

Posadowienie budowli hydrotechnicznych na palach wbijanych

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Dr inż. Tadeusz Brzozowski – Keller Polska Sp. z o.o.

Budowa obiektów inżynierskich jest realizowana obecnie w coraz trudniejszych warunkach geotechnicznych. Dotyczy to w szczególności budownictwa hydrotechnicznego, morskiego i mostowego. W podłożu występują grunty uwarstwione o bardzo zróżnicowanej wytrzymałości i odkształcalności. Szczególnie wiele problemów nastręcza realizacja obiektów w delcie Wisły i Odry. Grunty słabonośne, np. namuły, torfy, gytie występujące w górnych warstwach podłoża lub w formie przewarstwień do głębokości $20 \div 30$ m wymuszają przekazanie obciążeń na głębsze warstwy podłoża nośnego. W takich warunkach często są realizowane obiekty budownictwa wodnego śródlądowego i budownictwa morskiego. Zgodnie z wieloletnią tradycją tego rodzaju konstrukcje są posadowione na fundamentach palowych. Najczęściej mamy do czynienia z takimi obiektami

jak: nabrzeża, pirsy, pochylnie, zbiorniki, silosy, dalby, magazyny, pomosty, doki, belki podsuwnicowe, znaki nawigacyjne, suwnice, itp.

Niniejszy numer Inżynierii Morskiej i Geotechniki jest dedykowany prof. zw. dr hab. inż. Eugeniuszowi Dembickiemu, dr h.c. multi. Profesor E. Dembicki od wielu lat jest związany ściśle z szeroko rozumianą geotechniką, w tym również w zakresie posadowienia konstrukcji hydrotechnicznych i morskich. Działalność Profesora E. Dembickiego wywarła ogromny wpływ na cały ten obszar budownictwa i pozostawiła trwały ślad w rozwiązaniach konstrukcyjnych wielu obiektów. Autorzy artykułu mieli przyjemność i zaszczyt pracować oraz współpracować z Profesorem przez wiele lat. Za te wszystkie lata aktywnej wspólnej działalności składamy serdeczne podziękowania.

Posadowienia konstrukcji hydrotechnicznych i morskich w złożonych i skomplikowanych warunkach geotechnicznych (patrz Eurokod 7 i Rozporządzenie [13] z kwietnia 2012 roku) bardzo często są realizowane na fundamentach palowych. Obiekty są wykonywane w obszarach głębokowodnych lub przy wysokim poziomie wody gruntowej. Problematyka naukowa i praktyka inżynierska dotyczy wyboru właściwych technologii, przyjęcia metody obliczeń i sposobu projektowania oraz miarodajnych metod badań i zakresu kontroli.

Do najczęściej stosowanych rozwiązań w budownictwie hydrotechnicznym śródlądowym i morskim należy zaliczyć następujące technologie pali:

- pale żelbetowe prefabrykowane,
- pale stalowe rurowe,
- pale drewniane.

W artykule przedstawiono i scharakteryzowano tylko niektóre interesujące aspekty wymienionych technologii, głównie w odniesieniu do konstrukcji hydrotechnicznych i morskich.

Stosowane w pirsach, estakadach, nabrzeżach, pomostach, pod fundamenty zbiorników, znaków i budynków nawigacyjnych [5, 6, 7].

Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne przedstawiono na rys. 1. Szereg zalet pali żelbetowych prefabrykowanych przedstawiono w powyższych publikacjach. Pale prefabrykowane wbijane bardzo często są stosowane w konstrukcjach hydrotechnicznych ze względu na dużą wytrzymałość betonu, wysoką wodoszczelność (W-8), mrozoodporność (F-150), niską nasiąkliwość ($< 4\%$), wysoką odporność na oddziaływania mechaniczne oraz agresywne działanie wody, gruntów, gazów.

