

dr hab. inż. Grzegorz Ludwik Golewski, prof. PL¹⁾

Wybrane aspekty wykonywania, eksploatacji i konserwacji fundamentów pod maszyny

Selected issues for implementation, operation and maintenance of foundations for machines

DOI: 10.15199/33.2019.02.04

Streszczenie. W artykule omówiono najważniejsze problemy związane z wykonywaniem, eksploatacją i konserwacją fundamentów pod maszyny. Przedstawiono najnowsze rozwiązania dotyczące technologii realizacji tych konstrukcji i materiałów wykorzystywanych do ich budowy. Fundamenty pod maszyny to specjalne konstrukcje w budownictwie przemysłowym, służące do przekazywania obciążeń z działającej maszyny na podłoże gruntowe. Ich celem jest nie tylko przenoszenie obciążeń, ale także zmniejszenie drgań występujących podczas pracy maszyny, tj. ich wytłumienie i przeciwdziałanie redystrybucji na inne elementy budynku. Należy zauważyć, że fundamenty pod maszyny (szczególnie pod młoty) są najbardziej dynamicznie obciążanymi konstrukcjami budowlanymi. Z tych powodów wymagają dokładnych obliczeń statycznych oraz dynamicznych, poprawności wykonania i dbałości o nie podczas eksploatacji.

Słowa kluczowe: fundamenty pod maszyny; obciążenia dynamiczne; dynamika budowli; drgania, żelbet.

Abstract. This paper presents the most important issues on the implementation, operation and maintenance of foundation for machines. The newest solutions focus on terms of technology implementation and materials used in construction of such structures have been presented. Foundations for machines are special structures in industrial construction, used to transfer loads from an operating machine to the subsoil. However, the purpose of these foundations is not just to transfer loads, but also to reduce vibrations occurring during operation of the machine, i.e. their damping and preventing redistribution to other elements of the building. It should be noted that foundations for machines (particularly for hammers) are the most dynamically loaded building structures. For these reasons, they require: precise static and dynamic calculations, accuracy in their implementation and care for them after they have been made.

Keywords: foundations for machines; dynamic loads; building dynamics; vibrations; reinforced concrete.

W praktyce inżynierskiej występuje wiele budowli, na które działają zarówno obciążenia statyczne, jak i dynamiczne. Sytuacje, w których konieczne jest branie pod uwagę wpływów dynamicznych, wymagają szczególnej uwagi projektanta, ponieważ obciążenia tego typu powodują powstawanie w konstrukcji drgań oraz hałasu, które zazwyczaj mają negatywny wpływ na jej pracę. Typowym przykładem żelbetowych budowli przemysłowych obciążonych dynamicznie są fundamenty pod maszyny.

W artykule przedstawiono najnowsze wytyczne dotyczące technologii ich realizacji, materiałów do budowy oraz prawidłowych warunków utrzymania i konserwacji.

Układy konstrukcyjne i zadania fundamentów pod maszyny

Konstrukcja fundamentów pod maszyny zależy przede wszystkim od dynamicznego charakteru pracy i wymiarów maszyny. W celu usystematyzowania metod projektowania i wykonywania takich fundamentów wprowadzono umowny podział na trzy grupy [6]:

- I grupa – fundamenty blokowe, np. [3];

- II grupa – fundamenty ramowe, np. [5, 15];

- III grupa – konstrukcje wsporcze, np. [20].

Prawidłowo zaprojektowany fundament pod maszyną powinien:

- zapewnić maszynie właściwe oparcie;
- spełnić wymagania stawiane przez dostawcę maszyny, dotyczące jej montażu i użytkowania;
- mieć odpowiednią wytrzymałość, trwałość i stateczność;
- ograniczyć przekazywanie drgań na otoczenie do dopuszczalnego poziomu.

Ponadto fundamenty pod maszyny wymagają:

- poprawnie wykonanego projektu pod względem technicznym i ekonomicznym;
- odpowiedniego doboru materiałów do ich budowy;
- dokładności i precyzji wykonania;
- odpowiedniej konserwacji podczas ich pracy.

