

BUILDER  
FOR THE  
FUTUREBUILDER  
FOR THE  
YOUNG  
ENGINEERS

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.

**mgr inż. Gabriela Skoreńska**  
Politechnika Wroclawska, Wydział  
Budownictwa Lądowego i Wodnego  
**mgr inż. Wojciech Knafel**

**OPIEKUN NAUKOWY**  
**prof. dr hab. inż. Jerzy Hoła**  
Zakład Budownictwa Ogólnego, Wydział  
Budownictwa Lądowego i Wodnego,  
Politechnika Wroclawska

Metoda dotarła do Europy z Japonii na początku lat siedemdziesiątych. Pierwsze realizacje z jej zastosowaniem w Polsce pochodzą z początku lat dziewięćdziesiątych. Polega ona na niszczeniu naturalnej struktury gruntu za pomocą iniektu wprowadzanego pod ciśnieniem rzędu 30–50 MPa z wydatkiem 50–450 l/min oraz mieszaniu i częściowej wymianie istniejącego podłoża z czynnikiem wiążącym. Formowane są w ten sposób elementy iniekcyjne (kolumny, ściany, płyty, bloki) będące fragmentami zeskalonego gruntu, których wytrzymałość na ściskanie w zależności od rodzaju ośrodka gruntowego może wynosić odpowiednio: 1 MPa w gruntach organicznych, 5 MPa w glinach, 15 MPa w przypadku formowania kolumn w piaskach oraz 20 MPa w ośrodku żwirowym.

W trakcie prowadzenia prac wydobywa się urobek, czyli nadmiar mieszanki iniektu z gruntem, wypływający na powierzchnię przez przestrzeń między żerdzią a ścianą otworu iniekcyjnego. Choć w większości przypadków materiał ten, nazywany także zrzutem technologicznym, jest traktowany jako odpad wymagający usunięcia z placu budowy i utylizacji, może być z powodzeniem wykorzystany jako warstwa wyrównująca pod przyszłą konstrukcję. Parametry urobku po stwardnieniu są niewiele gorsze od parametrów materiału kolumn [1]. Ilość urobku zależy od wielu czynników, jednak szacuje się, że może stanowić powyżej 40% objętości zaczynu zużytego na prace iniekcyjne.

# JET GROUTING W PRAKTYCE INŻYNIERSKIEJ

*Jet grouting*, czyli wysokociśnieniowa iniekcja strumieniowa mająca na celu poprawę nośności gruntu, znajduje szerokie zastosowanie w budownictwie lądowym oraz wodnym i może być wykorzystywana w niemal wszystkich rodzajach gruntów.

Ze względu na sposób wykonywania, rodzaj materiału oraz charakterystyczny nieregularny kształt otrzymanych elementów, nazywane kolumn *jet grouting* palami nie jest poprawne. Niejednorodność cementogruntu skłania do zaklasyfikowania iniekcji wysokociśnieniowej jako jednej z metod wzmocnienia podłoża. Wymagania dotyczące projektowania, wykonywania, badania i monitorowania robót iniekcji strumieniowej zawiera norma [2]. Wytyczne w niej zawarte nie przedstawiają jednak szczegółowych procedur obliczania nośności oraz osiadań kolumn, dlatego proces projektowania prac iniekcyjnych opiera się w znacznym stopniu na doświadczeniu projektanta. Norma [2] nie precyzuje także definicji wspomnianego iniektu, w praktyce jednak określa się tym terminem zaczyn cementowy znajdujący zastosowanie w przypadku systemu pojedynczego i podwójnego powietrznego.

## Systemy iniekcji wysokociśnieniowej

W zależności od ilości zastosowanych mediów oraz sposobu ich podawania wyróżnia się trzy systemy iniekcji: pojedynczy, podwójny – wodny i powietrzny – oraz potrójny.

Najczęściej stosowany system pojedynczy opiera się na wykorzystaniu strumienia jednej cieczy, przeważnie zaczynu cementowego. W przypadku systemu podwójnego wtlaczanie iniektu (zazwyczaj zaczynu cementowego) jest wspomagane przez inne medium: sprężone

powietrze (system podwójny powietrzny) lub wodę (system podwójny wodny), wspomagające odpajanie gruntu. Potrójny system iniekcji zakłada, że niszczenie struktury gruntu uzyskiwane jest przez wysokoenergetyczny strumień wody wspomagany przez sprężone powietrze, natomiast cementacja gruntu następuje w wyniku podawania oddzielnego strumienia zaczynu.