Uwzględniając specyfikę budowli hydrotechnicznych i morskich, należy podkreślić ważne cechy pali żelbetowych prefabrykowanych:

- możliwość zastosowania pali o znacznych długościach (np. do 45 m), przy wykorzystaniu stalowych złączy, które przenoszą pełne obciążenia ściskające, rozciągające i momenty zginające,



Rys. 1. Zastosowanie pali prefabrykowanych w konstrukcjach hydrotechnicznych

a) pirsy paliwowe w Porcie Północnym w Gdańsku na palach prefabrykowanych i rurowych (fot. K. Mioduszewski), b) pale prefabrykowane w Porcie Gdańskim (fot. J. R. Kowalski), c) pale prefabrykowane wykonane pod przyczółek mostu (fot. J. R. Kowalski), d) pale prefabrykowane na Nabrzeżu Bułgarskim w Gdyni

- łatwość wprowadzenia pali w podłoże gruntowe z zastosowaniem młotów hydraulicznych, spaliniowych, wibromłotów,
- możliwość przenoszenia dużych obciążeń pionowych, poprzecznych (poziomych) oraz ich kombinacji,
- bezproblemowe wykonawstwo i przekazywanie obciążeń w podłożu silnie uwarstwowionym, szczególnie w przypadku występowania wielometrowych warstw gruntów słabonośnych (namuły, torfy, gytie), o wytrzymałości na ścinanie bez odpływu, $c_u \approx 15 \div 20$ kPa, (Eurokod 7, PN-EN 12699, PN-EN 1536:2001),
- technologia niewrażliwa na warunki pogodowe, niskie i wysokie temperatury, stosunkowo łatwo można wyeliminować oddziaływania falowania i wiatru,
- bardzo duży postęp robót, brak „mokrych” robót betonowych, możliwość przystąpienia do dalszych etapów robót bezpośrednio po wykonaniu pali,
- możliwość bieżącej kontroli w czasie wbijania pali (wzory dynamiczne) oraz łatwość wykonania badań dynamicznych (PDA), co również skutkuje racjonalnym i optymalnym doбором liczby i długości pali w ramach wprowadzenia „metody obserwacyjnej”, Eurokod 7.

PALE STALOWE RUROWE

Stosowane są w konstrukcjach mających bezpośredni kontakt z płynącą wodą w rzekach lub są narażone na oddziaływanie zasolonej wody morskiej. Duża głębokość akwenów oraz miąższość warstw gruntów słabonośnych powoduje, że długość pali zaprojektowanych do posadowienia konstrukcji wynosi od 20 do 40 m.

Istnieje łatwość doboru średnic i długości, również z możliwością ich korekty w miejscu budowy obiektu. Najczęściej są stosowane pale o średnicach 400, 500, 600 i 700 mm. Pale stalowe o średnicach większych, od 800 do 2500 mm są stosowane do konstrukcji o znacznych obciążeniach poprzecznych i w urządzeniach cumowniczo-odbojowych oraz jako elementy nadbrzeży głębokowodnych. Nowy zakres problematyki wykonawczej i projektowej dotyczy zagadnień związanych z budowlami pełnomorskimi, np. posadowienie elektrowni wiatrowych na pełnym morzu (średnice mono-pali dochodzą nawet do 6 m).

Pale stalowe są stosowane bardzo często w budowlach hydrotechnicznych jako podstawowy element konstrukcji, która ma być eksploatowana przez dziesiątki lat (rys. 2 ÷ 4). W przypadku konstrukcji hydrotechnicznych zastosowanie znajdują nie tylko pale rurowe, lecz również pale skrzynkowe wykonane ze spawanych elementów walcowanych.

