

Dariusz ROZUMEK¹
Roland PAWLICZEK²
Janusz LEWANDOWSKI³

STANOWISKO DO BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH MATERIAŁÓW PRZY ZGINANIU ZE SKRĘCANIEM

W pracy zaprezentowano budowę, zasadę działania i pomiary na maszynie wytrzymałościowej do badań zmęczeniowych. Maszyna przeznaczona jest do badań zmęczeniowych próbek z materiałów konstrukcyjnych pracujących przy cyklicznie zmiennych obciążeniach zginających, skręcających i proporcjonalnym zginaniu ze skręcaniem. Można zadawać obciążenia z zerową lub różną od zera wartością średnią momentu. W pracy przedstawiono przykładowe pomiary statyczne i cykliczne na dźwigni maszyny i badanej próbce dotyczące cechowania stanowiska przy zginaniu i skręcaniu oraz wpływu wartości średniej obciążenia.

Słowa kluczowe: cechowanie maszyny, pomiary odkształceń, badania cykliczne, wartość średnia

1. Wprowadzenie

W przemyśle większość pracujących maszyn podlega wpływom różnych drgań, co mocno oddziałuje na dynamikę maszyny [1]. Z reguły drgania te są niepożądane i wpływają niekorzystnie na konstrukcję powodując powstawanie pęknięć w materiale, co w ostateczności prowadzi do zniszczenia urządzenia. Niektóre konstrukcje jednakże realizują zadania wykorzystując powstawanie drgań, np. wstrząsarki, przesiewacze, urządzenia do zagęszczania gruntu. Znajomość zależności kinematycznych i dynamicznych w takich urządzeniach jest zagadnieniem kluczowym przy projektowaniu i określaniu warunków pracy urządzenia.

Celem pracy jest przedstawienie maszyny zmęczeniowej na zginanie ze skręcaniem, procedury związanej z przygotowaniem stanowiska do badań i określenia dynamiki stanowiska w czasie badania próbek materiału.

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Dariusz Rozumek, Politechnika Opolska, Katedra Mechaniki i PKM, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole; tel. 774498410; d.rozumek@po.opole.pl

² Roland Pawliczek, Politechnika Opolska, Katedra Mechaniki i PKM, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole; tel. 774498404; r.pawliczek@po.opole.pl

³ Janusz Lewandowski, Politechnika Opolska, Katedra Mechaniki i PKM, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole; tel. 604585204; janusz210@wp.pl

2. Opis procedury badawczej

2.1. Maszyna do badań zmęczeniowych

Badania dynamiki maszyny i rozwoju pęknięć zmęczeniowych przy kombinacji zginania ze skręcaniem prowadzono na maszynie MZGS-100 [2, 3] umożliwiającej realizację przebiegów cyklicznie zmiennych obciążeń zginania, skręcania i proporcjonalnego zginania ze skręcaniem. Występująca podczas badań, siła tnąca ma bardzo małe wartości, które wynoszą poniżej 2% maksymalnego momentu zginającego. Schemat maszyny przedstawiono na rys. 1. Obciążenie próbki pokazane na rys. 1 składa się ze statycznego i cyklicznie zmiennego momentu; stan naprężenia uzależniony jest od kąta ustawienia głowicy obrotowej (rys. 1, pozycja 3) na maszynie MZGS-100. W skład urządzenia wchodzi zespół napędowy, ustalający i mocujący próbkę, obciążający i kontrolno-pomiarowy. Zespół napędowy składa się z silnika (9), zamocowanego na podstawie (5), który za pomocą paska (14) napędza tarczę wirującą (11). Silnik sterowany jest układem falownika napięcia (7), który umożliwia regulację częstotliwości zmiany obciążenia i jej stabilizację na poziomie około 29 Hz, płynny rozruch i wyłączenie silnika w momencie pęknięcia próbki. Układ (7) umożliwia także pomiar liczby cykli i zmian obciążenia od początku do końca trwania próby. Zespół mocujący składa się z podstawy (4) z zamocowaną na niej głowicą obrotową (3). W górnej części głowicy występuje zacisk (2), mocujący jeden koniec próbki (1). Drugi koniec próbki mocowany jest w uchwycie (6), połączonym przegubowo z dźwignią (8). Głowica (3) może być ustawiona pod dowolnym kątem w zakresie $\alpha = 0 \div \pi/2$ [rad]. Dźwignia (8) i cięgno (10) łączą zespół mocujący z zespołem obciążającym. Zespół obciążający to tarcza wirująca (11) osadzona na płaskich sprężynach (12). Do tarczy mocowane są ciężarki (13) wywołujące niewyrównoważenie ruchu tarczy. Obciążenie następuje na skutek ruchu dźwigni w płaszczyźnie pionowej, wywołanego siłami niewyrównoważonego ciężarka (13) na tarczy wirującej (11). Do podstawy (5) przymocowany jest siłownik sprężynowy (15), który umożliwia zadawanie średniej wartości obciążenia poprzez odpowiednie ugięcie sprężyny (16) siłownika. Siłownik jest sprzężony z dźwignią (8) poprzez cięgno (17) i obciąża ją dodatkową, stałą siłą. Obciążenie próbki składa się ze statycznego i cyklicznie zmiennego momentu

