

prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatar¹⁾
 ORCID: 0000-0002-4071-2358
 dr inż. Małgorzata Fedorczak-Cisak^{1)*}
 ORCID: 0000-0003-1125-4068

Wybrane problemy naukowo-techniczne przy budowie i użytkowaniu tuneli

Selected scientific and technical problems in the construction and use of the tunnels

DOI: 10.15199/33.2022.02.05

Streszczenie. Budownictwo tunelowe nie ma w Polsce długiej historii. Najstarszy tunel kolejowy liczy niewiele ponad 160 lat. Obecnie, ze względu na gwałtowny rozwój transportu kolejowego, drogowego oraz zbiorowego transportu miejskiego (metro) budowa tuneli przeżywa rozkwit. Wraz z rozwojem budownictwa tunelowego pojawiają się nowe techniki projektowania i wykonywania tego typu obiektów. W artykule autorzy przedstawili podstawowe aspekty realizacji tuneli.

Słowa kluczowe: metody wykonywania tuneli; problemy przy budowie tuneli; aspekty ekonomiczne.

Abstract. Tunnel construction does not have a long history in Poland. The oldest railway tunnel in Poland is just over 160 years old. Currently, due to the rapid development of rail, road and collective urban transport (metro), tunnel construction is booming. With the development of tunnel construction, new techniques for the design and construction of this type of object appear. In the article, the authors presented the basic aspects of tunnels construction.

Keywords: tunnel construction methods; problems in tunnel construction; economic aspects.

Historia budownictwa tunelowego w Polsce, gdzie najstarszy tunel pochodzi z połowy XIX wieku, jest bardzo krótka. W ostatnim czasie zaczęto budować w naszym kraju coraz więcej tuneli i ciągle słychać o kolejnych planowanych inwestycjach – coraz ciekawszych i bardziej nowoczesnych. Tunele drogowe mają wiele zalet. Przede wszystkim pozwalają zbudować drogę w trudno dostępnych miejscach, bez konieczności znacznej zmiany krajobrazu lub niszczenia innych budynków. Stosuje się je w trudno dostępnych miejscach, gdzie wybudowanie zwykłej drogi byłoby kłopotliwe lub niebezpieczne. Często też stosuje się je w centrach miast po to, aby zredukować hałas, a także lepiej wykorzystać przestrzeń nad nimi. Nad tunełami można bowiem stworzyć np. kolejne drogi lub park. Wybudowanie tuneli jest jednak procesem drogim, czasochłonnym i dość skomplikowanym logistycznie. Niemniej, w Polsce w ostatnich latach liczba tuneli się zwiększa, a wiele z nich – i to całkiem dużych – jest w planach lub w trakcie budowy. W Polsce, zgodnie z [3], mamy 18 ukończonych tu-

neli drogowych oraz 28 kolejowych i tramwajowych, a w budowie 14 tuneli drogowych. Ponadto 6 tuneli jest planowanych. Na rysunku zaprezentowano lokalizację największych tuneli w Polsce.

Intensywnemu rozwojowi technologii budowy tuneli towarzyszy również postęp w dziedzinie ich projektowania, np. wykorzystywanie zaawansowanych metod i modeli obliczeniowych oraz świadomość konieczności prowadzenia badań geotechnicznych. Badania te nie mogą ograniczać się do bardzo typowych i rutynowych działań, ale muszą uwzględniać głębokość posadowienia tuneli, oddziaływanie na środowisko czy ingerencję w wody gruntowe. Zmieniły się również metody obserwacji oddziaływania budowy tuneli i głębokich wykopów pod stacje metra czy garaże podziemne. Stałe monitorowanie konstrukcji i sąsiednich obiektów jest obecnie normą. Obserwując budowy z ostatnich lat, widzimy, że nasza kadra inżynierska zetknęła się i poradziła sobie z trudnymi i nietypowymi rozwiązaniami technicznymi, np. z wykonaniem komory startowej tarczy zawieszinowej w Gdańsku z zastosowaniem technologii iniekcji strumieniowej, mrożeniem gruntu na stacji metra w Warszawie, wzmacnianiem podłoża czy posadowieniem dużych mostów przez Wisłę.



Mapa największych tuneli w Polsce – istniejących oraz planowanych [4]

Map of the largest tunnels in Poland – existing and planned [4]

Metody wykonywania tuneli

Metody wykonywania tuneli dzielą się na 3 podstawowe grupy: klasyczne, odkrywkowe oraz specjalne. Na wybór metody budowy w dużym stopniu mają wpływ warunki geologiczne, geotechniczne, hydrogeologiczne oraz sytuacja na powierzchni terenu, przede wszystkim jego zabudowa.