Zastosowany system iniekcji wpływa na jednostkowe zużycie cementu, czas potrzebny na formowanie kolumn, parametry cementogruntu (w tym wytrzymałość) oraz średnice otrzymywanych elementów. Obok rodzaju systemu iniekcji na możliwe średnice kolumn mają wpływ także inne czynniki, takie jak: rodzaj i stan gruntu, kształt i usytuowanie dysz iniekcyjnych, konstrukcja monitora iniekcyjnego oraz parametry technologiczne iniekcji (ciśnienie iniekcji, liczba i średnica dysz iniekcyjnych, prędkość podciągania żerdzi iniekcyjnej, prędkość obrotowa żerdzi iniekcyjnej, gęstość zaczynu) a także, w przypadku systemu podwójnego i potrójnego, wydatek oraz ciśnienie powietrza i/lub wody. Zwykle wymiary średnic formowanych elementów wynoszą od 0,4 m do ponad 3,0 m. Już na etapie projektowania należy mieć na uwadze wiele czynników determinujących średnicę kolumn oraz pamiętać o tym, że przewidywana średnica elementów iniekcyjnych powinna być zweryfikowana po wykonaniu, dlatego za dobrą praktykę uznaje się odkopanie gór-

nych części gotowych kolumn i skuwanie ich głowic (rys. 1.). Obecnie prowadzone są prace dotyczące przewidywania średnic kolumn *jet grouting*, również z zastosowaniem metod heurystycznych [4].

### Wykonywanie kolumn *jet grouting*

Specyfika technologii iniekcji wysokociśnieniowej wymaga ściśle określonego węzła technologicznego, którego przykład pokazano na rys. 2.

Formowanie kolumn iniekcyjnych odbywa się w następujących etapach:

- ewentualne przewierthy przez istniejące fundamenty;
- wiercenie otworu w podłożu na projektowaną głębokość za pomocą przewodu iniekcyjnego, którego dolna część jest uzbrojona w narzędzie wierzące umożliwiające jednoczesne prowadzenie iniekcji;
- formowanie kolumny iniekcyjnej;
- ewentualne osadzenie zbrojenia;
- ewentualne uzupełnienie iniektu w przypadku opadania poziomu cementogruntu.

Formowanie kolumn może odbywać się od dołu do góry z ciągłym podciąganiem (przebieg spiralny) lub skokowo (co 4–5 cm przy systemie pojedynczym oraz 4–8 cm dla systemu podwójnego). W kolumnach iniekcyjnych stosowane jest zbrojenie sztywne: kształtowniki stalowe (najczęściej dwuteowniki), rury grubościennne, elementy systemowe (np. typu TITAN), które należy osadzić bezpośrednio po uformowaniu kolumny, przed związaniem cementogruntu. W zależności od specyfiki przedsięwzięcia montowanie zbrojenia może odbywać się ręcznie bądź za pomocą koparki, dźwigu czy wyciągarki wiertnicy. Ze względu na heterogeniczną strukturę materiału iniekcyjnego nie stosuje się koszy zbrojeniowych.

W kontekście kolejności formowania palisady z kolumn *jet grouting* w gruncie norma [2] wyróżnia dwie metody: „świeży w świeżym” oraz „pierwotny – wtórny”, co schematycznie ilustruje rys. 3.

Pierwsza z wymienionych metod zakłada wykonywanie kolumn jedna po drugiej bez przerw na stwardnienie cementogruntu. Taki sposób często jest niemożliwy, ponieważ w trakcie procesu formowania kolumn w technologii iniekcji strumieniowej podłoże lokalnie zostaje upłynnione, a jego parametry chwilowo ulegają osłabieniu. Dlatego w przypadkach, w których kolumny *jet grouting* wykonuje się pod istniejącymi fundamentami, w celu ograniczenia ich osiadań znajduje zastosowanie drugi sposób. Metoda „pierwotny – wtórny” pozwala na formowanie kolumny dopiero po stwardnieniu sąsiednich. W praktyce oznacza to formowanie co czwartej, piątej kolumny w jednym rzędzie. Rozstaw kolejno wykonywanych kolumn uzależniony jest od stanu technicznego podbijanego obiektu.

