia tunelu za pomocą zamkniętej tarczy z nadciśnieniem powietrza w przodku, konieczne jest posiadanie w pobliżu miejsca robót komór dekompresyjnych dla załogi.

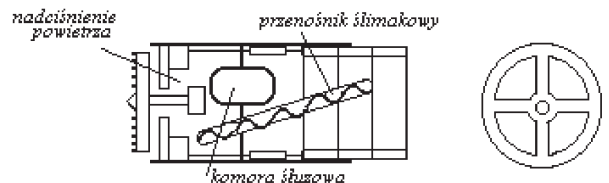
Urabianie koparką



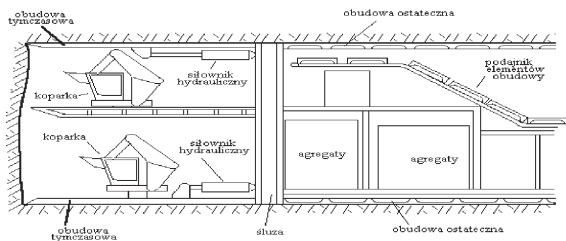
Urabianie głowicą skrawającą



Urabianie kołem skrawającym



Rys. 8. Tarcze zamknięte z nadciśnieniem powietrza w przodku



Rys. 9. Tarcza zamknięta z nadciśnieniem powietrza w przodku uzbrojona w koparki tyżkowe

5. Tarcze zamknięte z zawiesziną płuczkową, w komorze roboczej

Tarcze zamknięte z zawiesziną w komorze roboczej, zwane też płuczkowymi stosuje się podczas tunelowania w gruntach zaodnionych o niskiej kohezji – w piaskach i żwirach z niewielką zawartością glin i ilów.



Rys. 10. Przekrój tarczy zawieszinowej

Komora robocza tarczy wypełniona jest płuczką ilową pod ciśnieniem. Ciśnienie płuczki wytwarzane jest i regulowane za pomocą sprężonego powietrza włączanego do specjalnej przegrrody w komorze roboczej.

Płuczka spełnia dwa zadania: utrzymuje stateczność czoła przodka i zapobiega napływowi wody do drążonego tunelu oraz stanowi medium do hydraulicznego transportu urobku odszpejnego za pomocą głowicy urabiającej.

Dla ułatwienia hydraulicznego transportu urobku, w komorze roboczej zainstalowana jest kruszarka likwidująca większe bryły urobku. Po oddzieleniu urobku od płuczki w separatorach jest ona ponownie wykorzystywana.

Właściwości i skład płuczki jest dobierany w zależności od warunków górniczych na zasadach podobnych do stosowanych w technikach wiertniczych.

Na czas remontów przeprowadzanych w komorze roboczej, płuczka zastępowana jest sprężonym powietrzem przejmującym zadanie utrzymania stateczności czoła przodka i zrównoważenie ciśnienia hydrostatycznego.

W nowoczesnych tarczach zawieszinowych stosuje się komputerowe sterowanie procesami związanymi z drążeniem tunelu.

6. Tarcze zamknięte równoważące parcie gruntu (Earth-Pressure Balance System EPBS)

Tarcze zamknięte równoważące parcie gruntu są stosowane w gruntach spoiwstych.

Stabilność czoła przodka tunelu utrzymywana jest za pomocą nacisku głowicy urabiającej, a napływ wody wstrzymywany za pomocą sprężonego powietrza w komorze roboczej. Do transportu urobku służy przenośnik ślimakowy z zaworem wstrzymującym ucieczki sprężonego powietrza z komory roboczej. Brak

kruszarki urobku rekompensuje uzbrojenie głowicy urabiającej w dyski skrawające.



Rys. 11. Przekrój tarczy zamkniętej równoważącej parcie gruntu

Opisana konstrukcja tarczy nie może być stosowana w gruntach niespoistych ze względu na ucieczkę sprężonego powietrza z komory roboczej poprzez przenośnik ślimakowy. Aby temu zapobiec i rozszerzyć możliwości stosowania tarcz równoważących parcie gruntu, w nowoczesnych konstrukcjach stosuje się podawanie plastyfikatora w postaci gęstej zawiesziny lub piany polimerowej przed głowicę urabiającą do komory roboczej i przenośnika ślimakowego. Stosowanie plastyfikatora nie tylko uszczelnia przenośnik ślimakowy, ale także zmniejsza opory urabiania.

6. Tarcze o łączonych systemach

Dla sprostania zmiennym warunkom geologiczno-górnicyznym wytwarzane są także tarcze o łączonych systemach. A oto przykłady:

- tarczę otwartą i zawieszinową zastosowano podczas budowy tunelu Grauholz w Szwajcarii,
- tarczę EPBS i otwartą zastosowano przy budowie francuskiego odcinka tunelu pod Kanałem La Manche,
- tarczę zawieszinową i równoważącą parcie gruntu zastosowano przy budowie metra w Duisburgu.

