

# Ocena wielkości siły przeciskowej w technologii mikrotunelowania

Evaluation of the jacking force in microtunneling technology

ZUZANNA FYALL, LESZEK WYSOCKI

DOI10.36119/15.2025.5.4

Każdy producent rur przeciskowych określa maksymalną, dopuszczalną wielkość siły przeciskowej, której przekroczenie może doprowadzić do ich uszkodzenia. Tak więc dokładne określenie wielkości tej siły w trakcie realizacji przewodu w technologii mikrotunelowania ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa realizacji tych prac. Dokładne określenie wielkości siły przeciskowej jest też niezbędne do określenia odległości pomiędzy studniami startowymi i odbiorczymi. Odległość ta ma istotne znaczenie dla kosztów realizacji przewodu, ponieważ determinuje liczbę studni na trasie przewodu, a koszt budowy studni może być większy od kosztów budowy samego przewodu. W pracy tej podjęto próbę teoretycznego oszacowania wielkości siły przeciskowej i weryfikacji tych wyników na podstawie rzeczywistej wielkości siły pomierzonej w trakcie realizacji określonego przewodu kanalizacyjnego. *Słowa kluczowe: przewody podziemne, mikrotunelowanie, siła przeciskowa, infrastruktura podziemna*

Every manufacturer of jacking pipes specifies the maximum permissible jacking force, the exceeding of which may result in damage to the pipes. Therefore, the precise determination of the jacking force during the construction of the pipe when using microtunneling technology is crucial for the safety of this procedure. The determination of the jacking force is also necessary to specify the distance between the starting and receiving wells. This distance is of significant importance for the costs of the construction of the pipe because it determines the number of wells on the pipe's route. The cost of building a well may be higher than the cost of building the pipe itself. This paper attempts to both theoretically estimate the jacking force and verify the obtained results based on the value of the actual force measured during the construction of a specific sewage pipe.

*Keywords: underground conduits, microtunneling, jacking force, underground infrastructure*

## Wprowadzenie

Oszacowanie wielkości siły przeciskowej jest zagadnieniem stosunkowo trudnym, przede wszystkim z uwagi na zmienność parametrów gruntu na trasie realizowanych przewodów. Jakość i pewność wyników rozpoznania parametrów geotechnicznych gruntu na trasie realizowanego przewodu zależą od odległości pomiędzy otworami badawczymi. Niestety, dla ograniczenia kosztów badań, częstą praktyką jest stosowanie zbyt dużych odległości pomiędzy tymi otworami, co prowadzić może do błędnego oszacowania, istotnych dla określenia wielkości siły przeciskowej parametrów gruntu. Rodzaj i parametry gruntu mają istotny wpływ na wielkość współczynnika tarcia pomiędzy rurą a ośrodkiem gruntowym oraz na opór czoła tarczy. Istnieje wiele teorii dotyczących obliczania wielkości siły przeciskowej (teoria Strieglera, teoria Paula, teoria Kalisza), stosuje się też metodę statystyczną [1,

2]. Na podstawie własnych doświadczeń autorów opartych na obserwacjach z realizacji przewodów kanalizacyjnych o małych średnicach (od 300 do 800 mm), wielkość siły przeciskowej określona na podstawie teorii Kalisza [3] jest najbliższa wielkości obserwowanych w praktyce. W dalszej części artykułu dokonano analizy wpływu różnych czynników na wielkość obliczeniowej siły przeciskowej według teorii Kalisza i jej porównanie z wielkością rzeczywistej siły jaka była niezbędna do zrealizowania określonego przewodu.