W literaturze nie ma aktualnych wytycznych odnoszących się do wymienionych zagadnień. W związku z tym zostaną one szczegółowo opisane w artykule.

Negatywne skutki drgań w konstrukcjach żelbetowych

Drgania generowane w wyniku obciążeń dynamicznych mogą mieć różny efekt oddziaływania. Najbardziej niekorzystnymi są tzw. drgania szkodliwe lub powodujące zja-

¹⁾ Politechnika Lubelska; Wydział Budownictwa i Architektury, g.golewski@pollub.pl

wisko rezonansu [14]. Po dłuższym czasie mogą implikować bardzo groźne skutki, takie jak uszkodzenia konstrukcji, a w skrajnych przypadkach nawet jej awarię bądź zniszczenie [6]. Defekty tego typu są bardzo trudne do wykrycia i dlatego do ich detekcji stosuje się precyzyjne metody nieniszczące i semi-nieniszczące, np. emisję akustyczną [18], ultradźwiękową i impact echo [1] czy cyfrową korelację obrazu [8]. Opis metod diagnostycznych stosowanych do wykrywania uszkodzeń w obiektach budowlanych i konstrukcjach przemysłowych przedstawiono w [7, 13], natomiast schemat procedur diagnostycznych w [17]. Pęknięcia w materiale, będące wynikiem obciążeń dynamicznych, są w efekcie końcowym podobne do uszkodzeń występujących w konstrukcjach pracujących w złożonych stanach naprężeń [9, 10]. Jednak rozwój zarysowania i destrukcja uszkodzonego betonu w elementach poddanych obciążeniom dynamicznym przebiega znacznie szybciej i mniej przewidywalnie niż w przypadku konstrukcji poddanych jedynie obciążeniom statycznym. W skrajnej sytuacji pod wpływem obciążeń dynamicznych może dochodzić do całkowitej dezintegracji konstrukcji fundamentu i odłupywania się kawałków betonu [6]. W celu zminimalizowania destrukcyjnego wpływu drgań na konstrukcje fundamentów pod maszyny należy uwzględnić zalecenia materiałowe, technologiczne i konserwatorskie.

Charakterystyka materiałów do budowy fundamentów pod maszyny

Główne wymagania stawiane materiałom stosowanym do budowy fundamentów pod maszyny to: odpowiednia wytrzymałość; duża wytrzymałość zmęczeniowa; jednorodność oraz odporność na wpływy chemiczne i atmosferyczne.

W artykule przedstawiam najważniejsze wymagania i wskazówki dotyczące stosowania betonu i stali zbrojeniowej w konstrukcjach żelbetowych obciążonych dynamicznie.

Szczegółowe wymagania dotyczące betonu. W przypadku fundamentów pod maszyny minimalna klasa wytrzymałości betonu na ściskanie to C 12/15. Wyjątkiem są konstrukcje żelbetowe przenoszące obciążenia udarowe od pracujących maszyn, np. fundamenty pod młoty wymagające betonu klasy minimum C 16/20 w przypadku małych maszyn oraz C 20/25 i C 25/30 – dużych maszyn. Beton powinien być jednorodny, bez usterek powierzchniowych wskazujących na obecność raków lub miejsc porowatych, rys skurczowych itp. Wszystkie nieciągłości występujące w strukturze betonu mogą zmniejszać zdolność konstrukcji do tłumienia drgań. Koncentracja naprężeń w miejscach osłabionych ma dodatkowo wpływ na zmniejszenie zarówno trwałości materiału, jak i jego odporności na czynniki agresywne. Mikrorysy i rysy występujące w betonie sprzyjają również korozji zbrojenia.