7. Obudowa tuneli stosowana w technologii tarczowej

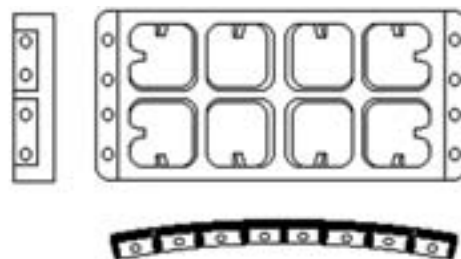
Do zabezpieczenia tuneli drążonych metodą tarczową stosuje się obudowy segmentowe żeliwne i żelbetowe. Obudowy segmentowe są łatwe w montażu, tworzą konstrukcję odporną na warunki geologiczno-górnicyzne, zapewniając bezpieczeństwo użytkownikom tunelu.

7.1. Obudowa z tubingów żeliwnych

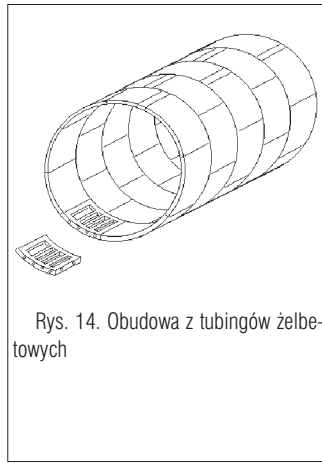
Obudowa z tubingów stosowana jest w trudnych warunkach górniczo-geologicznych: przy występowaniu dużych ciśnień górotworu, w partiach kurzawkowych itd. Stosowana jest także przy budowie szybów. Zapewnia duże bezpieczeństwo.

Typowy tubing to płyta żeliwna – wycinek walca. Płyty te skręca się śrubami i uszczelnia między sobą blachami lub drutem ołowianym. Po skręceniu płyt powstaje obudowa o przekroju kołowym.

Tubingi żeliwne są stosowane przy obudowie niektórych tuneli metra warszawskiego.

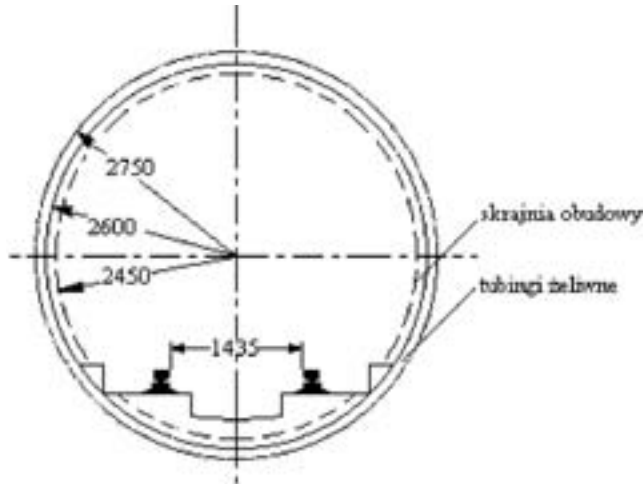


Rys. 12. Tubing żeliwny



Rys. 13. Sposób zabudowy tubingów: Pod stropem montowany jest jako ostatni tubing kluczowy, znacznie węższy od pozostałych. Ułatwia się w ten sposób wykonywanie obudowy

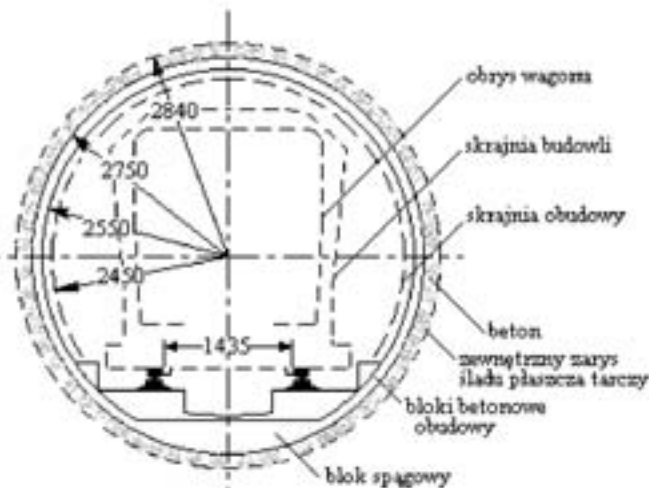
Rys. 14. Obudowa z tubingów żelbetonowych



Rys. 15. Obudowa tunelu warszawskiego metra wykonana z tubingów żeliwnych

7.2. Obudowa z segmentów żelbetonowych

Sposób wykonywania obudowy tunelu z segmentów żelbetonowych jest bardzo podobny do obudowy z tubingów. Zamieszczony niżej przykład pokazuje obudowę jednego z tuneli warszawskiego metra segmentami żelbetonowymi.



