

УДК 69.624.1

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.75.1163

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПРОБОВУВАННЯ ГВИНТОВОГО ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ В МІЖНАРОДНОМУ СТАНДАРТІ BS EN ISO 22477-1:2018

КОКОШУЄВ О. П.^{1*}, асп.,

САМЧЕНКО Р. В.², канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, 69011, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (096) 649-42-99, e-mail: a.kokoshuev@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5594-2933

² Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, 69011, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (050) 454-81-65, e-mail: sektor3@ukr.net

Анотація. У статті проведено детальний аналіз методів випробування гвинтового пальового фундаменту відповідно до міжнародного стандарту BS EN ISO 22477-1:2018. Визначено ключові аспекти статичних випробувань паль, які включають оцінку реальної поведінки палі під навантаженням, визначення її несучої здатності, перевірку відповідності проєктним параметрам, аналіз впливу ґрунтових умов та контроль якості будівництва. Розглянуто фізико-механічні характеристики ґрунтів, їхню неоднорідність та роль у формуванні граничного опору палі, а також можливі методи покращення моделювання взаємодії ґрунту та фундаментної конструкції. Описано основні етапи випробувань, зокрема підготовчий етап (геофізичні, гідрогеологічні та лабораторні дослідження, контроль матеріалів і зварних з'єднань, калібрування обладнання), процедури навантаження та розвантаження, а також сучасні методи моніторингу та інтерпретації результатів. Значну увагу приділено аналізу методів автоматизації процесів випробувань, включаючи застосування сервогідравлічних систем, адаптивних алгоритмів керування, волоконно-оптичних сенсорів, бездротових мереж збору даних та цифрового моделювання. Запропоновано шляхи оптимізації технології випробувань, які передбачають інтеграцію сучасних методів геодезичного моніторингу, автоматизацію процесу навантаження, використання методів машинного навчання для прогнозування поведінки фундаментів, розробку цифрових двійників для реального часу та вдосконалення методик аналізу осідання та стабілізації палі. Впровадження цих підходів сприятиме підвищенню точності випробувальних результатів, оптимізації конструктивних рішень, мінімізації ризиків проєктування та будівництва, підвищенню ефективності геотехнічних досліджень та довговічності фундаментних конструкцій.

Ключові слова: гвинтовий пальовий фундамент; статичні випробування; несуча здатність; BS EN ISO 22477-1:2018; геотехнічні дослідження; контроль якості; цифрове моделювання; моніторинг; автоматизація випробувань

ANALYSIS OF THE TESTING TECHNOLOGY FOR SCREW PILE FOUNDATIONS IN THE INTERNATIONAL STANDARD BS EN ISO 22477-1:2018

KOKOSHUYEV O.P.^{1*}, PhD Stud.,

SAMCHENKO R.V.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

^{1*} Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 66, Universytetska St., Zaporizhzhia, 69011, Ukraine, tel. +38 (096) 649-42-99, e-mail: a.kokoshuev@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5594-2933

² Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 66, Universytetska St., Zaporizhzhia, 69011, Ukraine, tel. +38 (050) 454-81-65, e-mail: sektor3@ukr.net

Abstract. The article provides a detailed analysis of the testing methods for screw pile foundations in accordance with the international standard BS EN ISO 22477-1:2018. The key aspects of static pile testing are identified, including the assessment of the actual behaviour of the pile under load, determination of its bearing capacity, verification of compliance with design parameters, analysis of the impact of soil conditions and construction quality control. The physical and mechanical characteristics of soils, their heterogeneity and role in the formation of the ultimate pile resistance, as well as possible methods for improving the modelling of the interaction between soil and foundation structure are considered. The main stages of testing are described, including the preparatory stage (geophysical,

hydrogeological and laboratory research, control of materials and welded joints, equipment calibration), loading and unloading procedures, as well as modern methods of monitoring and interpreting the results. Considerable attention is paid to the analysis of methods for automating testing processes, including the use of servo-hydraulic systems, adaptive control algorithms, fibre-optic sensors, wireless data acquisition networks and digital modelling. Ways to optimise the testing technology are proposed, including the integration of modern geodetic monitoring methods, automation of the loading process, the use of machine learning methods to predict the behaviour of foundations, the development of digital twins for real-time, and the improvement of methods for analysing settlement and pile stabilisation. The implementation of these approaches will help to improve the accuracy of test results, optimise design solutions, minimise design and construction risks, increase the efficiency of geotechnical research and the durability of foundation structures.