### Zastosowanie iniekcji wysokociśnieniowej

Technologia iniekcji wysokociśnieniowej znajduje zastosowanie zarówno przy wzmacnianiu podłoża gruntowego, jak i formowaniu przesłon ograniczających napływ wody.

Wzmacnianie, czyli cementacja gruntu, dotyczy najczęściej posadowienia budynków sąsiadujących z głębokim wykopem (tzw. podchwycenie fundamentów), przebudowy i napra-



Rys. 1. Przykład odświeżenia kolumny – pomiar średnicy kolumny pionowej [5]



Rys. 2. Typowy węzeł technologiczny: a) silosy na cement, b) mieszalnik, c) pompa wysokociśnieniowa, d) agregat, e) wiertnica [5]

wy istniejących obiektów, w tym też zabytkowych lub charakteryzujących się złym stanem technicznym (brak drgań podczas wiercenia). Metoda *jet grouting* może znaleźć zastosowanie przy formowaniu tuneli w gruntach nieskalistych, przesłon poziomych, konstrukcji oporowych czy kolumn stanowiących posadowienie głębokie.

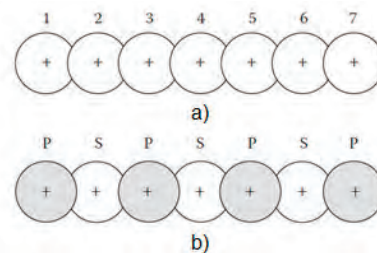
Przesłony uszczelniające mają za zadanie zabezpieczanie wykopów i tworzenie nieprzepuszczalnych ekranów dostosowanych do zmieniających się warunków wodnych i geotechnicznych. Mogą przyjmować formę szczelnej palisady, pionowej przegrody, przekrycia, poziomych ekranów („korków”) uszczelniających lub stanowić dodatkowe elementy uszczelniające istniejącej palisady lub zapory.

### Przykładowe realizacje

Niejednokrotnie zastosowanie technologii *jet grouting* wydaje się być jedynym możliwym rozwiązaniem pozwalającym na realizację skomplikowanego zadania geotechnicznego.

### Obiekt unieszkodliwiania odpadów wydobywczych Żelazny Most

Zastosowanie technologii *jet grouting* umożliwiło wykonanie posadowienia obiektu unieszkodliwiania odpadów wydobywczych przy trudnych warunkach gruntowo-wodnych. W miejscu planowanej inwestycji stwierdzono wy-



Rys. 3. a) „świeży w świeżym”, b) Kolejność „pierwotny – wtórny” (P – pierwotna i S – wtórna kolumna) [3]

stępowanie warstw piasków luźnych, średnio zagęszczonych i zagęszczonych podścielonych od głębokości 1,5–2,4 m p.p.t. ilami i ilami piaszczystymi, zalegającymi poniżej maksymalnej głębokości badań, tj. 7,0 m. Woda gruntowa wystąpiła już 0,5 m p.p.t., co w połączeniu z gruntami spoiwymi uniemożliwiło pośrednie posadowienie obiektu.

Zaprojektowano przesłonę poziomą z kolumn *jet grouting*, składającą się ze 111 sztuk kolumn o średnicach 1,3 m oraz 1,5 m. W celu doboru i optymalizacji parametrów technologicznych (takich jak: ciśnienie iniekcji, prędkość podnoszenia żerdzi, prędkość obrotowa żerdzi, rozmiar dysz iniekcyjnych) zapewnianym wykonaniem elementów o pożądanym średnicach wykonano kolumny próbne.

Ograniczono napływ wody do wykopu poprzez zabezpieczenie komory po obwodzie

ściankami szczelnymi, a następnie uformowano kolumny *jet grouting* zabezpieczające dno wykopu. Niewątpliwie głównym utrudnieniem był występujący rurociąg (rys. 4.), którego trasa przebiegała przez centralną część komory, a jego usunięcie na czas realizacji przestrony nie było możliwe. Szczelność w miejscu trudno dostępnym dla wiertnicy zapewniono poprzez wykonanie kolumn pochyłych o średnicy 1,5 m z obu stron rurociągu wzdłuż przebiegu jego trasy.

