

Wpływ sposobu posadowienia młotów kuźniczych na ich kinematykę i dynamikę

Influence of foundation types on kinematics and dynamics of forging hammers

ARKADIUSZ TRĄBKA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.137>

W artykule badano wpływ sposobu posadowienia młotów kuźniczych na ich kinematykę i dynamikę. Porównano trzy typy fundamentów pod młoty kuźnicze. Modele obliczeniowe analizowano numerycznie w programie Matlab. Ustalono, który typ fundamentu zapewnia młotom kuźniczym najkorzystniejsze warunki pracy. Wskazano także na ograniczenia użytkowania młotów w zależności od typu fundamentu.

SŁOWA KLUCZOWE: fundamenty pod młoty kuźnicze, modele obliczeniowe, kinematyka i dynamika młotów kuźniczych

In the paper the influence of foundation types on kinematics and dynamics of forging hammers was analysed. Three types of foundations for forging hammers were compared. Computational models were analysed numerically in the Matlab program. It was established which type of foundation provides the most favourable working conditions for forging hammers. Restrictions on the use of hammers depending on the type of foundation were also indicated.

KEYWORDS: foundations for forging hammers, computational models, kinematics and dynamics of forging hammers

Młoty kuźnicze to urządzenia, których eksploatacji towarzyszy występowanie bardzo dużych obciążeń dynamicznych oraz drgań o znacznych amplitudach. Z uwagi na wymienione oddziaływania młoty muszą być posadowione na specjalnie dla nich opracowanych konstrukcjach wsporczych. Zadaniem tych konstrukcji jest skuteczne ograniczanie zarówno powstawania obciążeń dynamicznych, jak i ich przekazywania do podłoża [1, 4, 7, 10, 12].

Na podstawie badań doświadczalnych oraz analiz modeli obliczeniowych opracowano różne koncepcje wykonania fundamentów pod młoty kuźnicze [3, 7, 8, 10]. Do najczęściej spotykanych należą fundamenty przedstawione na rys. 1.

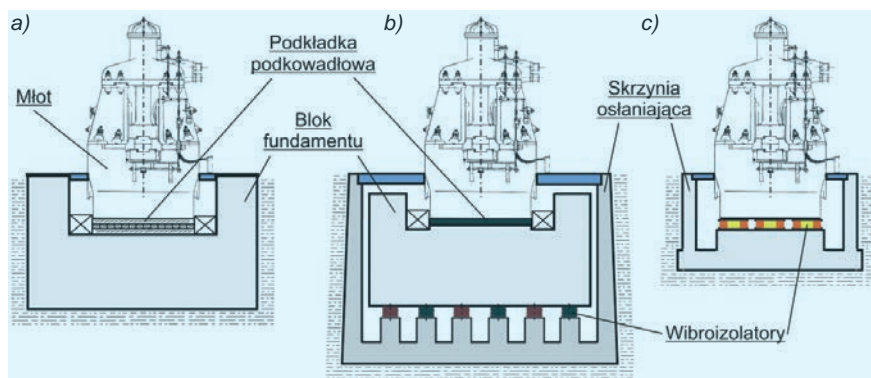
W odniesieniu do poszczególnych metod fundamentowania przeprowadzono wiele analiz [1, 2, 4–7, 9, 11, 12]. W żadnej z wyszukanych pozycji literaturowych nie natrafiono jednak na opracowanie zawierające bezpośrednie porównanie metod fundamentowania zaprezentowanych na rys. 1. Autorzy artykułu postanowili wypełnić tę lukę i porównać różne układy dy-

namiczne typu młot–fundament–podłoże gruntowe oraz ustalić na tej podstawie, który fundament zapewnia młotom kuźniczym najkorzystniejsze warunki pracy.

Aby uzyskać jednoznaczne rezultaty porównawcze, zdecydowano, że analizie zostanie poddany młot o tzw. średnich wielkościach charakterystycznych, dla którego znane są zrealizowane zabudowy na każdym z rozpatrywanych typów fundamentów. Obiektem, który spełnia te wymagania, jest młot matrycowy parowo-powietrzny typu MPM 10000 B [9].