Do ważnych cech pali stalowych rurowych należy zaliczyć:

- stosowane jako elementy prefabrykowane na lądzie z możliwością pełnej kontroli na placu prefabrykacji i dużą dowolnością formowania elementów dodatkowych, np. pale z dospawanymi elementami $\frac{1}{2}$ dwuteownika w miejscach gruntów nośnych (rys. 9),
- stal wykazuje bardzo dużą wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie i zginanie; jest przy tym materiałem bardzo

jednorodnym o stałych cechach wytrzymałościowych i odkształceniowych,

- współczesne elementy stalowe, takie jak: pale, ścianki szczelne, profile walcowane, kotwy gruntowe stwarzają bardzo duże możliwości różnorodnego łączenia i komponowania złożonych układów, zarówno w warunkach warsztatowych, jak i bezpośrednio na placu budowy,
- w warunkach bezpośredniego sąsiedztwa zbiorników wodnych własna pływerność elementów konstrukcyjnych (np. pale zamknięte) zapewnia łatwy transport i możliwość wykorzystania sił wyporu do podstawienia pala pod kafar,
- elementy prefabrykowane, przygotowywane na lądzie, dają możliwość szczegółowej kontroli,
- mogą być stosowane jako pale otwarte i całkowicie lub częściowo zamknięte w zależności od warunków geotechnicznych i oporów wbijania,
- można je wykonać bardzo szybko i niezależnie od warunków gruntowych,



Rys. 2. Pale rurowe z dnem zamkniętym wykonane pod posadowienie Mariny w Sopocie



Rys. 3. Pale stalowe konstrukcji Mariny w Sopocie obok pali drewnianych zabytkowego moła

- w przypadku stosowania do podpór tymczasowych można łatwo zlikwidować podporę,
- ścianki szczelne, łączone profile skrzynkowe, elementy walcowane, elementy systemu HZ mogą przenosić znaczne obciążenia pionowe i poziome,
- właściwie skomponowane pale i ścianki szczelne mogą stanowić bardzo estetyczne i funkcjonalne elementy przyczółków, podpór, ścian garaży podziemnych, elementów zabudowy budownictwa hydrotechnicznego i morskiego,
- wymienione rozwiązania są najczęściej elementami konstrukcyjnymi w pełni lub częściowo przemieszczeniowymi, nie wymagającymi wydobywania gruntu; zapewnia to bardzo dobrą nośność oraz niewielkie przemieszczenia na poziomie obciążeń obliczeniowych; generalnie jest to również rozwiązanie „ekologiczne” w różnych aspektach tego słowa,
- zagłębianie pali i ścianek szczelnych poprzez wbijanie umożliwia kontrolę oporów w podłożu gruntowym z możliwością zastosowania badań dynamicznych i wzorów opartych na wpędach do oceny nośności,

- zastosowane elementy prefabrykowane zapewniają ciągłość i pewność wykonania nawet w gruntach o bardzo małej nośności, np. w gruntach spoiwistych o wytrzymałości na ścinanie bez odpływu $c_u \equiv S_u \approx 15 \text{ kPa}$,
- praktyczne rozwiązania materiałowe i konstrukcyjne pozwalają na znaczny optymizm w zakresie zabezpieczeń przed długotrwałym działaniem korozji.

Połączenie elementów stalowych w postaci rur, współczesnych profili ścianek szczelnych i stali profilowej stwarza duże możliwości projektowania szczegółowych rozwiązań konstrukcyjnych. W dużej mierze zależy to od warunków geotechnicznych podłoża, obciążeń i potrzeb, ale również inwencji projektanta.

Poniżej scharakteryzowano jedynie niektóre elementy tego szerokiego zagadnienia. Typowym rozwiązaniem jest stosowanie stalowych pali rurowych z dnem zamkniętym (rys. 6). Rozwiązania podstawy pała z dnem zamkniętym stosowane najczęściej w praktyce przedstawiono na rys. 7.

Czas pograżania można znacząco skrócić, zmniejszając opory wbijania poprzez zastosowanie pali rurowych otwartych. Jednocześnie, racjonalnym rozwiązaniem jest zastosowanie dodatkowych elementów stalowych (np. $\frac{1}{2}$ I500) w celu maksymalnego wykorzystania warstw o dużym tarciu na pobocznicach, rys. 8 i 9.