¹⁾ Politechnika Krakowska; Wydział Inżynierii Lądowej

^{*)} Adres do korespondencji: mfedorczak-cisak@pk.edu.pl

Klasyfikacja budowa tuneli. Rozwiązania klasyczne mają zastosowanie w głównej mierze w przypadku wykonywania tuneli głębokich. Można tu wymienić takie metody, jak np. austriacka, paryska, belgijska, niemiecka oraz najszerszej obecnie stosowana – konwencjonalna.

Techniki odkrywkowe stosuje się do wykonywania tuneli płytkich. W tej grupie znanych jest obecnie wiele metod podstawowych, takich jak metoda ścian szczelinowych, ścian berlińskich, ścian szczelnych, palisady, a także ich różnorodne technologiczne modyfikacje, np. palisady z pali lub paneli jet-grouting czy ściany paryskiej.

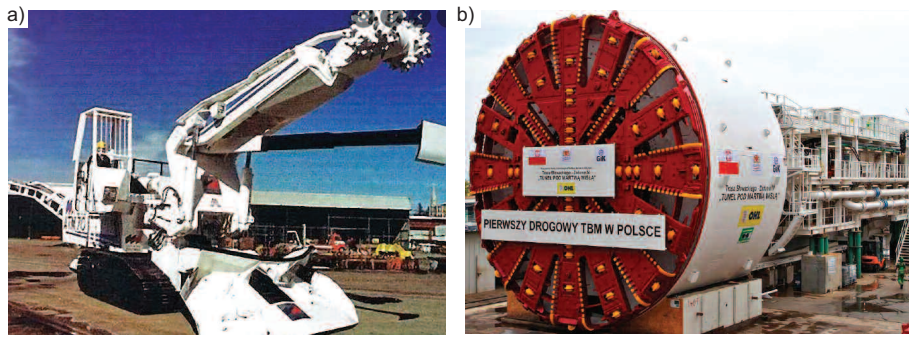
Metody specjalne budowy tuneli obejmują różnorodne, zaawansowane technologicznie i przez to niezmiernie interesujące sposoby budowy, które mogą mieć zastosowanie w przypadku trudnych warunków (w tunelach podwodnych, głęboko położonych lub w złożonych warunkach geotechnicznych).

Budowa tuneli w skałach i w gruncie

Budowa tuneli w skałach składa się z trzech podstawowych czynności: wykonanie wyrobiska; wzniesienie obudowy tymczasowej, zapewniającej jego stateczność; wykonanie obudowy stałej. Można wymienić dwa podstawowe sposoby urabiania skał:

- **mechaniczny** polegający na punktowym urabianiu za pomocą głowicy o niewielkiej średnicy, obracających się wokół osi poprzecznej lub wzdłużnej w stosunku do osi ramienia wysięgnika, na którym te głowice są osadzone (fotografia 1a) oraz urabianiu pełnym przekrojem za pomocą kołowej głowicy urabiającej, ale o średnicy przyszłego wyrobiska (fotografia 1b). Głowice te stanowią część urządzenia do drążenia tuneli o nazwie *Tunnel Boring Machine* (TBM), za pomocą materiałów wybuchowych, gdzie dużym problemem jest propagacja drgań wywołanych odstrzałem i możliwością przenoszenia się ich na budowlę znajdującą się na powierzchni terenu.

Budowa tuneli w gruntach. Do najbardziej rozpowszechnionych i najczęściej stosowanych metod budowy tuneli w gruntach należą: **metody odkrywkowe**,



Fot. 1. Mechaniczne urabianie skały: a) głowica urabiająca skałę punktowo [2]; b) TBM – gripper [1]

Photo 1. Mechanical quarrying of the rock: a) point rock quarrying heady [2]; b) TBM – gripper [1]

we, np. metoda metra mediolańskiego z jej odmianą (w Polsce przyjęły się odpowiednio nazwy – „metoda stropowa” i „metoda ścian szczelinowych”), metoda berlińska oraz metody tarczowe (tarcza tradycyjna, tarcze zmechanizowane, tzw. TBM). Zastosowanie **metody mediolańskiej** jest uzasadnione szczególnie wówczas, gdy technologia budowy ścian szczelinowych budzi obawy co do ich szczelności lub szczelności styków segmentów ścian, a projektant z góry zakłada, że będą one pełnić tylko rolę ścian oporowych, zapewniających stateczność pionowych skarp wykopu, a zasadnicza konstrukcja tunelu powstanie pomiędzy tymi ścianami. Z wielu względów – statycznych, wytrzymałościowych, usytuowania pod ruchliwymi arteriami, większego zagłębienia oraz w sytuacjach, kiedy czas zajęcia powierzchni terenu powinien być minimalizowany, najwłaściwsza jest **metoda mediolańska**.