## Obliczeniowa wielkość siły przeciskowej

Według Kalisza wielkość siły przeciskowej wyznaczamy ze wzoru (1) [3]:

$$T = \mu \cdot L [2(P_1 + P_2) + g] + G \quad (1)$$

$$P_1 = 0.7 \cdot \gamma_g \cdot H \cdot D \quad (2)$$

$$P_2 = 0.8P_1 \quad (3)$$

$$G = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot q \quad (4)$$

gdzie:

- $\mu$  – współczynnik tarcia pomiędzy rurą przeciskową, a gruntem,
- $L$  – długość przecisku,
- $P_1, P_2$  – pionowy i poziomy nacisk gruntu na 1 m rury,
- $g$  – ciężar własny rury,
- $G$  – opór czołowy rury przeciskowej,
- $\gamma_g$  – ciężar objętościowy gruntu,
- $H$  – wysokość sklepienia gruntowego,
- $D$  – średnica rury,
- $r$  – promień rury,
- $q$  – współczynnik zależny od rodzaju gruntu. ( $q = 50$  kN/m do 600 kN/m).

Pewnym problemem jest określenie wielkości oporu czołowego rury przeciskowej „ $G$ ” ponieważ brak jest dokładnych danych dotyczących wielkości współczynnika „ $q$ ”. Według danych literaturowych [3] wielkość tego współczynnika, w zależności od rodzaju gruntu,

zmienia się od 50 kN/m do 600 kN/m. Przy tak szerokim zakresie zmienności współczynnika ewentualny błąd w przyjęciu jego wielkości prowadzić może do zaniżenia lub zawyżenia obliczeniowej wielkości siły przeciskowej. Błędne oszacowanie siły przeciskowej skutkować może nieuzasadnionym wzrostem kosztów realizacji określonego przewodu lub awarii w trakcie realizacji prac. Wzrost kosztów może być wynikiem konieczności zmniejszenia odległości pomiędzy studniami startową i odbiorczą dla zmniejszenia błędnie oszacowanej wielkości siły przeciskowej. Koszt budowy studni jest zwykle bardzo wysoki i stąd wynika potrzeba bardzo szczegółowej analizy wielkości potrzebnej siły przeciskowej.

Kędracki [3] proponuje modyfikację wzoru (4) poprzez wyznaczenie tej wielkości z zależności (5):

$$G = c \cdot s \quad (5)$$

gdzie:

- c – spójność gruntu,  
s – zewnętrzna powierzchni rury.

Określenie wielkości oporu czołowego „G” według zależności (5) jest znacznie dokładniejsze ponieważ opiera się na dostępnych dla każdego projektu danych dotyczących parametrów gruntu. Oczywiście, jak to już podkreślono powyżej, konieczne jest dokładne rozpoznanie warunków gruntowych na trasie realizowanego przecisku. Wykonując obliczenia wielkości siły przeciskowej według wzoru (1) z uwzględnieniem modyfikacji (5) otrzymujemy stosunkowo dużą wielkość oporu czołowego „G”. Taki opór czołowy wystąpić może tylko w fazie wstępnej gdy konieczne jest wywołanie ruchu maszyny wierzącej, następnie ulega znaczącej redukcji, doświadczenia własne autorów wskazują, że redukcja może osiągać nawet 100 % siły wstępnej. Dla spowodowania ruchu maszyny wierzącej konieczne jest pokonanie sił tarcia oraz dociśnięcie maszyny, aby rozpoczęło się skrawanie gruntu (opór czoła). W trakcie wiercenia, gdy maszyna znajduje się w ruchu, znacznemu zmniejszeniu ulega nie tylko opór czołowy, ale także wielkość siły tarcia.

Do określenia wielkości siły tarcia bardzo istotne jest określenie wielkości współczynnika tarcia pomiędzy rurą przeciskową a ośrodkiem gruntowym. Dla ograniczenia wielkości tego współczynnika stosuje się środki smarujące, najczęściej oparte na bentonicie z ewentualnym dodatkiem polimerów. Według danych producentów tych środków i producentów rur, w przypadku rur o bardzo gładkich ściankach współczynnik tarcia „μ” może zostać zreduko-