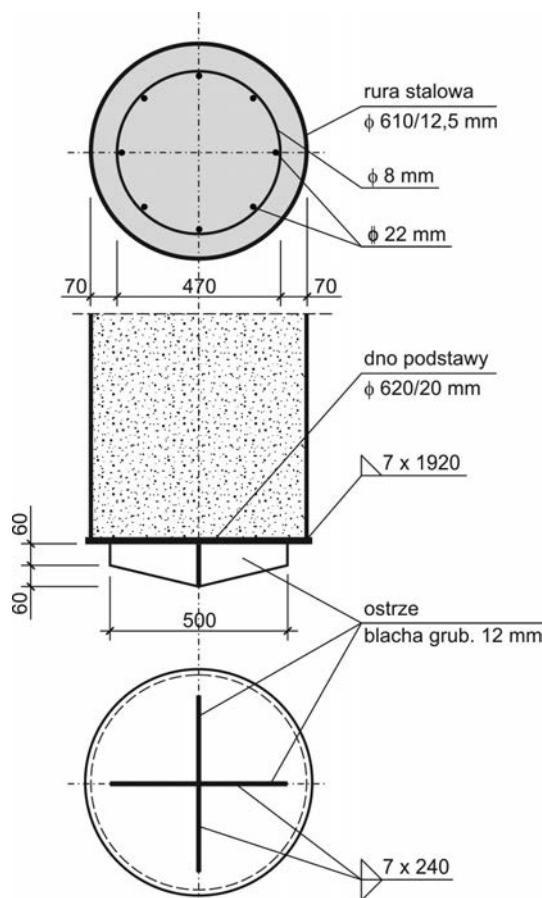
Warto zwrócić uwagę, że w zagęszczonym piasku w Porcie Północnym uzyskano opory jednostkowe na pobocznicach na poziomie 150 kPa.



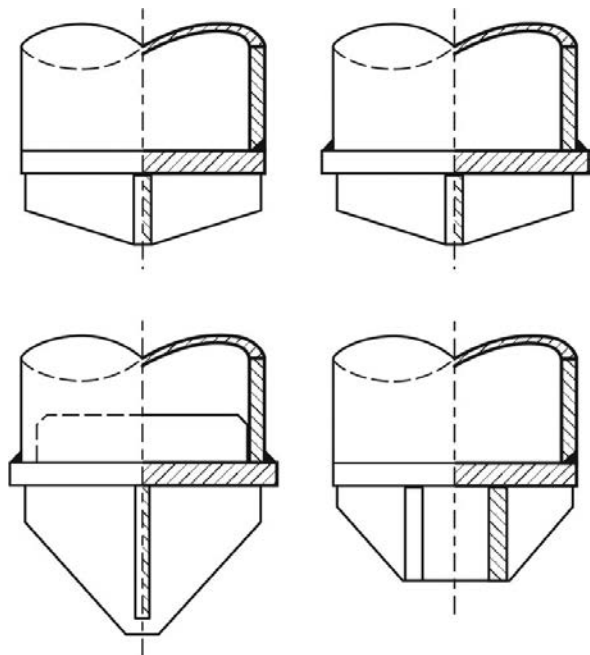
Rys. 4. Pirs Rudowy w Porcie Północnym w Gdańsku posadowiony na palach rurowych (fot. K. Mioduszewski)



Rys. 5. Podpora Pirsu Węglowemu w Porcie Północnym na palach rurowych (fot. K. Mioduszewski)