Metoda berlińska może znaleźć zastosowanie do budowy podziemnych przejść łączących powierzchnie terenu z górną kondygnacją stacji, do budowy wentylatorni i innych płytko położonych obiektów towarzyszących.

Racjonalnym sposobem budowy tuneli szlakowych metra jest zastosowanie **tarcz zmechanizowanych – TBM**. Dzięki ich wykorzystaniu można będzie budować od 250 do co najmniej 300 m tunelu miesięcznie. Pomijając szczegółową klasyfikację wszystkich rodzajów tarcz zmechanizowanych, najważniejsze z nich to **tarcza zawieszona** (*Slurry Shield* (SS)) oraz **tarcza wyrównanych ciśnień gruntowych** (*Earth Pressure Balance* (EPB)). Obie

te tarcze pozwalają na drążenie tuneli poniżej poziomu wody gruntowej. Wybór właściwego rodzaju tarczy zależy od warunków gruntowych, warunków powierzchniowych, dostępności środków chemicznych stosowanych jako dodatki uplastyczniające w przypadku tarcz EPB i bentonitu, a także niektórych dodatków aktywujących, a w przypadku tarcz zawieszonych od dostępności miejsca do składowania urobku i jego ewentualnej utylizacji.

Problemy przy budowie tuneli

Istotną kwestią przy projektowaniu i budowie tuneli jest właściwe rozpoznanie geologiczne. Awaryjne i katastrofy, które zdarzały się przy drążeniu tuneli metodą klasyczną, często wynikały właśnie z niepełnego lub niekompletnego rozpoznania geologicznego. Podstawą do zminimalizowania ryzyka są wcześniej wykonywane badania, a przed przystąpieniem do prac w mieście niezmiernie istotna jest inwentaryzacja istniejących budynków. Przykładem jest głośna awaria przy budowie stacji metra warszawskiego „Powiśle”, związana z nierozpoznanym istnieniem zbiornika podziemnego, którego na etapie badań geotechnicznych, koncepcji i późniejszych analiz nie udało się wykryć. Ze względu na specyficzne uwarunkowania prowadzenia prac przy budowie tuneli można wymienić następujące problemy, mające wpływ na bezpieczeństwo budowy:

- wymiarowanie i projektowanie systemu obudowy tuneli;
- deformacje powierzchni terenu – nie ma tuneli, które nie wywierają

wpływu na powierzchnię i na nadziemne obiekty budowlane;

- stateczność strefy czoła przodka i konieczność zastosowania wyprzedzającego zbrojenia w przypadku drążenia metodami tradycyjnymi oraz górnictwami; przy słabym gruncie przed czołem przodka trzeba wytworzyć tzw. płaszcz, strefę wzmocnioną i tym samym zapewnić stateczność tego, co należy urabiać;

- zagrożenia w tunelach nie stanowią tąpnięcia, będące zjawiskami czysto górnictwami, lecz zjawiska dynamiczne występujące w tunelach bardzo głębokich, np. pod górami.

Aspekt ekonomiczny budowy

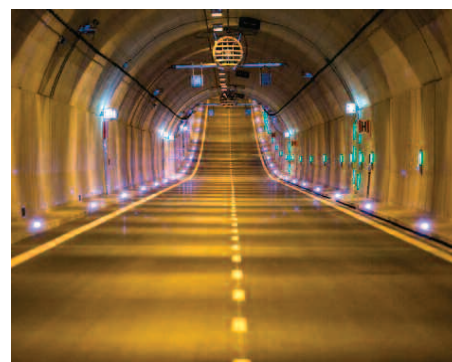
Należy walczyć z opinią, że budowanie ciągów komunikacyjnych pod ziemią jest kilkakrotnie droższe i trudniejsze niż na powierzchni. Przykładem jest metro w Amsterdamie, które powstało „w wodzie”, co nie przeszkadza w jego funkcjonowaniu. Obecnie, kiedy mamy w Polsce potencjał firmowy, technologiczny i finansowy (dotacje unijne), powinniśmy inwestować w tunele, bez względu na panujące błędne obiegowe opinie, że np. w Krakowie trzeba budować „w skałę”, we Wrocławiu „w wodzie”, a w Warszawie można napotkać tzw. kurzawki. W setkach miejsc na świecie występują o wiele trudniejsze warunki, ale nie powstrzymuje to inwestycji, a w ostatecznym rozrachunku ich realizacja okazuje się nie tak droga, jak pierwotnie sądzono, a ponadto jej koszty zwracają się wielokrotnie. W Polsce na perspektywy budowy i rozbudowy metra w dużych obszarach miejskich na przykładzie Krakowa, Warszawy oraz Wrocławia patrzymy na koszty przez koszty inwestycyjne, a nie perspektywicznie. Trzeba jednak szacować również koszty społeczne, gospodarcze, długoterminowy wielokrotny zwrot inwestycji – niestety, ten argument nie spotyka się ze szczególną aprobatą, a wynika to z małej świadomości społecznej i braku zainteresowania mediów (poza nielicznymi branżowymi wydawnictwami) o szerokim zasięgu. Wyniki analiz Metra Warszawskiego wskazują, że przewiezienie jednego pasażera metrem na długości 1 km jest kilkakrotnie