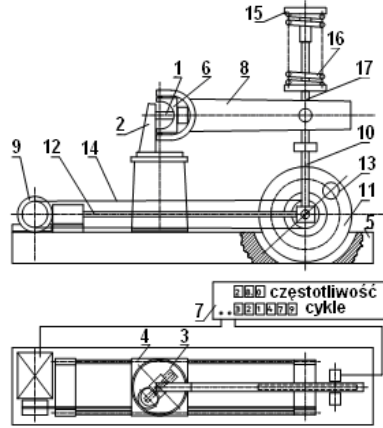
$$M(t) = M_m + M_a \sin \omega t \quad (1)$$

gdzie: M_m – moment średni [N·m],

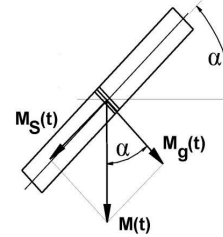
M_a – amplituda momentu [N·m],

ω_n – częstość kołowa [s^{-1}],

t – czas [h].



Rys. 1. Schemat maszyny zmęczeniowej MZGS-100
Fig. 1. Fatigue test stand MZGS-100



Rys. 2. Schemat obciążenia próbki
Fig. 2. Loading of the specimen

Stan naprężenia uzależniony jest od kąтового ustawienia głowicy obrotowej (rys. 2). Wartości momentów skręcającego $M_s(t)$ i zginającego $M_g(t)$ są związane następującymi zależnościami [3]

$$\overline{M}(t) = \overline{M}_s(t) + \overline{M}_g(t), \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{M_s(t)}{M_g(t)} \quad (2)$$

W położeniach pośrednich $0 < \alpha < \pi/2$ [rad], występują obydwa momenty jednocześnie i ich wartości określano z zależności:

$$\begin{aligned} M_{g\alpha}(t) &= (M_m + M_a \sin \omega t) \cos \alpha, \\ M_{s\alpha}(t) &= (M_m + M_a \sin \omega t) \sin \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

Rezultatem działania obydwu zsynchronizowanych momentów jest stan naprężenia, w którym nominalne naprężenia normalne $\sigma_\alpha(t)$ i styczne $\tau_\alpha(t)$ zmieniają swoje wartości zgodnie w fazie i z jednakową częstością kątową ω_n .

2.2. Cechowanie maszyny

Przed wykonaniem badań należy określić jakie wartości sił obciążających odpowiadają stosowanym układom ciężarków [4]. Metoda cechowania statycznego stanowiska polega na ustaleniu zależności między wartościami odkształceń na dźwigni i na próbce, a wartościami obciążenia wzorcowego, tj. ciężarkami o znanej masie zawieszonymi na dźwigni. W przypadku pomiaru odkształceń na dźwigni maszyny (rys. 3) zastosowano układ tensometrów w pełnym mostku. Do pomiarów odkształceń dźwigni użyto tensometrów typu TFs-5, natomiast do pomiarów odkształceń na próbce używano tensometrów TF1 produkcji TENMEX. Dźwignia maszyny posiada dużą sztywność w związku z tym wystę-

puje liniowa zależność odkształcenia w szerokim zakresie obciążenia. Cechowanie maszyny na podstawie sygnału z dźwigni pozwala określić naprężenia nominalne w badanej próbce. Cechowanie dla zginania wykonano według algorytmu:

- **Wyznaczenie statycznej charakterystyki stanowiska.** Dźwignia stanowiska została obciążona zestawem wzorcowych ciężarków. Za pomocą mostka tensometrycznego odczytano wartości odkształceń pojawiających się na dźwigni i próbce dla poszczególnych układów ciężarków. Na podstawie odczytanych odkształceń zbudowano wykres i określono krzywą cechowania dla dźwigni i próbki.
- **Określenie częstotliwości rezonansowej maszyny.** Po zamocowaniu próbki przegubowej w uchwycie maszyny i obciążeniu tarczy wirującej ciężarkiem o małej masie, zwiększano częstotliwość obrotów tarczy i obserwowano drgania dźwigni maszyny. Z chwilą osiągnięcia częstotliwości rezonansowej amplituda drgań dźwigni maszyny osiąga wartość maksymalną.
- **Cechowanie dynamiczne stanowiska.** Dynamiczne cechowanie maszyny wykonano poprzez pomiar amplitudy odkształcenia dźwigni i próbki podczas pracy stanowiska. Wartość amplitudy odkształcenia przeliczono na obciążenie wykorzystując krzywą cechowania dźwigni. W ten sposób można określić wartość obciążenia odpowiadającego danemu zestawieniu ciężarków. Aby wyliczyć wartość obciążenia dla układu ciężarków należy sumować algebraiczne wartości obciążenia wyznaczone dla poszczególnych ciężarków.
- **Pomiar odkształcenia w czasie pracy stanowiska.** Wyżej opisany układ pomiarowy wyposażony dodatkowo w komputer i kartę pomiarową pozwala na rejestrację przebiegów zmian odkształceń na dźwigni i próbce w czasie trwania badań doświadczalnych. Wykonując takie pomiary można określić krzywą cyklicznego odkształcenia próbki.

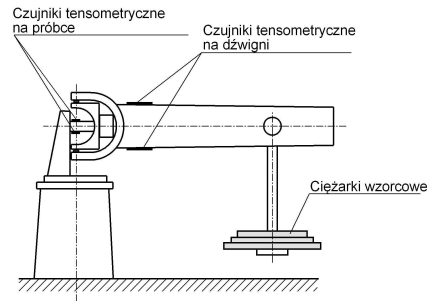
2.3. Badany materiał i próbka

Materiałem z którego zostały wykonane próbki była stal 10HNAP. Właściwości statyczne badanej stali podano w tabeli 1 [3]. Próbki zostały wycięte z blachy o grubości 16 mm zgodnie z kierunkiem walcowania. Kształt i wymiary próbek przyjętych do badań pokazano na rys. 4.

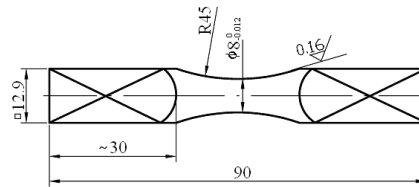
Tabela 1. Właściwości statyczne stali 10HNAP

Table 1. Static properties of 10HNAP steel

Granica plastyczności R_e [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Moduł Younga E [GPa]	Współczynnik Poissona ν [-]	Wydłużenie względne A_{10} [%]
418	566	215	0,29	35,7



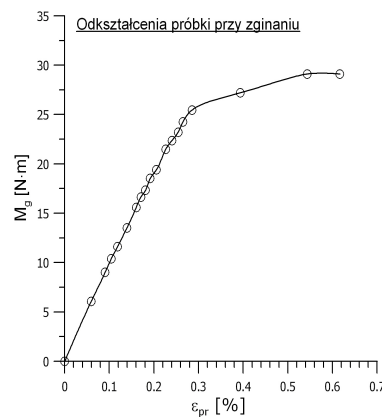
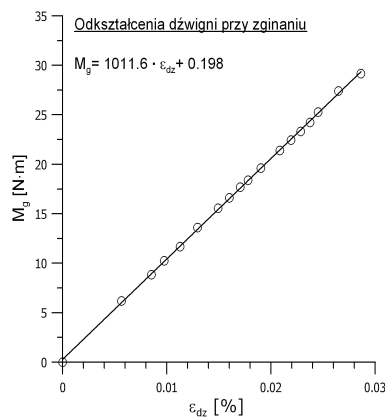
Rys. 3. Schemat układu cechowania maszyny
Fig. 3. Scheme of calibration machines