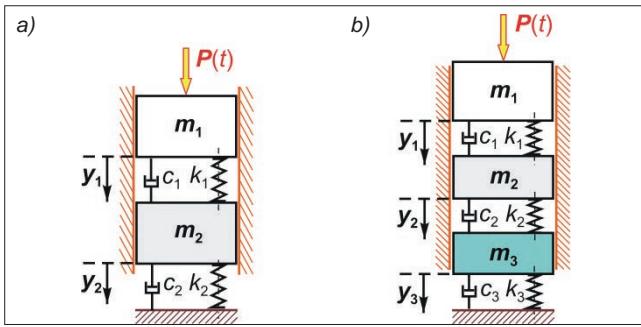
Modele fizyczne rozpatrywanych układów dynamicznych

Opracowanie modeli obliczeniowych rozpoczęto od przyjęcia założeń upraszczających rzeczywiste struktury, w wyniku czego otrzymano ich modele fizyczne (rys. 2). W procesie zastępowania rzeczywistych struktur modelami fizycznymi założono m.in., że młot, blok fundamentu oraz skrzynia osłaniająca są współosiowo położonymi, nieodkształcalnymi bryłami materialnymi o możliwym prostoliniowym ruchu względnym. Rolę więzów dla poszczególnych brył spełnia ciało Kelvina–Voigta. Więzy są rozpatrywane jako nieważkie. Więzom tym przyporządkowuje się wyznaczane doświadczalnie lub obliczeniowo sztywności i tłumienia o liniowych charakterystykach. Podłoże gruntowe pod fundament, zgodnie z technicznym modelem Sawinowa [7], jest traktowane jako element o własnościach sprężysto-tłumiących. Własności podłoża są reprezentowane przez sztywności i tłumienia o liniowych charakterystykach.



Rys. 1. Typy fundamentów pod młoty kuźnicze: a) żelbetowy blok fundamentu posadowiony bezpośrednio na gruncie (fundament typu A), b) żelbetowy blok fundamentu oparty na wibroizolacji sprężynowo-gumowej w żelbetowej skrzyni osłaniającej (fundament typu B), c) bezpośrednie posadowienie młota na wibroizolacji sprężynowo-lepkościowej w żelbetowej skrzyni osłaniającej (fundament typu C)

* Dr inż. Arkadiusz Trąbka (atrabka@ath.bielsko.pl) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej



Rys. 2. Modele fizyczne rozpatrywanych układów dynamicznych młot-fundament-podłoże gruntowe: a) model odpowiadający fundamentom typu A i C, b) model odpowiadający fundamentowi typu B

Modele matematyczne i ich parametry

Model matematyczny układu złożonego z dwóch elementów masowych (rys. 2a) zapisano pod postacią równań ruchu, które sformułowano na podstawie zasady d'Alemberta dla przypadku drgań wymuszonych tłumionych:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \ddot{y}_1 + c_1 \cdot (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_1 \cdot (y_1 - y_2) &= P(t) \\ m_2 \cdot \ddot{y}_2 + c_1 \cdot (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_1 \cdot (y_2 - y_1) + & \\ + c_2 \cdot \dot{y}_2 + k_2 \cdot y_2 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: m_1 – masa młota; m_2 – masa bloku fundamentu (rys. 1a) lub skrzyni osłaniającej (rys. 1c); c_1 – współczynnik tłumienia podkładki podkowiadłowej (rys. 1a) lub wibroizolatorów (rys. 1c); c_2 – współczynnik tłumienia podłoża gruntowego; k_1 – sztywność podkładki podkowiadłowej (rys. 1a) lub wibroizolatorów (rys. 1c); k_2 – sztywność podłoża; $P(t)$ – przebieg czasowy siły uderzenia; $\ddot{y}_i, \dot{y}_i, y_i$ – odpowiednio: przyspieszenie, prędkość i przemieszczenie i -tej masy ($i = 1, 2$).

Dla układu złożonego z trzech elementów masowych (rys. 2b) model matematyczny zapisano pod postacią równań ruchu:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \ddot{y}_1 + c_1 \cdot (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k_1 \cdot (y_1 - y_2) &= P(t) \\ m_2 \cdot \ddot{y}_2 + c_1 \cdot (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_1 \cdot (y_2 - y_1) + & \\ + c_2 \cdot (\dot{y}_2 - \dot{y}_3) + k_2 \cdot (y_2 - y_3) &= 0 \quad (2) \\ m_3 \cdot \ddot{y}_3 + c_2 \cdot (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + k_2 \cdot (y_3 - y_2) + & \\ + c_3 \cdot \dot{y}_3 + k_3 \cdot y_3 &= 0 \end{aligned}$$

