

**VII KRAJOWA KONFERENCJA  
MECHANIKI PĘKANIA**

KIELCE - CEDZYNA 23-25 WRZEŚNIA 1999

**METODA POMIARU TŁUMIENIA W OBSZARZE  
MAŁYCH KĄTÓW PRZESUNIĘCIA FAZOWEGO**Jerzy KALETA<sup>1</sup>, Wojciech MYSZKA<sup>2</sup>**STRESZCZENIE**

*W pracy przedstawiono metodę pomiaru różnorodnych wielkości charakteryzujących tłumienie, w tym pola pętli histerezy, dla szerokiego zakresu kątów przesunięcia fazowego  $\varphi$ . Metoda zachowuje skuteczność pomiaru również w obszarze skrajnie małych kątów  $\varphi$  aż do  $1 \times 10^{-4}$  rad. Aplikację metody przeprowadzono wykorzystując w tym celu wielokanałowy analizator widma HP E1432A oraz pakiet oprogramowania pomiarowego HP-VEE 4. Metodę wykorzystano do badania tłumienia w procesie zmęczenia wybranej stali konstrukcyjnej przy częstotliwości obciążenia rzędu kilkudziesięciu herców. Rejestrowano w tym celu sygnały mechaniczne (naprężenie  $\sigma(\xi)$ , odkształcenie  $\epsilon(\xi)$ ), magnetyczne  $H(\xi)$  oraz zmianę temperatury  $\Delta T(\xi)$ . Na tej podstawie – w czasie rzeczywistym – analizowano różnorodne wielkości fizyczne charakteryzujące tłumienie. Przeprowadzono analizę błędów algorytmu, błędów będących następstwem własności elektrycznych układu pomiarowego próbki (tzw. elektrycznego kąta przesunięcia fazowego) oraz szumów.*

**WPROWADZENIE**

Za miary tłumienia przyjmuje się różnorodne wielkości w tym pole pętli histerezy, kąt przesunięcia fazowego, tzw. kąt strat i wiele innych. Badając przykładowo proces zmęczenia materiału rejestruje się pętlę histerezy w układzie współrzędnych  $\sigma - \epsilon$ , której pole oznacza się zazwyczaj jako  $\Delta W$ . Miarą tłumienia może być również odkształcenie plastyczne  $\epsilon_{pl}$  czy kąt przesunięcia fazowego  $\varphi$  pomiędzy

<sup>1</sup> dr hab. inż. Jerzy Kaleta – Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Smoluchowskiego 25, PL-50-370 Wrocław

<sup>2</sup> dr inż. Wojciech Myszką – Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, ul. Smoluchowskiego 25, PL-50-370 Wrocław

naprężeniem i odkształceniem. Jeśli bada się dodatkowe efekty krzyżowe towarzyszące procesowi zmęczenia, rejestrując w tym celu np. natężenie pola magnetycznego  $H$  oraz przyrost temperatury  $\Delta T$ , to możliwe staje się rejestrowanie innych pętli histerezy wyrażonych w takich układach współrzędnych jak np.  $\sigma - H$  czy  $\varepsilon - \Delta T$  itd. W przypadku gdy np. poziom obciążenia jest nieznaczny lub materiał ma niewielkie odkształcenia plastyczne (obszar quasi sprężysty), wówczas rejestracja pętli histerezy jest trudna. Przykładowo – jeśli stal spickana [1] obciążona będzie na poziomie granicy zmęczenia ( $\sigma_a = Z_{re} \cong 95 \text{ MPa}$ ) wówczas amplituda odkształcenia całkowitego wynosi  $\varepsilon_{ac} \cong 1 \times 10^{-3}$  a odkształcenie plastyczne  $\varepsilon_{pl} = 1 \times 10^{-6}$ . Można wykazać, iż kąt przesunięcia fazowego wynosi wówczas  $\varphi \cong 0,057^\circ$  czyli  $\sim 1 \times 10^{-3}$  rad. Zasadne byłoby zatem stworzenie możliwości pomiaru z błędem o rząd mniejszym ( $\delta \leq 1 \times 10^{-4}$  rad). Taki jest zatem cel pracy.

## 1. ZARYS ALGORYTMU

Istotę metody tzw. dynamicznej pętli histerezy, opisaną we wcześniejszych pracach [2,3,4] przytoczono skrótowo poniżej pokazując jej przykładowe zastosowanie do wyznaczania energii odkształcania plastycznego  $\Delta W$  w trakcie procesu zmęczenia.