Keywords: *helical pile foundation; static testing; bearing capacity; BS EN ISO 22477-1:2018; geotechnical research; quality control; digital modelling; monitoring; test automation*

Мета статті. Проаналізувати технологію випробування гвинтового пальового фундаменту відповідно до міжнародних стандартів та розробити рекомендації щодо її оптимізації шляхом впровадження сучасних методів моніторингу, автоматизації процесів та вдосконалення аналітичних підходів до оцінки несучої здатності паль.

Виклад основного матеріалу.

Сутність випробування гвинтового пальового фундаменту.

Основною метою статичних випробувань паль є забезпечення надійності фундаментних конструкцій шляхом оцінки їх реальної тримальної здатності та відповідності проектним вимогам. Це дозволяє мінімізувати ризики відмов фундаменту та гарантувати стійкість всієї споруди в різних експлуатаційних умовах.

Ключовими аспектами випробування паль є [1–3]:

- Оцінка реальної поведінки палі, а саме визначається ступінь деформації палі при різних рівнях навантаження (статичний осад). Аналізуються пружні та пластичні деформації, які мають важливе значення для прогнозування довгострокової роботи конструкції. Вивчається вплив ґрунтових умов (тип ґрунту, щільність, вологість) на осідання палі.

- Перевірка відповідності проектним параметрам, а саме палі має відповідати розрахунковим характеристикам, визначеним у проектній документації. Підтверджується відповідність значень граничного опору палі, зокрема опору основи палі (розподілена сила, що виникає в

зоні контакту нижньої частини палі з ґрунтом), та тертя вздовж валу палі (сили зчеплення між стовбуром палі та ґрунтом). Випробування дозволяють виявити невраховані фактори (наприклад, неоднорідність ґрунтового шару), які можуть суттєво впливати на поведінку фундаменту.

- Оцінка тримальної здатності за граничним станом, а саме граничний стан досягається, коли навантаження, прикладене до палі, викликає неприйнятно великі деформації, що впливають на стійкість споруди. Випробування дають змогу точно визначити максимальне навантаження, яке палі може витримати, та характеристики руйнування ґрунту під основою палі чи втрату зчеплення уздовж її валу. Результати використовуються для перевірки або корекції проектних моделей.

- Аналіз роботи палі в експлуатаційних умовах, а саме мета полягає у визначенні того, як палі працюватиме під звичайними експлуатаційними навантаженнями, не досягаючи граничного стану. Проводиться оцінка накопичуваних осідань за багатоциклових навантажень, що відображає її поведінку у випадках, коли навантаження повторюються (наприклад, у мостах, портових спорудах). Оцінюється можливість повзучості палі (довготривале повільне осідання) під постійними навантаженнями.

- Визначення критеріїв проектування та моделювання, а саме результати випробувань палі дозволяють уточнити параметри моделювання для геотехнічних розрахунків. Це особливо важливо для

перевірки факторів безпеки, що використовуються в розрахунках та адаптації проектних моделей до реальних ґрунтових умов. Забезпечується інтеграція даних випробувань у проектні рішення.

- Контроль якості будівельних робіт, а саме використання випробувань як засобу перевірки коректності виконання робіт із монтажу паль. Перевіряється якість матеріалів палі (бетон, сталь), технологія забивання чи буріння, що впливає на її функціональність. Виявляються потенційні дефекти (порожнечі в бетоні, неправильна форма палі, недоліки армування).

- Внесок у загальну надійність споруди, а саме забезпечується перевірка фундаменту як критичного елемента всієї споруди. Оцінюється взаємодія палі з іншими конструктивними елементами та вплив на загальну стійкість.

Статичне випробування паль – це ключовий етап геотехнічного дослідження, що дозволяє інженерам отримати точні дані для розрахунків, забезпечити відповідність проекту та гарантувати довготривалу експлуатацію фундаментів.

Шляхи оптимізація технології випробування гвинтового пальового фундаменту.