gdzie: m_1, m_2, m_3 – kolejno masy: młota, bloku fundamentu i skrzyni osłaniającej; c_1, c_2, c_3 – współczynniki tłumienia: podkładki podkowiadłowej, wibroizolatorów oraz podłoża gruntowego; k_1, k_2, k_3 – sztywność: podkładki podkowiadłowej, wibroizolatorów oraz podłoża; $P(t)$ – przebieg czasowy siły uderzenia; $\ddot{y}_i, \dot{y}_i, y_i$ – odpowiednio: przyspieszenie, prędkość i przemieszczenie i -tej masy ($i = 1, 2, 3$).

Przebieg czasowy siły uderzenia przyjęto w postaci impulsu prostokątnego [1, 7]:

$$P(t) = \begin{cases} P_m = \frac{S}{\tau} = \frac{(1+R) \cdot \sqrt{2 \cdot U \cdot m_B}}{\tau} & \text{dla } 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \text{dla } t > \tau \end{cases} \quad (3)$$

gdzie: P_m – maksymalna wartość siły uderzenia, S – wielkość impulsu obciążenia, τ – czas działania obciążenia, R – współczynnik restytucji, U – energia pełnego uderzenia młota, m_B – masa bijaka.

Różniczkowe równania ruchu (1) i (2) rozwiązano numerycznie w programie Matlab. Całkowanie równań wykonano metodą Rungego-Kutty IV rzędu, z wykorzystaniem własnych skryptów obliczeniowych.

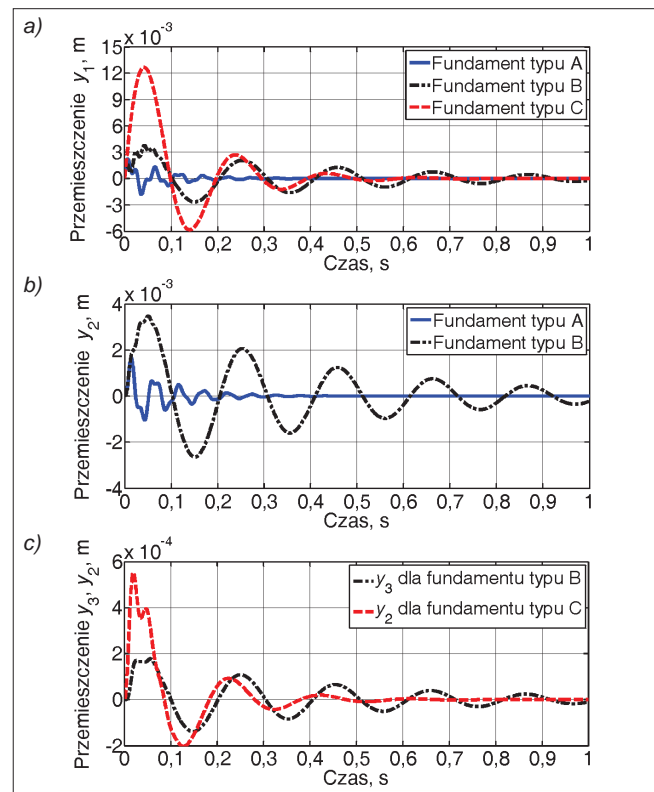
Parametry modeli określono na podstawie danych charakteryzujących rzeczywisty młot matrycowy parowo-powietrzny typu MPM 10000 B oraz rzeczywiste, zrealizowane sposoby posadowienia. Przy wyznaczaniu parametrów podłoża założono, że wszystkie fundamenty spoczywają na gruncie o takich samych własnościach. Zestawienie parametrów modeli obliczeniowych zamieszczono w tabelcy.