wany do wielkości 0,1. W przypadku rur o chropowatych ściankach i braku środka smarującego współczynnik tarcia może osiągnąć wielkość maksymalną  $\mu = \tan(\phi - \text{kąt tarcia wewnętrzny w gruncie})$ . Dla piasku wielkość współczynnika tarcia pomiędzy chropowatą ścianką rury a gruntem może osiągać wielkość powyżej 0,6, tak więc współczynnik tarcia pomiędzy rurą przeciskową a gruntem, może różnić się aż **sześciokrotnie**, w zależności od technologii realizacji prac. Potwierdza to duże znaczenie stosowania środka smarującego, jego jakości i jakości dozowania. W pracy [3] zamieszczono wyniki badań współczynnika tarcia pomiędzy powierzchnią betonu a gruntem (aparaturę skrzynkową), wyniki tych badań zestawiono w tab.1.

**Tab.1. Zestawienie wielkości współczynnika tarcia dla powierzchni betonowych**

**Tab.1. List of friction coefficient values for concrete surfaces**

| Rodzaj gruntu     | Powierzchnia betonu | Bez bentonitu |      | Z bentonitem |      |
|-------------------|---------------------|---------------|------|--------------|------|
|                   |                     | c [kPa]       | μ    | c [kPa]      | μ    |
| Gлина piaszczysta | gładka              | 10            | 0,36 | 0            | 0,10 |
|                   | chropowata          | 18            | 0,46 | 12           | 0,15 |
| Piasek gliniasty  | gładka              | 15            | 0,43 | 0            | 0,12 |
|                   | chropowata          | 20,9          | 0,52 | 10           | 0,22 |
| Piasek drobny     | gładka              | 0             | 0,48 | 0            | 0,16 |
|                   | chropowata          | 0             | 0,63 | 3            | 0,26 |

Zwrócić należy uwagę, że wyniki wykonanych badań potwierdziły stosunkowo mały wpływ chropowatości materiału na wielkość współczynnika tarcia, znacznie mniejszy od wpływu działania środka smarującego. W praktyce projektowej wielkości zestawione w tab.1 traktować należy jako orientacyjne ponieważ dotyczą badań w warunkach laboratoryjnych w aparacie skrzynkowym. W pracy [4] zamieszczono wielkości współczynnika tarcia pomiędzy rurą stalową a gruntem dla przypadku, gdy nie stosuje się środka smarującego. Według tych danych współczynnik tarcia w zależności od rodzaju gruntu osiąga wielkość od 0,45 do 0,83.

Na podstawie własnych obserwacji autorów z licznych realizacji przewodów kanalizacyjnych w technologii mikrotunelowania, wielkość współczynnika tarcia „μ” na poziomie 0,1 jest praktycznie nieosiągalna. W praktyce do obliczeń, w przypadku wysokiej jakości materiałów i wysokiej jakości prac, zalecamy przyjmowanie współczynnika tarcia „μ” o wielkości nie mniejszej od 0,15.

### Weryfikacja obliczeniowej wielkości siły przeciskowej

Celem weryfikacji metod obliczeniowych stosowanych w praktyce projekto-

wej do określania wielkości sił przeciskowych wykonano wariantowe obliczenia wielkości tej siły dla przewodu kanalizacyjnego realizowanego z rur GRP o średnicy DN 400 i dopuszczalnej, określonej przez producenta, sile przeciskowej do 350 kN. Wyniki tych obliczeń zweryfikowano w trakcie realizacji przewodu. Przecisk o długości około 60 m realizowany był pod drogą o dużym natężeniu ruchu.

Dla potrzeb realizacji przewodu wykonano badania warunków gruntowo-wodnych w dwóch otworach badawczych. Wyniki tych badań potwierdziły, że przewód realizowany będzie w glinie piaszczystej na granicy stanu twardoplastycznego i półzwartego.