Rys. 16. Obudowa tunelu warszawskiego metra z segmentów żelbetonowych

Stosuje się dwa rodzaje uszczelnień segmentów obudowy żelbetowej:

- ściśliwymi uszczelnkami neoprenowymi, wklejanymi w postaci zwulkanizowanych ramek do rowków wokół obrzeży segmentów (mogą być też montowane w formach betoniarskich przed wlaaniem betonu),
- uszczelnkami hydrofilnymi wklejanymi na placu budowy (uszczelnki takie pęcznieją pod wpływem wody).

7.3. Montaż obudów segmentowych

Do montażu ciężkich segmentów obudowy stosuje się podajnik hydrauliczny zwany erektorem. Erektor zamontowany jest w tarczy.

8. Uszczelnienie ogona tarczy

Pomiędzy płaszczem tarczy a obudową powstaje pustka. Uszczelnienie jej przestrzeni jest konieczne we wszelkiego rodzaju tarczach zamkniętych, aby nie dopuścić do ucieczek sprężonego powietrza czy też wypływów zawiesiny ilowej. Dlatego w ogonie tarczy montuje się uszczelnki ślizgowe o różnej konstrukcji z metalu, tworzyw sztucznych lub gumy neoprenowej. Montuje się też tzw. uszczelnkę bezpieczeństwa, wypełnianą sprężonym powietrzem w momencie utraty szczelności uszczelnki zasadniczej.

Wcześniej stosowanymi uszczelnieniami były szczotki stalowe, pomiędzy które włączano smar.

9. Wypełnienie pustki za obudową

Pustka po płaszczu tarczy, powstająca pomiędzy calizną a obudową tunelu, jest jedną z głównych przyczyn osiadań powierzchni terenu nad drażonym tunelem. Szybkość i dokładność likwidacji tej pustki wpływa na wielkość osiadań. Likwidacja pustki dokonywana jest przez iniekcje zaczynu cementowego. Wykonuje się iniekcję pierwotną i wtórną, zwaną też uszczelniającą.

Znane są dwa sposoby przeprowadzania iniekcji pierwotnej – natychmiast po wykonaniu obudowy przez:

- „plecy” obudowy wykorzystując specjalne otwory w segmentach obudowy,
- „ogon” tarczy w trakcie posuwu, za pomocą specjalnej instalacji.

Iniekcja wtórna wykonywana jest w odległości 40 ÷ 100 m od czoła przodka, przez otwory w segmentach obudowy. Iniekcja ta eliminuje skurcz betonu z iniekcji pierwotnej.

10. Posumowanie

Odpowiednio dobrana tarcza pozwala na drażenie tunelu w trudnych warunkach górniczo-geologicznych, tj. w obecności wody, górotworze niestabilnym i na niewielkich głębokościach. Metoda tarczowa jest w wielu przypadkach znacznie efektywniejsza i bezpieczniejsza niż metody górnicze. Metoda ta nie ma zastosowania w skałach (stosowanie jej nie ma sensu, ponadto generuje się duże tarcie między tarczą a skałą).

Tarcze stosowane w metodach bezwykopowych, zwłaszcza w mikrotunelowaniu, są bardzo podobne pod względem mechanizacji robót, podparcia czoła przodka i zabezpieczenia przed napływem wody. Posiadają jednak istotną różnicę konstrukcyjną: nie mają części osłonowej, która nie jest potrzebna, bowiem obudowa tunelu jest wciskana w górotwór wraz z tarczą.

Literatura

1. Berger W.: *Der Moderne tunnel – und Stollenortieb*. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin-München-Düsseldorf 1970.
2. Furtak K., Kędracki M.: *Podstawy budowy tuneli*. Wydawnictwo PK. Kraków 2005.
3. Mandel G., Wagner H.: *Verkehrs – Tunnelbau, Band II, Netzgestaltung, Betriebsmerkmale und Baumethoden unterirdischer Verkehrsanlagen in Ballungsräumen*. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin-München 1969.
4. Stamatello H.: *Tunele i miejskie budowle podziemne*. Arkady. Warszawa 1970.
5. Striegler W.: *Tunnelbau*. Verlag für Bauwesen. Berlin-München 1993.
6. Apel F.: *Tunnel mit Schildvortrieb*. Werner Verlag. Düsseldorf 1968.
7. Katalogi i materiały reklamowe firmy HERRENKNECHT 2002.
8. Paszcza H., Pękacki W., Słomski T.: *Stan aktualny i perspektywa budowy kolejnych linii metra w Warszawie*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Budownictwo Podziemne 2000”. Kraków 2000.
9. Kosmalski M., Kozłowski R.: *Drażenie tuneli komunikacyjnych zmechanizowanymi tarczami tunelowymi TBM w gruntach i słabych skałach*. Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy podziemnej komunikacji miejskiej w Krakowie”. PK, Wydział Inżynierii Łądowej. Kraków 2002.