TABLICA. Parametry modeli obliczeniowych

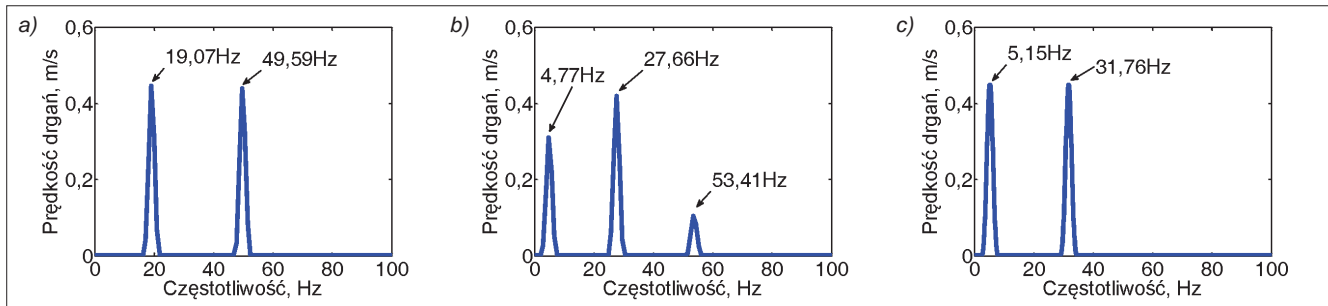
Parametr	Oznaczenie	Typ fundamentu		
		A	B	C
Masa, kg	m_1	103 000	103 000	103 000
	m_2	265 213	402 780	97 152
	m_3		336 882	
Sztywność, N/m	k_1	$6717 \cdot 10^6$	$9300 \cdot 10^6$	$114 \cdot 10^6$
	k_2	$5766 \cdot 10^6$	$506 \cdot 10^6$	$3744 \cdot 10^6$
	k_3		$9600 \cdot 10^6$	
Tłumienie, N·s/m	c_1	$1,298 \cdot 10^6$	$4,63 \cdot 10^6$	$1,716 \cdot 10^6$
	c_2	$9,387 \cdot 10^6$	$2,724 \cdot 10^6$	$5,577 \cdot 10^6$
	c_3		$18,32 \cdot 10^6$	

Wyniki i ich analiza

W celu ustalenia, jak na wybrane wielkości dynamiczne i parametry kinematyczne młotów kuźniczych wpływają poszczególne metody fundamentowania, analizie poddano jednokrotne uderzenie bijaka o masie $m_B = 4950$ kg w kształtowany materiał. Założono, że uderzenie następuje z maksymalną energią kinetyczną $U = 110 \cdot 10^3$ J, a współczynnik restytucji $R = 0,8$, co odpowiada wykonywaniu najcięższych prac na młotach matrycowych [4].



Rys. 3. Przebiegi czasowe przemieszczeń: a) młota y_1 , b) bloku fundamentu y_2 (dla fundamentów typu A i B), c) skrzyni osłaniającej y_3 (dla fundamentu typu B) i y_2 (dla fundamentu typu C)



Rys. 4. Widma amplitudowe prędkości drgań dla modeli odpowiadających fundamentom: a) typu A, b) typu B, c) typu C

Obliczenia przeprowadzono dla maksymalnej siły $P_m = 59,4 \cdot 10^6$ N, której wartość obliczono na podstawie równania (3), przyjmując, że czas działania obciążenia $\tau = 0,001$ s.

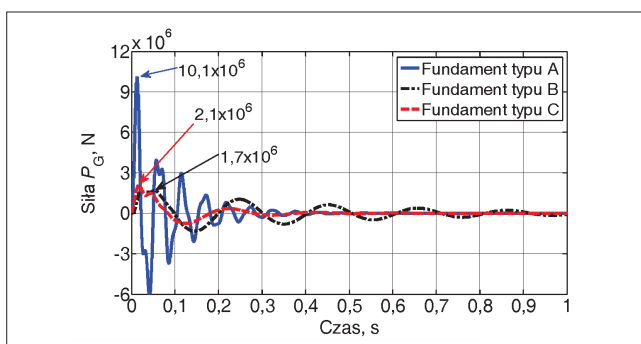
Dla każdego typu fundamentu wyznaczono przebiegi czasowe przemieszczeń, prędkości oraz przyspieszeń drgań młota i bloku fundamentu oraz/lub skrzyni osłaniającej.

Z przebiegów czasowych przemieszczeń (rys. 3) odczytano, że najmniejsze przemieszczenia młota występują dla fundamentu typu A. Z kolei największe przemieszczenia młota (niemal sześciokrotnie większe niż dla fundamentu typu A) pojawiają się bezpośrednio po uderzeniu bijaka w przypadku fundamentu typu C. Tylko dla fundamentów typu A i B przemieszczenia młota nie przekraczają wartości dopuszczalnych, tj. 4 mm [4, 6].