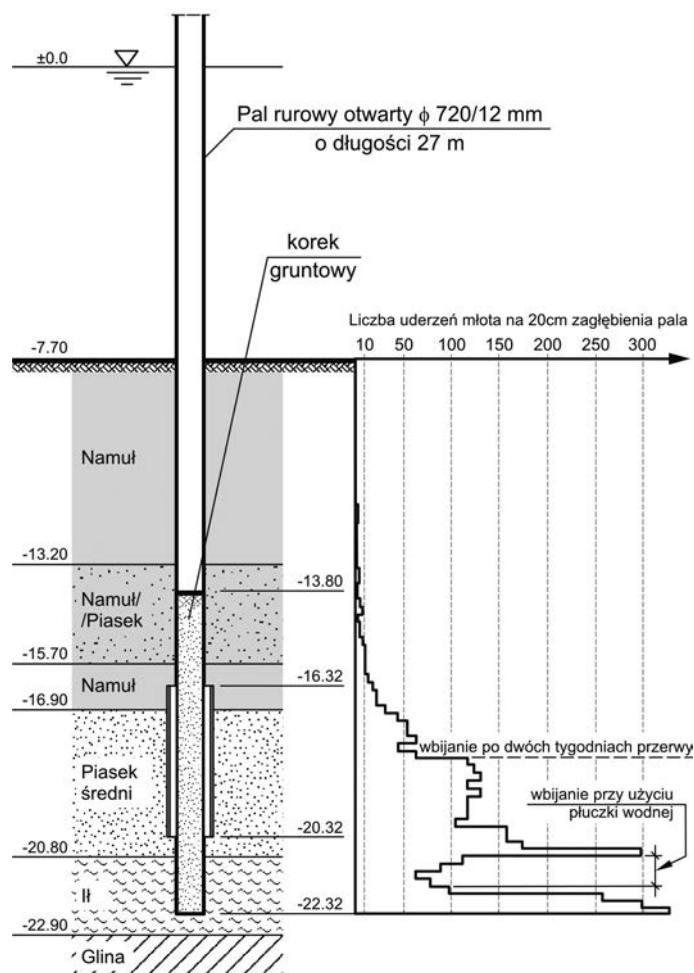
Rys. 6. Przykładowy schemat zamknięcia dna stalowego pała rurowego



Rys. 7. Przykładowe sposoby zamknięcia dna pali rurowych

Bardzo duże możliwości stwarza zastosowanie elementów skrzynkowych otrzymanych z połączenia profili ścianek szczelnych. Przykładowe rozwiązania przedstawiono na rys. 10. Praktyczne zastosowanie przy nabrzeżu w Terminalu Kontenerowym w Gdańsku przedstawiono na rys. 11.

Interesującym przykładem posadowienia na palach jest cztero-przęsłowy most nad rzeką Nogat. Most o łącznej długości 130,65 m posadowiono na 2 przyczółkach i 3 podporach pośrednich. Konstrukcję każdej z podpór mostu wykonano w postaci 2 pali stalowych o średnicy 1620/11 mm z wypełnieniem żelbetowym oraz iniekcją pod podstawą według rozwiązania Katedry Geotechniki Politechniki Gdańskiej, którą zazwyczaj stosuje się pod podstawami pali wierconych wielkośrednicowych. Długości pali są zmienne i wynoszą od 16,2 m do 25,0 m. Zastosowanie tylko 2 pali w podporze przy obciążeniu obliczeniowym wynoszącym około 3500 kN wymagało dużej pewności wykonania i zwiększanej kontroli przy odbiorze robót. Natomiast zastosowanie komór iniekcyjnych zapewniło wymaganą kontrolę warunków wykonania w podstawie każdego pala, rys. 12.

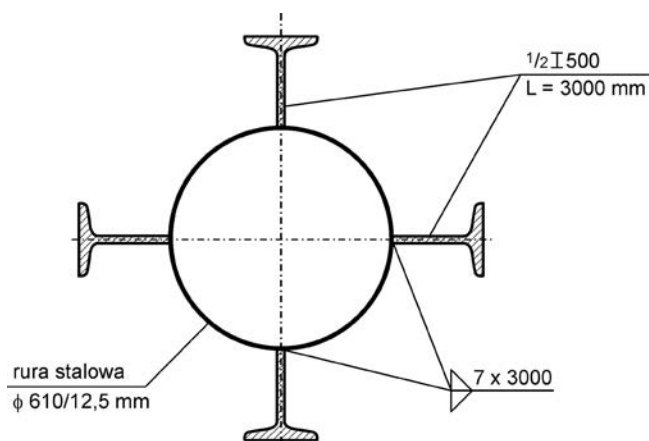


Rys. 8. Warunki gruntowe oraz wykres wbijania pala rurowego otwartego ze „skrzydełkami”

Podłoże gruntowe jest silnie uwarstwione przy dużej zmienności stanu gruntu. Pale przechodzą przez luźne grunty piaszczyste, miękkoplastyczne gliny zwięzłe, twardoplastyczne pyły piaszczyste i opierają się podstawami w zagęszczonych piaskach średnich i drobnych.