Rys. 4. Kształt i wymiary próbek
Fig. 4. Shape and dimensions of specimen

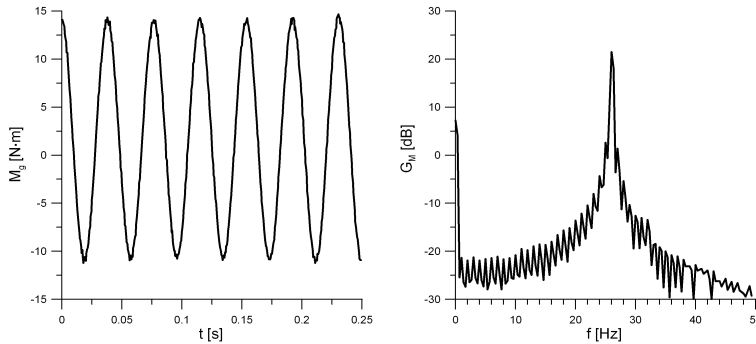
3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki cechowania statycznego i pomiarów odkształceń dla dźwigni maszyny oraz próbki przy zginaniu i skręcaniu pokazano na rys. 5 i 6. Z pomiarów wynika, że w przypadku dźwigni punkty pomiarowe układają się w linii prostej, co świadczy o dużej sztywności układu. Zbliżone też są parametry równań regresji dla zginania i skręcania. W przypadku próbek zaobserwowano pojawienie się odkształceń plastycznych na poziomie obciążenia około $M_b = 25 \text{ N}\cdot\text{m}$ i $M_s = 23 \text{ N}\cdot\text{m}$. Po przeprowadzeniu badań statycznych wykonano testy dynamiczne. W czasie pracy urządzenia pośrednio za pomocą odkształcenia dźwigni mierzone są wartości chwilowe momentu. Mają one charakter przebiegu sinusoidalnego. Przykładowe badania cykliczne i widmo mocy zarejestrowanej historii czasowej momentu pokazano na rys. 6. W oparciu o przedstawiony sposób pomiaru odkształceń na próbce wykonano badania zmęczeniowe.



Rys. 5. Odkształcenia dźwigni i próbki przy statycznym zginaniu

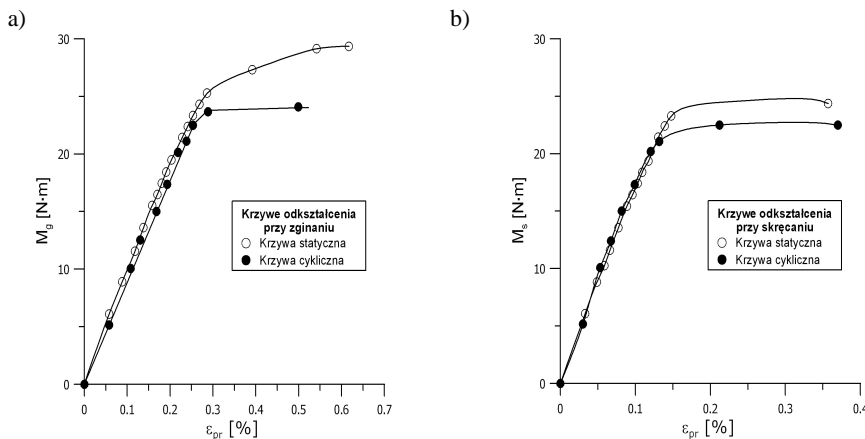
Fig. 5. Strain of the lever and the specimen at static bending



Rys. 6. Przykładowy przebieg amplitudy momentu i widmo mocy zarejestrowanego sygnału obciążenia

Fig. 6. An example the course of amplitude of the moment and the resonance frequency of the machine

Rys. 7 przedstawia krzywe odkształcenia przy statycznym oraz cyklicznym zginaniu i skręcaniu. Na rys. 7a widoczna jest liniowa zależność pomiędzy obciążeniem, a odkształceniem próbki przy obciążeniach cyklicznych w zakresie od $M_g = 0$ do około $M_g = 22$ N·m. Porównując krzywą statyczną z krzywą cykliczną obserwuje się pojawienie odkształceń plastycznych przy różnych wartościach obciążenia.