Dla określenia możliwości realizacji przewodu z określonych rur oraz doboru parametrów maszyny wierzącej wykonano wariantowe obliczenia wielkości niezbędnej dla zainstalowania przewodu siły przeciskowej według zależności (1), rozważano następujące przypadki:

1. Nad przewodem powstanie sklepienie, a współczynnik tarcia osiąga wielkość  $\mu = 0,15$  (stosowanie „smarowania”).
2. Nad przewodem powstanie sklepienie, a współczynnik tarcia osiąga wielkość  $\mu = 0,4$  (brak „smarowania”).
3. Nad przewodem nie powstanie sklepienie, a współczynnik tarcia osiąga wielkość  $\mu = 0,4$  (brak „smarowania”).
4. Nad przewodem powstanie sklepienie a współczynnik tarcia osiąga wielkość  $\mu = 0,4$  (brak „smarowania”), obliczenia według zmodyfikowanego wzoru Kędrackiego.
5. Nad przewodem nie powstanie sklepienie, a współczynnik tarcia osiąga wielkość  $\mu = 0,15$  (stosowanie „smarowania”).

Wyniki wykonanych obliczeń wielkości siły przeciskowej dla poszczególnych przypadków zestawiono w tab. 2.

**Tab. 2. Zestawienie wielkości obliczeniowej siły przeciskowej dla różnych przypadków realizacji**  
**Tab.2. List of the calculated values of the jacking force for different implementation cases**

| Przypadek | Wsp. tarcia „μ” | Opór czoła [kN] | Siła wiskająca [kN] |
|-----------|-----------------|-----------------|---------------------|
| 1         | 0,15            | 94              | 199                 |
| 2         | 0,40            | 94              | 377                 |
| 3         | 0,40            | 94              | 1630                |
| 4         | 0,40            | 330             | 659                 |
| 5         | 0,15            | 94              | 665                 |

W przypadku opisywanej realizacji możliwe było wystąpienie każdego z rozważanych przypadków obliczeniowych. Zwrócić należy uwagę, że wielkość obliczeniowej siły przeciskowej dla przypadku 1 jest aż ośmiokrotnie (!) mniejsza od

wielkości siły przeciskowej dla przypadku 3. Prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych przypadków jest oczywiście zróżnicowane. Biorąc pod uwagę rodzaj gruntu (grunt spoisty – glina piaszczysta), małą średnicę przewodu oraz jego zagłębienie „h” spełniające zależność  $h/D > 2$  prawdopodobieństwo braku sklepienia nad przewodem jest stosunkowo małe. W gruntach spoistych dokładne, równomierne pokrycie powierzchni rur środkiem smarującym jest bardzo trudne, dlatego na etapie określania niezbędnej wielkości siły przeciskowej zawsze wskazane jest oszacowanie zakresu tej siły dla różnych wielkości współczynnika tarcia „ $\mu$ ”.

Omawiany przewód realizowany był z komory startowej wykonanej z profili stalowych typu GZ-4 z betonowym blokiem oporowym. Jako środek smarujący używana była mieszanina bentonitowa z dodatkiem polimeru. W odległości około 50 m od komory startowej siła wciskająca osiągnęła wielkość 287 kN. Po osiągnięciu tej odległości nastąpiła nieplanowana przerwa trwająca dwie doby. Dla spowodowania przemieszczenia maszyny wierzącej po przerwie konieczne było użycie siły 626 kN. Po spowodowaniu ruchu maszyny wielkość siły wciskającej uległa radykalnemu obniżeniu i w końcowej fazie osiągnęła wielkość 320 kN. Zwrócić należy uwagę, że wielkość siły wciskającej w momencie startu po nieplanowanej przerwie była znacznie większa od dopuszczalnej siły przeciskowej określonej przez producenta rur na poziomie 350 kN. Mimo tak poważnego przekroczenia wielkości siły przeciskowej nie stwierdzono żadnych uszkodzeń rur, przewód przeszedł też pomyślnie próbę szczelności.