Випробування гвинтових паль є критично важливим етапом у проектуванні та будівництві фундаментів на різноманітних ґрунтах, особливо в умовах слабких, насичених водою або мерзлих ґрунтів. Оптимізація технології випробувань спрямована на забезпечення достовірних та репрезентативних результатів, підвищення ефективності, економічності, безпеки та інтеграцію сучасних технологій для більш точного прогнозування поведінки паль під навантаженням в реальних умовах експлуатації. Цей текст базується на загальних принципах, викладених у стандарті BS EN ISO 22477-1:2018 (Геотехнічні дослідження та випробування. Випробування на навантаження геотехнічних конструкцій. Частина 1. Загальні правила), та враховує специфіку випробувань саме гвинтових паль.

1. Підготовчий етап.

Аналіз умов тестування.

Комплексні геофізичні дослідження: Застосування комплексу методів, таких як георадарне зондування (GPR), сейсмічна розвідка (сейсмотомографія, метод заломлених хвиль), електротомографія (ERT), дозволяє отримати детальну інформацію про геологічну будову ділянки, наявність неоднорідностей (лінзи, прошарки, карстові порожнини), рівень ґрунтових вод, глибину залягання скельних порід та інші важливі параметри. Важливо не тільки виявити неоднорідності, але й оцінити їхні розміри, форму та орієнтацію, а також потенційний вплив на результати випробувань та несучу здатність паль.

Детальне ґрунтове зондування: Використання статичного зондування (CPT) з різними типами наконечників (конус, п'єзоконус, сейсмічний конус), динамічного зондування (SPT), буріння з відбором зразків ґрунту для лабораторних випробувань (гранулометричний склад, вологість, щільність, межі текучості та пластичності, кут внутрішнього тертя, зчеплення) дозволяє отримати детальні дані про механічні та фізичні властивості ґрунтів на різних глибинах. Особливу увагу слід приділяти визначенню опору ґрунту на глибині закладання лопаті гвинтової палі.

Гідрогеологічні дослідження: Визначення статичного та динамічного рівнів ґрунтових вод, їх хімічного складу (агресивність до металу) та сезонних коливань є критично важливим для коректної інтерпретації результатів випробувань та прогнозування корозійної стійкості паль.

Моделювання з урахуванням геологічної мінливості: Використання геостатистичних методів (кригінг, варіаційний аналіз) та стохастичного моделювання дозволяє врахувати природну мінливість ґрунтових властивостей та створити більш реалістичні цифрові моделі ґрунтового масиву для подальшого чисельного моделювання поведінки паль.

Оптимізація підготовки гвинтових паль.

Контроль якості матеріалів: Перевірка якості сталі, зварних з'єднань та

антикорозійного покриття відповідно до діючих стандартів (таких як, EN 1090, ISO 3834, EN ISO 1461) [4].

Точне позиціонування: Використання геодезичних інструментів (нівелір, тахеометр, GPS/GNSS-приймачі) або спеціальних пристроїв для центрування та вертикалізації забезпечує точне положення палі перед початком загвинчування. Важливо контролювати кут нахилу палі під час загвинчування.

Контроль зварних з'єднань: Застосування методів неруйнівного контролю, таких як візуальний огляд (VT), ультразвуковий контроль (UT), магнітопорошковий контроль (MT), капілярний контроль (PT) для виявлення можливих дефектів зварних швів (тріщини, пори, неспалення).

Антикорозійний захист: Застосування ефективних антикорозійних покриттів, таких як гаряче цинкування (відповідно до EN ISO 1461 [5]), термодифузійне цинкування, епоксидні або полімерні покриття, для забезпечення довговічності палі в агресивних ґрунтових умовах.

Калібрування обладнання.

Періодична перевірка та калібрування: Забезпечення регулярної перевірки та калібрування всіх вимірювальних приладів (датчики тиску, сили, переміщення, тензometri) в акредитованих лабораторіях згідно з встановленими стандартами.

Метрологічна простежуваність: Забезпечення простежуваності калібрувальних даних до національних та міжнародних еталонів.

Захист від зовнішніх впливів.

Моніторинг метеорологічних умов: Реєстрація температури, вологості, атмосферного тиску, швидкості та напрямку вітру під час випробувань. Врахування впливу вітру на результати випробувань, особливо при випробуванні високих палі. За необхідності встановлення вітрозахисних екранів.

2. Процедура завантаження.

Автоматизація прикладення навантаження.