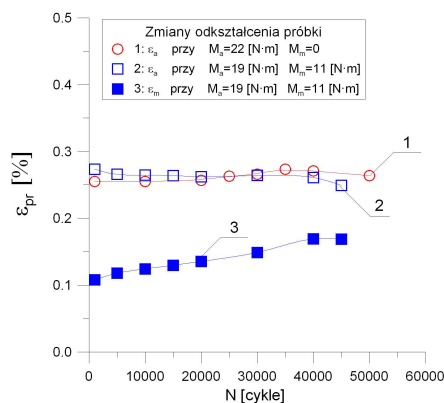


Rys. 7. Krzywe statycznego i cyklicznego odkształcenia próbek przy a) zginaniu i b) skręcaniu

Fig. 7. Curves of static and cyclic strain specimens for a) bending and b) torsion

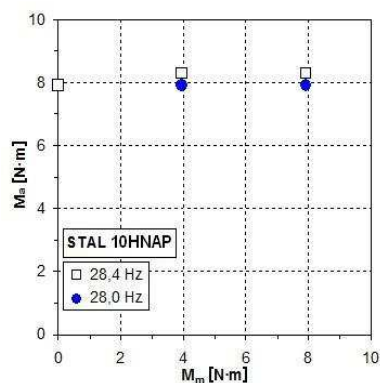
Dla krzywej statycznej jest to obciążenie około 25,5 N·m, a dla krzywej cyklicznej około 23 N·m. W przypadku skręcania w zakresie od $M_s = 0$ do około $M_s = 20$ N·m również widoczna jest liniowa zależność pomiędzy obciążeniem, a odkształceniem próbki dla obciążeń cyklicznych. Porównując krzywą statyczną

ną z krzywą cykliczną obserwuje się pojawienie odkształceń plastycznych przy różnych wartościach obciążenia. Dla krzywej statycznej jest to obciążenie około 23,5 N·m, a dla krzywej cyklicznej około 20 N·m. Stosunek obciążeń cyklicznych do obciążeń statycznych wywołujących w próbce odkształcenia plastyczne wynosi dla zginania $M'_{ge}/M_{ge} = 0,9$ (M'_{ge} – moment dla krzywej zmęczeniowej, M_{ge} – moment dla krzywej statycznej), a dla skręcania $M'_{se}/M_{se} = 0,89$. Z badań zmęczeniowych przy rozciąganiu-ściskaniu dla krzywej cyklicznego odkształcenia i stali 10HNAP (wg ASTM) [5] otrzymano ze stosunku cyklicznej i statycznej granicy plastyczności $R'_e/R_e = 0,87$. Na podstawie wyznaczonych krzywych cyklicznego odkształcenia dla zadanych parametrów obciążenia, wyznaczono odkształcenia całkowite próbek ϵ_{pr} i porównano je z wynikami uzyskanymi doświadczalnie. Wyniki eksperymentalne uzyskano dokonując odczytów odkształcenia maksymalnego ϵ_{pr}^{max} oraz minimalnego ϵ_{pr}^{min} wskazywanych na mostku tensometrycznym. Rys. 8 przedstawia zmiany odkształceń zmierzonych na próbce w zależności od liczby cykli zmian obciążenia, gdzie krzywa 1 pokazuje zmianę amplitudy odkształcenia ϵ_a przy zerowej wartości średniej obciążenia i amplitudzie momentu $M_a = 22$ N·m. Widoczna jest niewielka zmiana tej amplitudy wraz z liczbą cykli zmian obciążenia. Trwałość tej próbki do zniszczenia wynosiła 58000 cykli. Krzywa 2 przedstawia zmiany amplitudy odkształcenia ϵ_a dla przebiegu $M_a = 19$ N·m i $M_m = 11$ N·m. Również tutaj zmiany amplitudy odkształcenia są nieznaczne. Natomiast krzywa 3 przedstawia zmianę wartości średniej odkształcenia ϵ_m wraz ze zmianą liczby cykli N obciążenia. Dla przykładu, przy $N = 5 \cdot 10^4$ cykli, odkształcenie średnie ϵ_m wzrasta o około 70%.



Rys. 8. Zmiana odkształcenia w próbce wraz z liczbą cykli

Fig. 8. Changing the strain of the specimen with the number of cycles



Rys. 9. Zależność wartości średniej od amplitudy momentu

Fig. 9. Dependence of mean value vs. amplitude of the moment

Widoczne tu jest wyraźnie zjawisko tzw. pełzania dynamicznego. Maksymalny moment obciążenia $M_{\max} = M_m + M_a = 30 \text{ N}\cdot\text{m}$ przekroczył znacznie obciążenia, przy których pojawiają się odkształcenia plastyczne (rys. 7a). W przypadku badań dla obciążeń o niższych wartościach amplitudy momentu obciążającego próbkę, zmiany odkształceń wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia były nieznaczne i mieściły się w granicach błędu pomiarowego do 5%. Na rys. 9 pokazano wpływ wartości średniej obciążenia na wartość amplitudy momentu. Dla metali, typu stal, wpływ wartości średnich nie miał większego wpływu na wartości amplitudy momentu zginającego (błąd poniżej 5%).