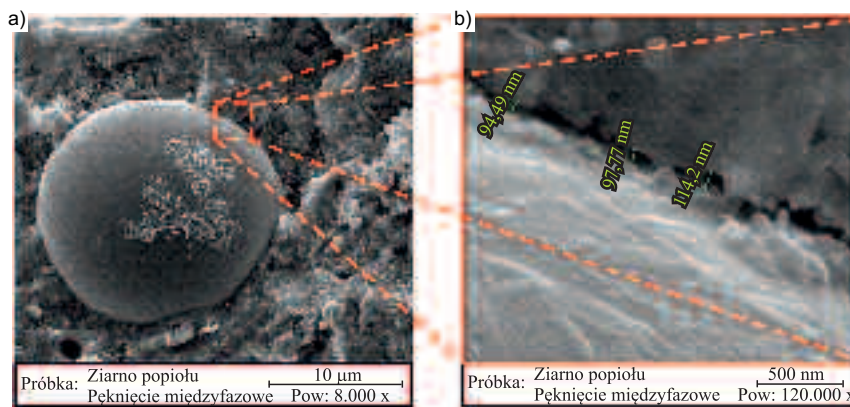
Materiały do wykonania fundamentu pod maszynę powinny być możliwie najlepszej jakości. Wymagane jest stosowa-

nie **kruszywa** grubego łamanego – pochodzącego ze skał magmowych plutonicznych (np. granity) lub wulkanicznych (np. bazalty). Betony wykonane na takich kruszywach charakteryzują się bowiem większą odpornością na pęknięcie niż betony żwirowe [16]. Uziarnienie kruszywa powinno się znajdować w optymalnym polu, pomiędzy granicznymi krzywymi uziarnienia. Niedopuszczalne jest stosowanie pospółki o niekontrolowanym uziarnieniu.

W odniesieniu do **spoiwa** wskazane jest stosowanie cementów wolnowiązujących, o niskiej temperaturze wiązania, ewentualnie z domieszkami chemicznymi opóźniającymi wiązanie mieszanki betonowej [4, 12]. Ponadto, aby zapewnić szczelność konstrukcji, należy stosować beton o niskim stosunku wodno-spoiwowym ($w/s = 0,4$ lub mniejszym). Ze względu na zwiększoną odporność na pęknięcie materiału, korzystne jest stosowanie spoiw z 20% dodatkiem popiołu lotnego [8, 9, 10]. Obecnie ten substytut spoiwa traktowany jest jako pełnowartościowy materiał budowlany [19], a beton z jego dodatkiem charakteryzuje się korzystną mikrostrukturą i bardzo małymi mikropełnieniami w warstwie stykowej (ITZ) kruszywa grubego z zaczynem [11].

W badaniach zaobserwowałem również, że styki ziaren popiołu lotnego z matrycą cementową mają mikropełnieniami kilkakrotnie mniejsze niż w przypadku uszkodzeń między ziarnami kruszywa grubego i matrycy. Fotografia 1 pokazuje ziarno popiołu lotnego widoczne w strukturze betonu przy dwóch różnych powiększeniach. Można zauważyć, że mikropełnieniami międzyfazowe mają tylko 100 nm. Są więc 7 razy mniejsze niż defekty w ITZ między kruszywem grubym a zaczynem [11]. W rezultacie struktura takiego kompozytu jest dokładniej zhomogenizowana, a przez to bardziej odporna na obciążenia dynamiczne.

Szczegółowe wymagania dotyczące stali zbrojeniowej. Zbrojenie konstrukcji obciążonych dynamicznie ma za zadanie nie tylko przenoszenie naprężeń rozciągających od sił i momentów spowodowanych obciążeniami zewnętrznymi, lecz również ochronę betonu przed powstawaniem rys skurczowych. Rysy te, niegroźne w konstrukcjach obciążonych statycznie, w elementach pracujących pod obciążeniem dynamicznym mogą powiększać się w szybkim tempie, zmieniając

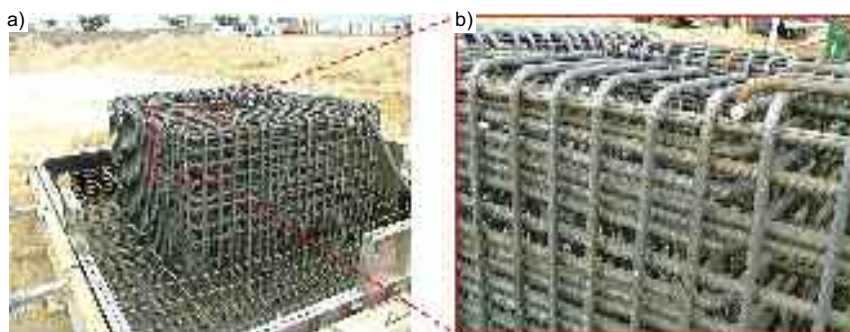


Fot. 1. Ziarno popiołu lotnego z widocznym pęknięciem międzyfazowym – powiększenie: a) 8000 x; b) 120 000 x