Сервогідравлічні системи:

Використання сервогідравлічних приводів з цифровим керуванням забезпечує високу точність та динаміку прикладення навантаження з можливістю програмування різних режимів навантаження (ступеневе, безперервне, циклічне, швидкісне).

Програмування циклів навантаження: Можливість програмування різних режимів навантаження відповідно до вимог стандарту та специфічних умов (наприклад, циклічні випробування для імітації динамічних навантажень від вітру або сейсмічних впливів).

Оптимізація етапів навантаження.

Адаптивні алгоритми керування: Використання алгоритмів, що автоматично адаптують параметри навантаження (крок навантаження, час витримки) в залежності від поведінки палі, дозволяє оптимізувати процес випробування та отримати більш детальну інформацію про її тримальну здатність.

Аналіз кривих «навантаження – осідання»: Автоматична побудова та аналіз кривих «навантаження – осідання» в реальному часі для визначення ключових параметрів поведінки палі (граничне навантаження, жорсткість, коефіцієнт пружної основи).

Контроль стабілізації.

Використання чітких критеріїв стабілізації осідання відповідно до стандарту BS EN ISO 22477-1:2018 (наприклад, швидкість осідання менше заданого значення протягом певного часу).

3. Процедура розвантаження.

Контрольоване розвантаження: Забезпечення плавного та контрольованого зниження навантаження з визначеною швидкістю з метою мінімізації залишкових деформацій та отримання точних даних про пружні властивості палі. Реєстрація кривої «розвантаження – відновлення».

4. Моніторинг і вимірювання.

Системи геодезичного моніторингу: Використання GPS/GNSS-приймачів, нівелірів, тахеометрів, лазерних сканерів для високоточного контролю положення та переміщень палі в трьох вимірах. Особлива увага приділяється вимірюванню

вертикальних переміщень (осідання), а також можливих горизонтальних зсувів та кутів нахилу палі.

Датчики тиску та сили: Використання високоточних тензометричних датчиків (датчики сили, тензокільця, тензометричні балки) для вимірювання прикладеного навантаження з високою точністю та мінімальною похибкою. Важливо забезпечити правильне встановлення та калібрування датчиків.

Датчики переміщення: Використання лінійних потенціометрів, індуктивних датчиків, лазерних датчиків відстані для точного вимірювання вертикальних та горизонтальних переміщень палі.

Волоконно-оптичні датчики: Застосування волоконно-оптичних датчиків деформації (FBG-сенсори, розподілені волоконно-оптичні системи) для моніторингу розподілу деформацій по довжині палі, а також для вимірювання температури. Ці датчики дозволяють отримати детальну інформацію про роботу палі під навантаженням та виявити можливі дефекти.

Автоматизовані системи збору даних (SCADA): Інтеграція всіх вимірювальних приладів в єдину систему збору, обробки та візуалізації даних. SCADA-системи забезпечують синхронний збір даних з різних датчиків, їхню обробку в реальному часі, візуалізацію результатів у вигляді графіків та таблиць, а також зберігання даних для подальшого аналізу.

5. Інтерпретація результатів та звітність.

Аналіз кривих «навантаження – осідання»: Детальний аналіз отриманих кривих «навантаження – осідання» для визначення ключових параметрів поведінки палі.

Граничне навантаження (згідно з критеріями стандарту).

Жорсткість палі.

Коефіцієнт пружної основи.

Характер деформацій (пружні, пластичні).

Статистичний аналіз даних: Використання статистичних методів (середнє значення, стандартне відхилення,

кореляційний аналіз) для обробки та аналізу результатів випробувань, особливо при проведенні серії випробувань.

Порівняння з прогнозними значеннями: Порівняння отриманих результатів з результатами розрахунків та прогнозів, виконаних за різними методиками (аналітичні розрахунки, чисельне моделювання). Оцінка достовірності прогнозних моделей.

Формування звіту: Створення детального звіту про проведені випробування, що включає:

Опис об'єкта та умов випробувань.

Характеристики ґрунту.

Характеристики палі.

Опис методики випробувань.

Результати вимірювань (графіки, таблиці).

Аналіз результатів та висновки.

Рекомендації щодо проектування фундаментів.

Фото- та відеофіксація процесу випробувань.

6. Вдосконалення технологій.