tańsze niż tramwajem na tym samym dystansie. Tymczasem np. wokół budowy centralnego odcinka II linii metra powszechnie posługiwano się najgorszą z możliwych kalkulacji – dzielono koszt całkowity na kilometr i otrzymywano bardzo wysoką kwotę, a następnie okrzyknięto warszawską inwestycję najdroższym metrem na świecie. Nie brano natomiast pod uwagę specyficznych uwarunkowań, w jakich realizowana jest budowa, warunków geologicznych, środków, które kalkulowane są w ramach inwestycji, ale nie dotyczą ściśle budowy metra, tylko wiążą się np. z przebudową całych obszarów m.in. przy nowo powstających stacjach itp. Zapomina się także o tym, że drogą inwestycję równoważą przyszłe efekty.

Wybrane realizacje tuneli w Polsce

Tunel drogowy pod Martwą Wisłą – 1377,5 m (fotografia 2). Jest to najdłuższy tego typu obiekt w Polsce wśród tuneli drogowych. Umiejscowiony jest poniżej ujścia Kanału Kaszubskiego do Martwej Wisły. W najniższym miejscu tunel przebiega 35 m pod taflą rzeki. Tunel budowano w latach 2011 – 2016. Całkowity koszt inwestycji to 1450 mld złotych, z czego 1150 mld zł pochodziło z UE. Tunel ma po dwa pasy ruchu w każdą stronę i jest to pierwsza podwodna przeprawa drogową, jaka powstała w Polsce.

Tunel Wisłostrady (Warszawa) – 930 m (kierunek południowy), 889 m (kierunek północny) (fotografia 3). Tunel znajduje się na lewym brzegu Wisły, na Powiślu. Obiekt budowano w latach 2001 – 2002. Koszt budowy to 210 mln zł. Tunel ma po trzy pasy ruchu w każdą stronę. Powstał w związku z budową mostu Świętokrzyskiego. Jezdnia mostu została zaprojektowana tuż nad poziomem jezdni Wisłostrady, wskutek czego przejazd wzdłuż Wisły trzeba było umieścić w tunelu. Tunel przyspieszył przejazd Wisłostradą w obu kierunkach oraz spowodował, że most Świętokrzyski stał się mostem lokalnym, przeznaczonym dla dojeżdżających do pracy z Pragi do centrum.



Fot. 2. Widok wnętrza tunelu pod Martwą Wisłą [5]

Photo 2. View of the tunnel inside under Martwa Wisła [5]



Fot. 3. Wjazd do tunelu Wisłostrady [6]

Photo 3. Entrance into the Wisłostrada tunnel [6]

Metro Warszawskie istnieje od 1995 r.; przewozi 147,2 mln pasażerów rocznie. Obecnie ma dwie linie, a trzecia jest planowana. W pierwszym etapie budowy III linii warszawskiego metra powstanie 6 stacji. Nowa linia zostanie przeprowadzona z funkcjonującej już od kilku lat stacji Stadion Narodowy.

Literatura

- [1] Herrenknecht Symposium Tunel Drogowy pod Martwą Wisłą 24 stycznia 2013 r. Centrum Wystawienniczo-Kongresowe AMBER EXPO.
- [2] Metody budowy tuneli metra w gruntach i w skałach – Inżynieria.com Available from: <https://inzynieria.com/tunele>.
- [3] Tunele w Polsce https://pl.wikipedia.org/wiki/Tunele_w_Polsce.
- [4] Tunele w Polsce w budowie i w planach. Kiedy padną kolejne rekordy? Available from: <https://warszawa.wyborcza.pl>.
- [5] Tunel pod Martwą Wisłą w Gdańsku – Inżynier Budownictwa [Internet]. [cited 2022 Feb 2]. Available from: <https://inzynerbudownictwa.pl/tunel-pod-martwa-wisla-w-gdansk-2/>.
- [6] Tunel Wisłostrady – Wikipedia, wolna encyklopedia [Internet]. [cited 2022 Feb 2]. Available from: https://pl.wikipedia.org/wiki/Tunel_Wislostrady.

Przyjęto do druku: 04.02.2022 r.