Photo 1. A particle of fly ash with visible interfacial microcrack – magnification: a) 8,000 x; b) 120 000 x

sztwywność i bezwładność układu: konstrukcja – źródło drgań. W związku z tym, w konstrukcjach obciążonych dynamicznie preferowane jest **wykonywanie zbrojenia głównego** (przenoszącego naprężenia rozciągające) **ze stali mniej kruchych, tzn. niższych klas**, np. stali zbrojeniowej zwykłej klasy C, gatunku RB 300. Oczywiście można też stosować stale bardziej kruche o wyższej granicy plastyczności, np. RB 400 i RB 500. Wówczas wymagane jest jednak bezwzględne sprawdzenie stanu granicznego użyteczności z uwagi na zarysowanie (wyłącznie metoda dokładna). Dodatkowo (w celu uniknięcia pojawienia się rys skurczowych) stosuje się zazwyczaj dużą ilość zbrojenia konstrukcyjnego.

Na fotografii 2 pokazano zbrojenie fundamentu kielichowego, w budowanej hali przemysłowej, w której będą występować obciążenia dynamiczne. Na fotografii 2b widać, że oprócz zbrojenia głównego w postaci ramek pionowych jest również duża ilość przeciwskurczowego zbrojenia konstrukcyjnego.



Fot. 2. Zbrojenie fundamentu kielichowego, który będzie obciążony dynamicznie: a) widok z boku; b) szczegół powiązanego zbrojenia
Photo 2. Reinforcement of the pocket foundation which will be loaded dynamically: a) side view; b) detail of the assembled reinforcement

Zalecenia dotyczące wykonawstwa

W przypadku fundamentów pod maszyny:

- betonowanie powinno odbywać się od początku do końca bez przerw w pracy;
- podczas betonowania należy zagęszczać mieszankę betonową wibratorami wgłębnymi;
- należy tak dobrać średnicę buławy wibratora, aby możliwe było zagęszczenie mieszanki w każdym miejscu fundamentu bez konieczności odginania prętów;
- zaraz po zabetonowaniu należy wygładzić powierzchnię; istotne jest uzyskanie poziomej, równej i gładkiej powierzchni od razu podczas betonowania bloku fundamentowego, gdyż późniejsze wyrównywanie lub uzupełnianie powierzchni zaprawą cementową może stanowić źródło uszkodzeń;
- dokładność wykonania powierzchni powinna odpowiadać tolerancji w postaci odchylenia od poziomu w każdym kierunku, nie więcej niż 1,5 mm/m;
- jeżeli w hali są urządzenia powodujące silne drgania, to na czas betonowania i przez 24 h po jego zakończeniu praca tych urządzeń powinna być wstrzymana;
- pielęgnacja betonu po zabetonowaniu powinna być szczególnie staranna, np. wnęka dla kowadła w fundamentach pod młoty powinna być zalana ciepłą wodą, a wszystkie powierzchnie betonu utrzymywane w stanie mokrym.

Wskazówki dotyczące eksploatacji i konserwacji

Ogólne wytyczne dotyczące konserwacji fundamentów pod maszyny. Prace przy konserwacji fundamentów należy wykonywać okresowo podczas postoju maszyn. W celu sprawdzenia poprawności wykonania fundamentu oraz kontroli oparcia maszyny na fundamencie w pierwszych dwóch miesiącach od uruchomienia maszyn przeglądy powinny być dokonywane raz na tydzień. W późniejszym okresie, po zebraniu odpowiednich doświadczeń dotyczących pracy fundamentu, okres między przeglądami może wynosić miesiąc. W konstrukcji maszyn nie wolno dokonywać żadnych zmian, które mogłyby zwiększyć obciążenia dynamiczne przekazywane na fundament;