Бездротові сенсорні мережі: Використання бездротових технологій (Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN) для збору даних з датчиків, що дозволяє спростити монтаж та зменшити вартість випробувань.

Технології Big Data та хмарні обчислення: Використання потужних обчислювальних ресурсів для обробки та аналізу великих обсягів даних, отриманих під час випробувань, а також для створення баз даних та прогностичних моделей.

Штучний інтелект та машинне навчання: Застосування алгоритмів машинного навчання для аналізу даних випробувань, прогнозування поведінки палі під навантаженням, оптимізації параметрів випробувань та автоматичного виявлення аномалій.

Цифрові двійники: Створення цифрових двійників будівельних об'єктів, що включають цифрові моделі фундаментів та результати випробувань палі, для моніторингу їхнього стану в реальному часі та прогнозування довгострокової поведінки.

Сенсорні гвинтові палі: Впровадження в конструкцію паль вбудованих датчиків (тиску, деформації, температури, корозії), що дозволяють здійснювати постійний моніторинг їхнього стану під час експлуатації.

Висновок

Впровадження запропонованих заходів дозволить досягти значного прогресу в технології випробування гвинтових паль, забезпечуючи:

- підвищення надійності та безпеки будівельних конструкцій;
- оптимізацію проектних рішень та зниження витрат на будівництво;
- покращення якості геотехнічних досліджень;
- підвищення оперативності та ефективності проведення випробувань;
- створення бази даних для подальшого розвитку технологій проектування та будівництва фундаментів на гвинтових палях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. BS EN ISO 22477-1:2018. Part 1: Testing of piles: static compression load testing. Part 1: General requirements. London, 2018. 24 p.
2. ДСТУ Б В.2.1-1-95 (ГОСТ 5686-94). Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи польових випробувань палями. Київ : Держбуд, 1995. 57 с.
3. ДСТУ Б В.2.1-27:2010. Основи та фундаменти споруд. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань. Київ : Мінрегіонбуд, 2011. 11 с.
4. ДСТУ Б EN 1090-1:2014. Виконання сталевих і алюмінієвих конструкцій. Частина 1. Вимоги до оцінки відповідності компонентів конструкцій (EN 1090-1:2009+A1:2011, IDT). Київ : Мінрегіонбуд, 2015. 58 с.
5. ДСТУ EN ISO 1461:2024. Покриття, нанесені методом гарячого цинкування на вироби із чавуну та сталі. Технічні вимоги та методи випробування (EN ISO 1461:2022, IDT; ISO 1461:2022, IDT). Київ : Мінрегіонбуд, 2024. 16 с.

REFERENCES

1. British Standards Institution. BS EN ISO 22477-1:2018. Testing of piles. Static compression load testing. Part 1: General requirements. London, 2018, 24 p.
2. *DSTU B V.2.1-1-95. Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metody poliovykh vyprobuvan paliamy* [DSTU B V.2.1-1-95. Foundations and basements of buildings and structures. Soils. Methods of field testing of piles]. Kyiv : Derzhbud, 1995, 57 p. (in Ukrainian).
3. *DSTU B V.2.1-27:2010. Osnovy ta fundamenti sporud. Pali. Vyznachennia nesuchoi zdatnosti za rezultaty poliovykh vyprobuvan* [DSTU B V.2.1-27:2010. Foundations and structures. Piles. Determination of bearing capacity based on field tests]. Kyiv : Minregionbud, 2011, 11 p. (in Ukrainian).
4. *DSTU B EN 1090-1:2014. Vykonannia stalevykh i aluminumievykh konstruksii. Chastyna 1. Vymohy do otsinky vidpovidnosti komponentiv konstruksii* [DSTU B EN 1090-1:2014. Execution of steel and aluminium structures. Part 1: Requirements for conformity assessment of structural components]. (EN 1090-1:2009+A1:2011, IDT). Kyiv: Minregionbud, 2015, 58 p. (in Ukrainian).
5. *DSTU EN ISO 1461:2024. Pokryttya, naneseni metodom haryachoho tsynkuvannya na vyroby iz chavunu ta stali. Tekhnichni vymohy ta metody vyprobuвання* [DSTU EN ISO 1461:2024. Hot-dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles. Specifications and test methods]. (EN ISO 1461:2022, IDT; ISO 1461:2022, IDT). Kyiv : Minregionbud, 2024, 16 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 15.04.2025.