Kolumny wykonywano podwójnym systemem iniekcji w kolejności „świeży w świeżym”, w rezultacie otrzymano podłoże cementowo-gruntowe o miąższości 3,00 m, umożliwiając posadowienie obiektu, zapewniając szczelność oraz odpowiednie parametry posadowienia konstrukcji.

### Copernicus Square w Warszawie

Projekt geotechniczny dla inwestycji Copernicus Square obejmował zabezpieczenie wykopu i wzmocnienie istniejących fundamentów na potrzeby wykonania komory zewnętrznej i wewnętrznej przy budynkach zlokalizowanych na terenie dawnej Elektrociepłowni Powiśle w Warszawie. Zabezpieczenie wykopu komory zewnętrznej w większości zagwarantowała ścianka szczelna, zaś w miejscach, gdzie odległość wykopu od lica istniejących budynków wynosiła mniej niż 80 cm, konieczne było zastosowanie innej metody, dlatego obudowy komór wewnętrznych w całości ukształtowała zbrojona palisada w technologii *jet grouting*, mająca również za zadanie podchwycenie sąsiadujących fundamentów istniejącego zabytkowego kompleksu (rys. 5.).

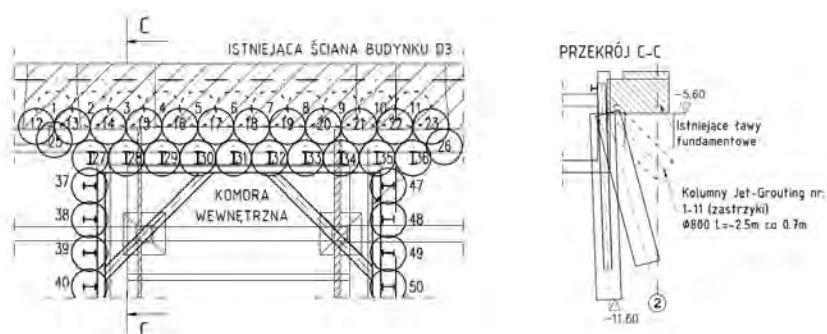
Ze względu na znaczną głębokość komór zaprojektowano oczepcy z kształtowników HEB 200, które po skuciu części kolumn dospawano do odsłoniętego zbrojenia kolumn. Rozparcia narożne umożliwiające prowadzenie robót ziemnych bez przeszkód, wykonane z rur 219,1/8 mm, miały na celu ograniczenie odkształceń obudowy wykopu, minimalizację osiadań i uszkodzeń podchwytywanych fundamentów (rys. 6.).

We wcześniej wykonanych badaniach geotechnicznych sporządzono następujący profil gruntowy: do głębokości 1,0 m poniżej istniejących fundamentów, tj. 6,6 m p.p.t. występowały nasypy niekontrolowane z domieszką piasków i pyłów; poniżej piaski średnie średnio zagęszczone o miąższości 6,0 m oraz ility w stanie twardoplastycznym.

Część prac realizowano wewnątrz budynku z wykorzystaniem wiertnicy małogabarytowej (rys. 7.). Szczególnie w przypadku prowadzenia prac w pomieszczeniach zamkniętych istotną jest organizacja frontu robót ograniczająca uciążliwości wynikające ze specyfiki technologii, na przykład dokładne zaplanowanie kolejności wykonywania kolumn oraz umożliwienie odpływu urobku przez rów technologiczny.



Rys. 4. Rurociąg przebiegający przez centralną część placu budowy [5]



Rys. 5. Schemat obudowy wykopu od strony podbijanych fundamentów [5]



Rys. 6. Widok na obudowę wykopu [5]



Rys. 7. Wykonywanie kolumn wiertnicą małogabarytową wewnątrz budynku [5]

Ogółem wykonano 137 sztuk kolumn o średnicach 0,8 m (w rozstawie co 0,6 m – 0,8 m) oraz 1,0 m (w rozstawie co 0,9 m, 1,0 m) o długościach od 2,5 m do 9,0 m. Łączna ilość kolumn *jet grouting* wyniosła 696,3 mb, w tym: 151,8 mb kolumn o średnicy 1,0 m w systemie dwustrumieniowym oraz 544,5 mb kolumn o średnicy 0,8 m w systemie jednostrumieniowym.