4. Opis dynamiki stanowiska MZGS-100

Opis matematyczny dynamiki stanowiska jest istotny ze względu na ocenę warunków obciążenia badanego elementu oraz pracy układu sterowania stanowiska, gdzie dobór parametrów pracy sterownika (w tym przypadku sterowanie prędkością obrotową silnika prądu przemiennego za pomocą falownika) i ich kontrolowanie ma zasadniczy wpływ na to, co dzieje się w badanej konstrukcji [6]. Rys. 10 przedstawia model fizyczny stanowiska urządzenia pokazanego na rys. 1.

4.1. Model matematyczny układu

Układ ten może być opisany za pomocą modelu obiektu oscylacyjnego drugiego rzędu, gdzie podstawowe równanie dynamiki ma postać:

$$M\ddot{y} + (C_s + C_p)\dot{y} + (K_s + K_p)y = P(t), \quad P(t) = P \sin(\omega t) \quad (4)$$

gdzie: M – masa części ruchomych układu [kg], C_s, C_p – współczynniki tłumienia odpowiednio sprężyn i próbki, K_s, K_p – współczynniki sprężystości odpowiednio sprężyn i próbki, P – siła wywołująca moment gnący [N], ω – prędkość kątowa tarczy wirującej (częstość pobudzenia) [s^{-1}], $y = y(t)$ – przemieszczenie dźwigni w punkcie mocowania z łącznikiem przekazującym ruch z wirującej tarczy na belkę [m].

Siła obciążająca P jest siłą bezwładności niewyrównoważonej masy na tarczy wirującej z prędkością kątową ω , zaś przebieg sinusoidalny wynika z ograniczenia ruchu tarczy tylko w kierunku pionowym. Częstość drgań własnych ω_n oraz współczynnik tłumienia ζ układu mogą być wyznaczone z równań:

$$\omega_n^2 = \frac{(K_s + K_p)}{M}, \quad 2\zeta\omega_n = \frac{(C_s + C_p)}{M} \quad (5)$$

Uwzględniając równanie (5) model matematyczny opisany równaniem (4) może być zapisany jako:

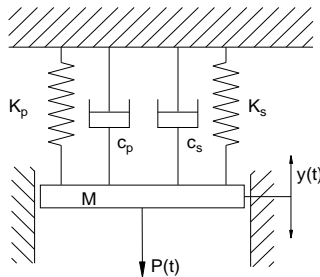
$$\ddot{y} + 2\zeta\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = P \sin(\omega t) \quad (6)$$

Układ w stanie stacjonarnym wykonuje drgania o częstotliwości siły pobudzającej i amplitudzie zależnej od częstotliwości pobudzenia, częstotliwości własnej układu oraz współczynnika tłumienia

$$y(t) = \frac{P\omega^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta^2\omega^2}} \sin(\omega t - \varepsilon) \quad (7)$$

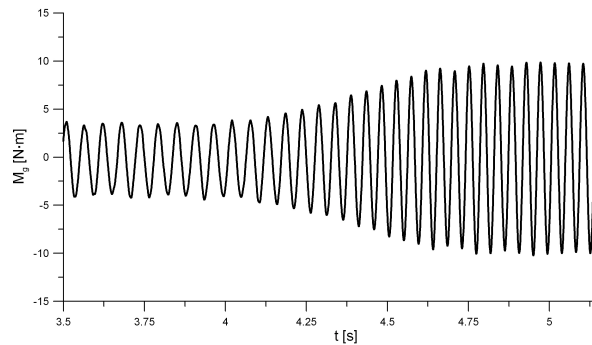
gdzie: $\operatorname{tg}(\varepsilon) = \frac{2\zeta\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}$.

Oczywiście należy pamiętać o tym, że skokowa zmiana częstotliwości wymuszenia nie wywoła skokowej zmiany odpowiedzi układu. Rys. 11 prezentuje zarejestrowaną zmianę amplitudy momentu przy skokowej zmianie częstotliwości wymuszającej. Można zauważyć krótki stan przejściowy, po którym następuje stabilizacja przebiegu czasowego momentu.