Czyszczenie wnętrza fundamentu. Wszystkie pozostałości po przeprowadzonych procesach technologicznych, np. zendry, trociny itp., które spadły w okolice fundamentu, muszą być usunięte. Ze szczególną starannością należy kontrolować

wszystkie zagłębienia i otwory ukształtowane w fundamencie. W obszarze fundamentów blokowych i dolnych płyt fundamentów ramowych nie powinny znajdować się żadne przedmioty i urządzenia, które mogłyby hamować swobodę ruchów tych fundamentów. Należy kontrolować poprawność pracy instalacji odwadniającej dolną strefę fundamentów. Nie wolno dopuścić do gromadzenia się wody w tym obszarze ani tym bardziej podtapiania części maszyny;

Ochrona fundamentu przed zaolejeniem. Miejsca fundamentu, gdzie mogą dostawać się oleje techniczne i smary działające szkodliwie na beton, powinny

być zabezpieczone przez zastosowanie odpowiedniej wykładziny, zaprawy lub malowania, np. szkłem wodnym. Stosować można również rynienki blaszane lub rury odprowadzające ściekające oleje poza fundament [2];

Kontrola wibroizolatorów. W fundamentach wyposażonych w wibroizolatory należy kontrolować ich położenie, a w przypadku stwierdzenia zmiany położenia wibroizolatory nasunąć na właściwe miejsce. Bardzo dokładnie należy kontrolować stan sprężyn i gum w wibroizolatorach gumowych. Wszelkie uszkodzenia wibroizolatorów należy niezwłocznie usunąć. W przypadku zaobserwowania pęknięć w sprężynach należy je wymienić na nowe o tej samej charakterystyce.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że na etapie projektowania i realizacji fundamentów pod maszyny należy:

- uwzględnić wskazówki dotyczące wytrzymałości betonu;
- do produkcji betonu stosować materiały o najlepszej jakości;
- stosować kruszywo grube ze skał magmowych;
- wykorzystać jako spoiwo cement modyfikowany dodatkami mineralnymi i domieszkami chemicznymi, np. z 20% dodatkiem popiołów lotnych;

- stosować niski wskaźnik w/s;
- stosować dużą ilość zbrojenia konstrukcyjnego;
- zapewnić betonowanie konstrukcji bez przerw roboczych;
- zagęszczać mieszankę betonową wibratorami pograżalnymi, o odpowiednio dużej średnicy buławy;
- pamiętać o starannym wykonaniu powierzchni fundamentu i jego pielęgnacji;
- dbać o prawidłową konserwację konstrukcji w trakcie jej użytkowania.