W odniesieniu do bloku fundamentu (fundament typu A) stwierdzono, że jego maksymalne przemieszczenie jest o 41% większe niż dopuszczalne (1,2 mm według [6, 7, 10]) dla tego typu fundamentów. Przekroczenie dopuszczalnego poziomu amplitud drgań stwierdzono także w przypadku fundamentu typu C – maksymalne przemieszczenie skrzyni osłaniającej okazało się większe od dopuszczalnego (0,2 mm według [7, 10]) aż o 175%. Jedynie dla fundamentu typu B nie doszło do przekroczenia poziomu amplitud dopuszczalnych.

Stosując szybką transformatę Fouriera (FFT), sporządzono charakterystyki widmowe prędkości drgań (rys. 4), a następnie odczytano z nich częstotliwości drgań swobodnych rozpatrywanych układów dynamicznych. Stwierdzono, że podstawowa częstotliwość drgań swobodnych tylko w przypadku fundamentów typu B i C mieści się w przedziale 2÷6 Hz, który jest zalecany dla tego typu konstrukcji [7].

Obciążenia dynamiczne gruntu przedstawiono na rys. 5. Stwierdzono, że najmniejsze obciążenia dynamiczne gruntu występują dla fundamentu typu B. Siły przekazywane do gruntu przez fundament typu C są większe o 23,5%, natomiast fundament typu A oddziałuje na grunt z niemal sześciokrotnie większą siłą od występującej dla fundamentu typu B.



Rys. 5. Przebiegi czasowe sił przekazywanych do gruntu

Wnioski

W artykule omówiono wpływ zastosowanego typu fundamentu (rys. 1) na wybrane wielkości dynamiczne oraz parametry kinematyczne młotów kuźniczych.

Na podstawie analizy modeli układów dynamicznych młot–fundament–podłoże gruntowe stwierdzono, że najkorzystniejsze warunki pracy zapewnia posadowienie młota na fundamencie złożonym z: podkładki podkrowdłowej, żelbetowego bloku, wibroizolacji oraz żelbetowej skrzyni osłaniającej (fundament typu B). Maksymalne amplitudy przemieszczeń tylko dla tego typu fundamentu nie przekroczyły bowiem wartości dopuszczalnych. Posadowienie młota na fundamencie typu B zapewnia jednocześnie najmniejsze obciążenie dynamiczne gruntu.

Ponadto ustalono, że młoty posadowione na fundamentach typu A i C (rys. 1) nie powinny być używane do wykonywania ciężkich prac kuźniczych (w przypadku fundamentu typu A – głównie ze względu na bardzo duże obciążenia dynamiczne podłoża, natomiast w przypadku fundamentu typu C – z uwagi na nadmierne drgania zarówno skrzyni osłaniającej, jak i samego młota).

LITERATURA

1. Chehab A.G., El Naggar M.H. "Design of efficient base isolation for hammers and presses". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 23 (2003): s. 127–141.
2. Chehab A.G., El Naggar M.H. "Response of block foundations to impact loads". *Journal of Sound and Vibration*. 276, 1–2 (2004): s. 293–310.
3. Dembiński M. „Nowe tendencje w kształtowaniu fundamentów młotów matrycowych”. *Mechanik*. 12 (1996): s. 543.
4. Dresig H., Holzweißig F. „*Dynamics of machinery*”. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
5. El Hifnawy L., Novak M. "Response of hammer foundations to pulse loading". *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 3, 3 (1984): s. 124–132.
6. Heidari M., El Naggar M.H. "Using reinforced soil systems in hammer foundations". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. GI2 (2010): s. 121–132.
7. Lipiński J. „*Fundamenty pod maszyną*”. Warszawa: Wyd. Arkady, 1985.
8. Łańczak W., Penno M. „Nowe sposoby kształtowania i posadowienia fundamentów młotów kuźniczych”. *Mechanik*. 6 (1979): s. 325–330.
9. Majewski L., Trąbka A. "Assessment of dynamical properties of die hammer MPM 10000 B considering deformations of working material". *Solid State Phenomena*. 144 (2009): s. 71–76.
10. Major A. „*Dynamics in civil engineering – analysis and design – volume II*”. Budapest: Akademiai Kiado, 1980.
11. Novak M., El Hifnawy L. "Vibration of hammer foundations". *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2, 1 (1983): s. 43–53.
12. Wang G., Dong Z. "Design optimization of low impact transmission foundation for forging hammers". *Engineering Computations*. 23, 2 (2006): s. 166–186.