Rys. 10. Model fizyczny stanowiska MZGS-100

Fig. 10. Physic model of the MZGS-100 stand

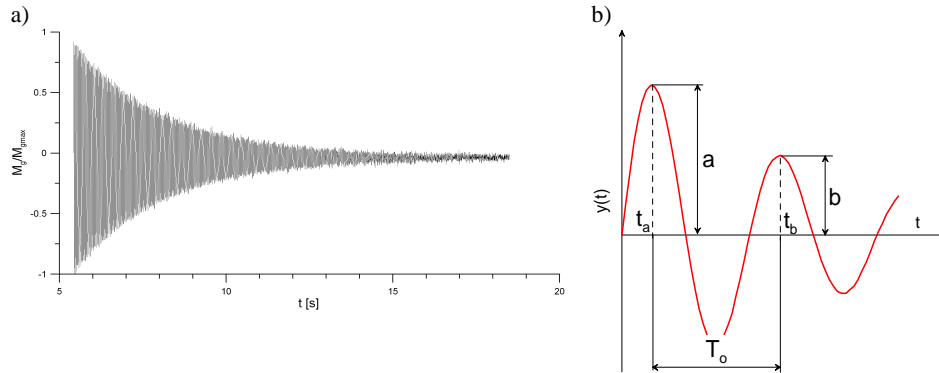


Rys. 11. Stan przejściowy przy zmianie częstotliwości wymuszenia

Fig. 11. Transient period registered for step change of input signal

4.2. Wyznaczenie parametrów układu

Wyznaczenie częstotliwości drgań własnych stanowiska oraz współczynnika tłumienia może być wykonane za pomocą odpowiedzi impulsowej układu. Jako sygnał wymuszający w modelowaniu analitycznym przyjmuje się impuls Diraca, w którym czas trwania impulsu przyjmuje się jako nieskończenie mały. W praktyce musimy się pogodzić, że impuls ma pewną szerokość w czasie. Rysunek 12a przedstawia zarejestrowaną na stanowisku odpowiedź impulsową skalowaną względem maksymalnej wartości momentu zginającego. Można zauważyć, że czas wygaszania impulsu wynosi około 14,5 s, co może świadczyć o dużej sztywności i małym współczynniku tłumienia układu.



Rys. 12. Odpowiedź impulsowa a) zmierzona na stanowisku, b) model obliczeniowy

Fig. 12. Impulse response a) registered on the stand, b) calculation model

Mając na uwadze, że odpowiedź impulsową obiektu opisanego równaniem (6) ma postać

$$y(t) = k \left[\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega t} \cdot \sin\left(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \cdot t\right) \right] \quad (8)$$

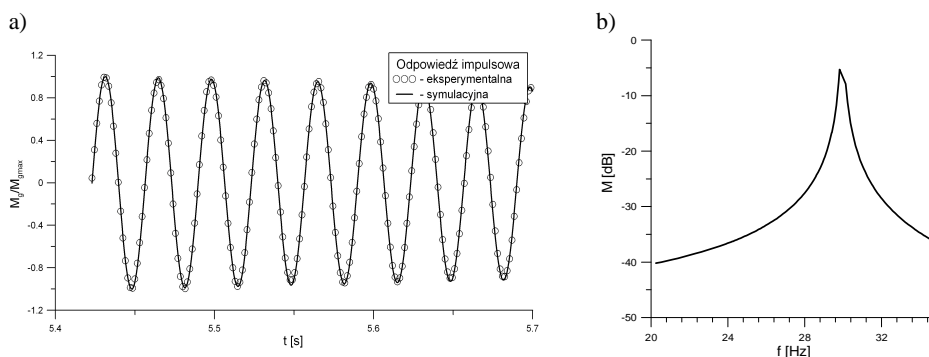
gdzie k – wzmacnienie układu oraz przyjmując oznaczenia jak na rys. 12b, wartość częstości drgań własnych ω_n oraz współczynnik tłumienia ζ mogą być wyznaczone jako:

$$\zeta = \frac{\ln\left(\frac{a}{b}\right)}{\sqrt{4\pi^2 + \ln^2\left(\frac{a}{b}\right)}}, \quad \omega_n = \frac{2\pi}{T_o \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (9)$$

Z obliczeń uzyskano wartości parametrów:

$$\zeta = 0,002, \quad \omega_n = 188,19 \frac{1}{s} \quad (f_n = 29,95 \text{ Hz}).$$

Na rys. 13a przedstawiono porównanie odpowiedzi impulsowej zarejestrowanej na stanowisku z wynikami symulacji. Natomiast rys. 13b prezentuje charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową uzyskaną metodą symulacji komputerowej dla parametrów układu określonych wcześniej. Wyniki z rys. 13a wskazują na dobrą zgodność wyników pomiarów i wyników symulacji.