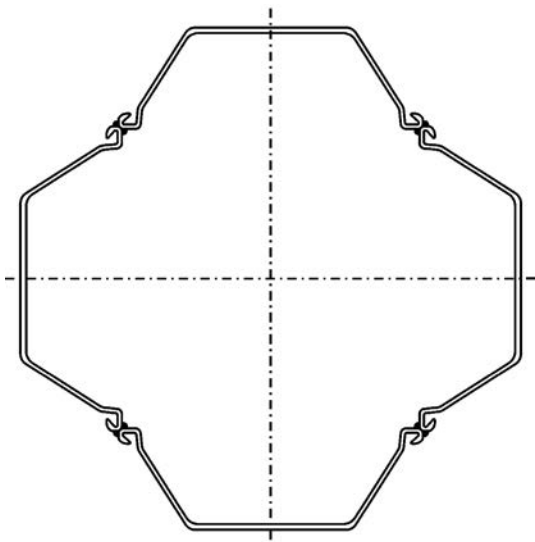
Proces wykonania pali można przedstawić następująco:

- pogrążanie w grunt stalowych rur o średnicy 1620 mm za pomocą wibromłota,



Rys. 9. Pal rurowy z przyspawanymi „skrzydełkami” wykonanymi z połówek dwuteowników





Rys. 10. Przykładowe stalowe pale skrzynkowe wykonane z profili walcowanych

- wybranie gruntu z wnętrza rury wraz z oczyszczeniem spodu rury,
- montaż zbrojenia wraz z instalacją do iniekcji pod podstawą,
- betonowanie pala metodą kontraktor,
- wykonanie iniekcji cementowej pod podstawę według technologii Katedry Geotechniki Politechniki Gdańskiej.

Uwzględniając bardzo zmienne warunki gruntowe, zastosowany rodzaj pali i sprzęt wykorzystany do pograżania rur stalowych, przyjęto system obserwacyjno-kontrolno-pomiarowy w celu zapewnienia pewnej i bezpiecznej pracy podpór palowych. Na podstawie metryk wykonania pali stwierdzono, że wszystkie dolne części pali są zagłębione od 4 do 6 m w zagęszczone grunty piaszczyste. Ważnym elementem kontroli były metryki wykonania iniekcji. Podstawowe parametry kontrolne iniekcji całego obiektu ($N = 10$ pali) były następujące:

- średnie ciśnienie iniekcji $p = 1,9$ MPa,
- objętość zaczynu, wartość średnia $V = 615$ dm³.

Ostateczną kontrolę prawidłowości pracy podpór stanowiły geodezyjne pomiary osiadań. Wyniki pomiarów geodezyjnych pionowych przemieszczeń wskazują, że osiadania są małe i równomierne, po zabetonowaniu wszystkich przęseł są rzędu od 2 do 5 mm.

PALE DREWNIANE

W dalszym ciągu, pomimo istnienia wielu nowoczesnych technologii, są stosowane w budownictwie hydrotechnicznym. Szczególnie chętnie stosuje się je do odbudowy/odnowy istniejących obiektów o charakterze zabytkowym (pirsy, mola, rys. 13, 14). W ostatnich czasach bardzo często używano pali drewnianych, budując mariny na jeziorach oraz do konstrukcji małych przystani śródlądowych.