### Podsumowanie

Niewątpliwie technologia iniekcji wysokociśnieniowej *jet grouting* znajduje szerokie zastosowanie w praktyce inżynierskiej, niejednokrotnie stanowiąc jedyne bądź optymalne rozwiązanie. Należy jednak pamiętać, że w dalszym ciągu wyraźnie zauważalny jest deficyt badań eksperymentalnych dotyczących wpływu iniekcji ciśnieniowej na przykład na zamierzone średnice kolumn i ich cechy mechaniczne czy fizyczne. Nierzadko arbitralnie przyjmowane założenia na etapie projektowania muszą być sprawdzane doświadczalnie przed przystąpieniem do prac w konkretnym ośrodku gruntowym. Takie podejście może prowadzić do istotnych rozbieżności pomiędzy zało-

żeniami projektowymi a rzeczywistymi charakterystykami kolumn *jet grouting*, co może skutkować błędnym oszacowaniem czasu i kosztów realizacji zadania.

Niedostateczna wiedza na temat technologii wpływa na niechęć jej stosowanie i sięganie po inne, mniej opłacalne, mniej efektywne, ale tradycyjne metody. Z drugiej strony znane są również przypadki nieprawidłowych prób wdrożenia techniki iniekcji strumieniowej, które doprowadziły do bardzo poważnych problemów i awarii [3]. Niemniej jednak wszelkiego rodzaju błędy czy próby „nadużywania” iniekcji wysokociśnieniowej wynikają z ignorancji czy niedostatecznej wiedzy osób decyzyjnych, a nie z wartości samej technologii.

Pierwszym krokiem do wyeliminowania niewłaściwego stosowania techniki *jet grouting* jest przyswojenie racjonalnych metod projektowania, wykonywania i nadzoru prac iniekcyjnych. Dokładne badania i obserwacje wpływu iniekcji wysokociśnieniowej na ośrodek gruntowy mogą zagwarantować większą świadomość projektową i wykonawczą oraz zminimalizować ryzyko związane z jej zastosowaniem.

### Bibliografia

- [1] Wanik K., Bzówka J.: Przykłady zastosowania techniki iniekcji strumieniowej w pracach geoinżynierskich, [http://www.biswbis.pb.edu.pl/2013\\_04/009.pdf](http://www.biswbis.pb.edu.pl/2013_04/009.pdf).
- [2] PN-EN 12716:2002 Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Iniekcja strumieniowa.
- [3] Croce P., Flora A., Modini G.: Jet grouting. Technology, Design and Control, CRC Press, 2014.
- [4] Ochmański M., Modini G., Bzówka J.: Prediction of the diameter of jet grouting columns with artificial neural networks, Soils and Foundations, Volume 55, Issue 2, April 2015, Pages 425-436.
- [5] Materiały firmy Aarsleff sp. z o.o.

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano technologię iniekcji wysokociśnieniowej *jet grouting* ze szczególnym naciskiem na aspekty związane z jej zastosowaniem w praktyce inżynierskiej. Krótką charakterystykę tej metody, często znajdującej zastosowanie w budownictwie ziemnym i wodnym, zilustrowano dwiema przykładowymi realizacjami.

**Słowa kluczowe:** *jet grouting*, wysokociśnieniowa iniekcja strumieniowa, praktyka inżynierska  
**Abstract.** JET GROUTED COLUMNS IN ENGINEERING PRACTICE.

The article presents the jet grouting technology in the context of engineering practice. The short characteristic of this method, which is often applied in the geotechnical and hydrotechnical engineering, have been illustrated with realized investments descriptions.

**Keywords:** Jet grouting, high pressure injection, engineering practice

REKLAMA



Tergon Sp. z o.o. sp. k.  
os. Na stoku 81/13, 25-437 Kielce

tel./fax 0-22 / 720 06 67  
biuro@tergon.pl  
www.tergon.pl

# Na fundamencie technologii

- Gwoździe i kotwy gruntowe, mikropale i palościanki do średnic  $\varnothing$  300 mm.
- Stabilizacja skarp i likwidacja osuwisk.
- Wzmocnienia fundamentów istniejących obiektów budowlanych.
- Naprawa konstrukcji żelbetowych przy użyciu betonu natryskowego (torkret) lub zapraw PCC.
- Doradztwo w zakresie optymalizacji rozwiązań projektowych i doboru technologii.