Rys. 13. Porównanie odpowiedzi impulsowej zarejestrowanej i symulacyjnej a), b) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa

Fig. 13. Simulated and registered impulse response a), b) bode magnitude diagram

Charakterystyka na rys. 13b wskazuje, że stanowisko MZGS-100 pracując na częstotliwościach bliskich rezonansowej daje możliwość szerokiej zmiany momentu obciążającego próbkę poprzez niewielką zmianę częstotliwości wymuszenia.

5. Wnioski

W pracy przedstawiono metodę pomiarów odkształceń na stanowisku do badań zmęczeniowych MZGS-100, dokonano cechowania stanowiska oraz określono odkształcenia próbki w sposób pośredni. Odkształcenia próbek zarejestrowane podczas badań doświadczalnych świadczą o tym, że amplituda naprężenia nie zmienia się w sposób znaczący wraz ze zmianą liczby cykli obciążenia. Stwierdzono zjawisko pełzania dynamicznego dla obciążeń znacznie przekraczających obciążenia maksymalne, wynikające z krzywych cyklicznego odkształcenia. Zastosowana metoda wyznaczania odkształceń, w oparciu o krzywą cykliczną przy zginaniu i skręcaniu, daje dobrą zgodność z odkształceniami zmierzonymi bezpośrednio na próbkach. Przeprowadzona analiza dynamiki układu pozwoliła stwierdzić, że stanowisko można opisać z dużą dokładnością modelem obiektu oscylacyjnego drugiego rzędu. Wyniki pomiarów i symulacji wskazują, że maszyna charakteryzuje się niewielkim współczynnikiem tłumienia układu, a praca na częstotliwościach zbliżonych do rezonansowych daje możliwość uzyskania szerokiego zakresu zmian obciążenia próbki przy stosunkowo niewielkich zmianach częstotliwości wymuszającej. Niewielka zmiana częstotliwości wymuszającej nie będzie miała wpływu na przebieg zjawisk zmęczeniowych i nie zmieni w sposób znaczący czasu trwania próby zmęczeniowej.

Literatura

- [1] Karnopp D.C., Margolis D.L., Rosenberg R.C.: System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems, Wiley, 2012, p. 648.
- [2] Achtelik H., Jamroz L.: Urządzenie do badań zmęczeniowych dla obciążeń o przebiegach niesymetrycznych. Patent – P112497, Świadectwo autorskie nr 155292 o dokonaniu wynalazku, UPPRL, Warszawa 1982.
- [3] Rozumek D., Pawliczek R.: Opis rozwoju pęknięć i zmęczenia materiałów w ujęciu energetycznym. Wieloosiowe zmęczenie losowe elementów maszyn i konstrukcji, Część VII, Studia i Monografie, z. 165, Politechnika Opolska, Opole, 2004, s. 120.
- [4] Gasiak G., Pawliczek R., Rozumek D.: Wyznaczanie odkształceń w próbkach gładkich i z karbem poddanych cyklicznemu zginaniu i skręcaniu. Zeszyty Naukowe PO, Seria: Mechanika nr 268, Prace Naukowe Katedry Mechaniki i PKM, z. 66, Opole 2001, s. 47-64.
- [5] ASTM E739-10, Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S-N) and strain-life (ϵ -N) fatigue data, in: Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01. Philadelphia, 2004, pp. 658-664.
- [6] Rozumek D., Marciniak Z.: Control system of the fatigue stand for material tests under combined bending with torsion loading and experimental results, Mechanical Systems and Signal Processing Vol. 22, pp. 1289-1296.

THE STAND FOR FATIGUE TESTS OF MATERIALS UNDER BENDING WITH TORSION

Summary

The paper presents structure, a principle of operation and measurements of the strength machine for fatigue tests. The machine is designed for fatigue tests of specimens performed from the structural materials working under cyclical loads bending, torsion and proportional bending with torsion. We can ask the load with a zero or non-zero mean value of the moment. The paper presents examples of measurements of static and cyclic on lever machines and the tested specimen (calibration machine) under bending and torsion and the influence of the mean value load.

Keywords: calibration machines, strain measurements, cyclic tests, mean value

Przesłano do redakcji: 13.02.2017 r.

Przyjęto do druku: 28.04.2017 r.