Ekologiczny aspekt stosowania takich pali w rejonach, gdzie największe znaczenie ma ochrona przyrody, wydaje się być głównym powodem ciągłego stosowania jednej z najstarszych technologii pali wbijanych.



Rys. 11. Pale stalowe i pale Vibro w Terminalu Kontenerowym w Porcie Północnym w Gdańsku



Rys. 12. Dwupalowe podpory mostu nad Nogatem



Rys. 13. Pale drewniane użyte do remontu moła w Sopocie



Rys. 14. Badanie dynamiczne pala drewnianego w Ustroniu Morskim (fot. Aarsleff)

PODSUMOWANIE

Zastosowanie różnego rodzaju pali wbijanych w budownictwie hydrotechnicznym jest w wielu przypadkach jedynym racjonalnym rozwiązaniem umożliwiającym pokonanie problemów związanych z występowaniem gruntów o małej wytrzymałości na ścinanie i koniecznością wykonania pali w głębokich akwenach oraz ciekach wodnych lub morzu.

Wbijanie pali o konstrukcji żelbetowej, pali stalowych lub ekologicznych pali drewnianych pozwala na pośrednią kontrolę zalegania spągu warstw nienośnych i umożliwia bieżącą kontrolę nośności za pomocą obserwacji wpędów (wzory dynamiczne) i badań dynamicznych.

Uwzględniając znaczący postęp w produkcji i technologii wprowadzenia w podłoże gruntowe elementów stalowych, należy przewidywać znaczące rozszerzenie ich stosowania we współczesnych konstrukcjach budownictwa hydrotechnicznego i morskiego.

LITERATURA

1. Drążkiewicz J.: Zastosowanie pali z rur stalowych w budownictwie morskim. *Inżynieria Morska i Geotechnika* nr 5/1998.
2. Gwizdała K., Brzozowski T., Blockus M.: Estimation of pile bearing capacity by dynamic and static tests. *Proc. of the 11th Baltic Sea Geotechnical Conference*, Gdańsk, Poland, 15-18 September 2008.
3. Gwizdała K.: Ekologiczne aspekty projektowania fundamentów palowych. *Problemy naukowo-badawcze budownictwa*. T. 1, Problemy budownictwa na terenach ekologicznie cennych. Polska Akademia Nauk Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. Białystok – Krynica : Wyd. Politech. Białost., 2007.
4. Gwizdała K.: *Fundamenty palowe*. Tom 1, PWN 2010.
5. Gwizdała K.: *Fundamenty palowe*. Badania i zastosowanie. Tom 2, PWN 2013.
6. Gwizdała K., Kowalski J. R.: *Prefabrykowane pale wbijane*. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, 2005.
7. Gwizdała K., Kowalski J. R.: Sztywność pali prefabrykowanych stosowanych w budownictwie hydrotechnicznym. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 4/2006.
8. Gwizdała K., Krasiński A., Brzozowski T.: Analiza sztywności pali w warunkach gruntowych Portu Północnego w Gdańsku. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3/2005.
9. Gwizdała K.: Pale i fundamenty palowe, projektowanie i realizacja wzmocnień. XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 17-20 marca 2009.
10. Gwizdała K.: Projektowanie fundamentów na palach. XX Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła – Ustroń, 01-04 marca 2005.
11. Gwizdała K., Tejchman A., Klos J.: Bearing capacity investigations of an open-end pipe pile. *Proc. of the first Baltic Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Gdańsk 1975.
12. Gwizdała K., Tejchman A., Klos J.: Pale stalowe w Porcie Północnym. *TiGM/1975*.
13. Jarominiak A., Kłosiński B., Grzegorzewicz K., Cielenkiewicz T.: *Pale i fundamenty palowe*. Arkady 1976.
14. PN-B-02482:1983 – *Fundamenty budowlane*. Nośność pali i fundamentów palowych.
15. PN-EN 1997-1:2008 – *Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne; część 1: Zasady ogólne*.
16. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawienia obiektów budowlanych (Dz. U. nr 0 z dn. 25.04.2012 r poz. 463).