Literatura

- [1] Adameczewski Grzegorz, Andrzej Garbacz, Tomasz Piotrowski, Kamil Załęgowski. 2013. „Zastosowanie komplementarnych metod NDT w dognostyce konstrukcji betonowych”. *Materiały Budowlane* 493 (9): 2 – 5.
- [2] Błaszczczyński Tomasz. 2011. „Assessment of RC structures influenced by crude oil products”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 11 (1): 5 – 17.
- [3] Bogusz Witold, Stanisław Łukasik, Tomasz Godlewski. 2018. „Wpływ procesu instalacji turbozespołu na zmiany przemieszczeń jego fundamentu”. *Materiały Budowlane* 548 (4): 45 – 46. DOI: 10.15199/33.2018.04.11.
- [4] Bołtryk Michał, Anna Krupa. 2015. „Kompozyty cementowe z wypełniaczem organicznym modyfikowane domieszkami”. *Materiały Budowlane* 520 (12): 46 – 48. DOI: 10.15199/33.2015.12.14.
- [5] Bońkowski Piotr, Maciej Minch Yan. 2016. „Analiza wyteżenia fundamentu ramowego pod zespół turbowentylatorów od obciążeń parasejsmicznych”. *Materiały Budowlane* 525 (5): 3 – 4. DOI: 10.15199/33.2016.05.01.
- [6] Dembiński Mariusz. 2009. „Przebudowa zniszczonego fundamentu młota matrycowego MPM 10 000 B”. *Inżynieria i Budownictwo* 11: 601 – 605.
- [7] Drobiec Łukasz. 2015. „Diagnostyka konstrukcji przemysłowych”. *Materiały Budowlane* 510 (2): 32–74. DOI: 10.15199/33.2015.02.08.
- [8] Golewski Grzegorz Ludwik. 2015. „Makroskopowa ocena procesów pęknięcia w betonach z popiołami lotnymi”. *Materiały Budowlane* 519 (11): 210–212. DOI: 10.15199/33.2015.11.66.
- [9] Golewski Grzegorz Ludwik. 2013. „Analiza odporności na pęknięcie, przy trzecim modelu pęknięcia betonów z dodatkiem popiołów lotnych”. *Budownictwo i Architektura* 12 (3): 145 – 152.
- [10] Golewski Grzegorz Ludwik. 2015. *Procesy pęknięcia w betonie z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych*. Politechnika Lubelska, Lublin.
- [11] Golewski Grzegorz Ludwik. 2013. „Odporność na pęknięcie a mikrostruktura w betonach z dodatkiem popiołów lotnych”. *Materiały Budowlane* 494 (10): 28 – 30.
- [12] Gołaszewski Jacek. 2013. „Współpraca domieszek z cementami”. *Materiały Budowlane* 495 (11): 89 – 92.
- [13] Hoła Jerzy, Krzysztof Schabowicz. 2015. „Diagnostyka obiektów budowlanych”. *Materiały Budowlane* 513 (5): 3 – 7. DOI: 10.15199/33.2015.05.01.
- [14] Marcinkowski Jakub. 2012. „Zagrożenia obiektów budowlanych wynikające z powstania drgań o charakterze rezonansowym”. *Przegląd Budowlany* 5: 129 – 132.
- [15] Musiał Michał, Mieczysław Kamiński, Jacek Grosel. 2015. „Modernizacja żelbetowego, ramowego fundamentu pod turbozespół”. *Materiały Budowlane* 517 (9): 78 – 79. DOI: 10.15199/33.2015.09.28.
- [16] Prakash S., V. K. Puri. 2006. „Foundations for vibrating machines”. *Journal of Structural Engineering Special Issue April-May*: 1 – 39.
- [17] Runkiewicz Leonard, Jan Sieczkowski. 2017. „Diagnostyka eksploatacyjnych strunobetonowych dźwigarów dachowych”. *Materiały Budowlane* 543 (11): 11–12. DOI: 10.15199/33.2015.11.04.
- [18] Schabowicz Krzysztof, Dorota Jawor, Łukasz Radzik. 2015. „Analiza nieniszczących metod akustycznych do badania remontowanych konstrukcji betonowych”. *Materiały Budowlane* 519 (11): 103 – 105. DOI: 10.15199/33.2015.11.31.
- [19] Wiśniewska Krystyna. 2015. „Popioły z energetyki pełnowartościowymi surowcami dla budownictwa”. *Materiały Budowlane* 520 (12): 41. DOI: 10.15199/33.2015.12.12.
- [20] Zamorowski Jan, Grzegorz Gremza. 2016. „Problemy dotyczące eksploatacji konstrukcji wsporczych suwnic pomostowych”. *Materiały Budowlane* 522 (2): 3 – 4. DOI: 10.15199/33.2016.02.14.

Przyjęto do druku: 21.01.2019 r.



GammaCAD

AXISVM

Program
do analiz
i wymiarowania
konstrukcji
budowlanych

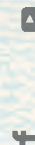
ŻELBET | STAL | DREWNO | FUNDAMENTY

→ GOTOWY NA BIM

→ LICENCJA WIECZYSTA

→ ZAAWANSOWANE MOŻLIWOŚCI

→ WYMIAROWANIE WG PN-EN



GammaCAD sp. z o.o.

a: ul. R. Maya 1/102, Poznań

e: biuro@gammacad.pl

t: 61 307 16 33

POBIERZ
PRZETESTUJ

www.gammacad.pl