### Podsumowanie

Wyniki wykonanych obliczeń niezbędnej wielkości siły wciskającej oraz wyniki pomiarów wielkości tej siły w trakcie realizacji pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Konieczne jest stosowanie wszelkich zabiegów poprawiających skuteczność smarowania w trakcie realizacji przecisku.
- Niedopuszczalne jest stosowanie przerw w trakcie realizacji przecisku pomiędzy komorą startową a odbiorczą.
- Wielkość siły wciskającej określona na podstawie zmodyfikowanego przez Kędrackiego wzoru (1) określającego sposób wyznaczania oporu czoła tarczy dotyczy sytuacji gdy konieczne jest wywołanie ruchu maszyny po wystąpieniu dłuższej przerwy.

Do zabiegów poprawiających skuteczność rozprowadzania środka smarującego zaliczyć można:

- Zastosowanie wysokiej jakości mieszaniny smarującej. Wyższy koszt materiału z całą pewnością zostanie zrekomensowany wydłużeniem odcinka możliwego do zrealizowania w jednym cyklu oraz poprawą bezpieczeństwa realizacji prac.
- Zmniejszenie odległości pomiędzy rurami z dyszami do włączania środka smarującego. Zmiana ta oczywiście wiąże się z pewnym wzrostem kosztów realizacji i należy rozważyć efekty ekonomiczne związane z możliwością wydłużenia odcinków realizowanego przewodu.
- Zwiększenie ciśnienia podawania środka smarującego. W tym przypadku konieczna jest jednak analiza wpływu tego ciśnienia na uszczelki w przewodzie oraz na wielkość naprężeń w ściankach rur. Producent rur określa wielkość dopuszczalnego ciśnienia zewnętrznego, które nie spowoduje uszkodzenia uszczelki.

Wykonane pomiary potwierdziły, że dokładne rozprowadzenie środka smarującego jest stosunkowo trudne i uzyskanie współczynnika tarcia w przeciętnych warunkach realizacji na poziomie poniżej 0,15, a nawet 0,2 jest praktycznie nieosiągalne.

Każda, nawet krótka przerwa w trakcie realizacji określonego odcinka przewodu pomiędzy komorą startową i odbiorczą wiąże się z koniecznością zwiększenia siły przeciskowej. W opisywanym przypadku po 48 godzinnej przerwie, dla kontynuowania prac konieczne było zwiększenie siły przeciskowej o ponad 100 %. Obserwacje autorów z innych realizacji wskazują, że nawet krótka przerwa (1-2 godzinna) powoduje znaczny wzrost niezbędnej wielkości siły przeciskowej i dlatego konieczna jest odpowiednia organizacja prac wykluczająca jakiegokolwiek przerwy. Wzrost wielkości siły przeciskowej zależy nie tylko od długości przerwy, ale także od innych czynników, zwłaszcza od rodzaju gruntu i jest większy w gruntach spoistych.

Dla dokładniejszego określenia wielkości siły przeciskowej konieczne są obserwacje z realizacji tych przewodów w różnych warunkach gruntowo-wodnych i dla różnych materiałów rur. W literaturze branżowej często publikowane są sprawozdania z realizacji przewodów w technologii mikrotunelowania. W sprawozdaniach tych powinna znaleźć się informacja o wielkości siły przeciskowej, poszerzyłoby to bazę danych i przyczyniłoby się do poprawy jakości projektów realizacji przewodów w technologii mikrotunelowania.

### LITERATURA

- Madryas C., Kolonko A., Szot A., Wysocki L.: Mikrotunelowanie. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2012.
- Chapman D. N., Ichioka Y.: Prediction of jacking forces for microtunnelling operations Trenchless Technology Res., 1999 r. vol. 14, nr 1, s. 31-41.
- Furtak K., Kędracki M.: Podstawy budowy tuneli. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2005.
- Zwierzchowska A.: Technologie bezwykopowej budowy sieci gazowych, wodociągowych i kanalizacyjnych. Skrypt Politechniki Świętokrzyskiej nr 441, Kielce 2009.