Przyjmując jedynie, iż naprężenie i odkształcenie są funkcjami okresowymi,

$$\sigma(\xi) = \sigma(\xi + T), \quad \varepsilon(\xi) = \varepsilon(\xi + T), \quad T = \frac{2\pi}{\omega},$$

można je rozwinąć w szeregi Fouriera postaci

$$\sigma(\xi) = \sum_{p=0}^{\infty} (c_p \sin p\omega\xi + d_p \cos p\omega\xi), \quad \varepsilon(\xi) = \sum_{s=0}^{\infty} (a_s \sin s\omega\xi + b_s \cos s\omega\xi),$$

w których:  $a_s, b_s$  – odpowiednio sinusowe i kosinusowe współczynniki szeregu Fouriera sygnału  $\varepsilon(\xi)$  oraz  $c_p, d_p$  – odpowiednio sinusowe i kosinusowe współczynniki dla sygnału  $\sigma(\xi)$ .

Z definicji energii histerezy oraz po niezbędnych przekształceniach [2] otrzymujemy:

$$\Delta W = \oint_{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon = \int_0^T \sigma(\xi) \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi = \pi \sum_{p=1}^{\infty} p(a_p d_p - b_p c_p)$$

Dysponując składowymi harmonicznymi  $a_p, b_p, c_p, d_p$  można wyznaczyć analitycznie [2,4,5] dalsze wielkości takie jak odkształcenie plastyczne  $\varepsilon_{pl}$ , i kąt przesunięcia fazowego  $\varphi$ . Można też wykazać, iż błędy metody związane są jedynie

z wyznaczaniem wyrazów szeregu Fouriera. Dalsze operacje takie jak wyznaczanie  $\Delta W$ ,  $\varepsilon_{ph}$ ,  $\varphi$  jak również operacje całkowania lub różniczkowania sygnałów pomiarowych nie są obciążone dodatkowymi błędami. Metoda umożliwia ponadto programowe filtrowanie szumów pomiarowych oraz kompensację tzw. elektrycznego kąta przesunięcia fazowego pomiędzy kanałami pomiarowymi [2,5]. Istnieje również możliwość zastosowania metody do przypadku przebiegów losowych.

## 2. APLIKACJA METODY; UWARUNKOWANIA PROGRAMOWE I APARATUROWE

Cechy charakterystyczne metody – różniące ją od innych znanych z literatury przedmiotu np. [6-10] występują w zakresie implementacji algorytmu oraz specyficznego wykorzystania możliwości, a także sposobów pokonania ograniczeń aparatury i pakietu oprogramowania pomiarowego. Wcześniejsze aplikacje metody z zastosowaniem klasycznej (ciągłej) analizy Fouriera nie będą tutaj przytaczane [2,4,5]. Przyjęto natomiast, iż metoda sprawdzona zostanie przy wykorzystaniu profesjonalnego wielokanałowego przyrządu pomiarowego i typowego pulsatora hydraulicznego do badań zmęczeniowych (MTS) oraz pakietu oprogramowania matematycznego zawierającego szybką transformatę Fouriera (FFT). Poniżej wymieniono typowe problemy, które należało rozwiązać lub uwzględnić, a mianowicie:

1. Pulsator hydrauliczny nie zapewnia stabilizacji częstotliwości sygnału wymuszenia. Nawet błąd w tym zakresie rzędu 1% znacznie obciąża końcowy wynik pomiaru.
2. Okres analizowanego sygnału równy np.  $T$  nie jest nigdy (poza wyjątkowym przypadkiem) pełną wielokrotnością kroku kwantowania  $\Delta T$ .
3. Transformata typu FFT narzuca zazwyczaj pewne ograniczenia w porównaniu z metodą klasyczną: w większości implementacji liczba punktów pomiarowych powinna być potęgą liczby 2 lub co najmniej liczbą parzystą.
4. Zarówno kanały pomiarowe pulsatora jak i kanały pomiarowe analizatora mogą wprowadzać przesunięcia fazowe o charakterze elektrycznym, które muszą być pomierzone i wykalibrowane.
5. Wszystkie urządzenia pomiarowe oraz aparatura badawcza (jak np. pulsator) mają szумы, które wpływają na wynik pomiaru. Przykładowo sygnał odkształcenia  $\varepsilon(\xi)$  jest obciążony zwykle większym błędem jak sygnał naprężeń  $\sigma(\xi)$ .
6. Inne parametry techniczne układu pomiarowego (np. rozdzielczość karty przetwornika i komputera) mogą mieć istotne znaczenie dla dokładności pomiaru.

### 3. APARATURA POMIAROWA, OPROGRAMOWANIE

Do testowania metody pomiaru wykorzystano 16-kanalowy rejestrator i analizator widma HP E1432A o następujących parametrach:

- częstość próbkowania w zakresie od 25.5 Hz do 51.2 kHz (w każdym kanale),
- pasmo 23 kHz (tzw. anty alias),
- zakres napięć wejściowych od 100 mVpk do 20 Vpk,
- konwertery 16 bitów,
- pamięć RAM 32 M.

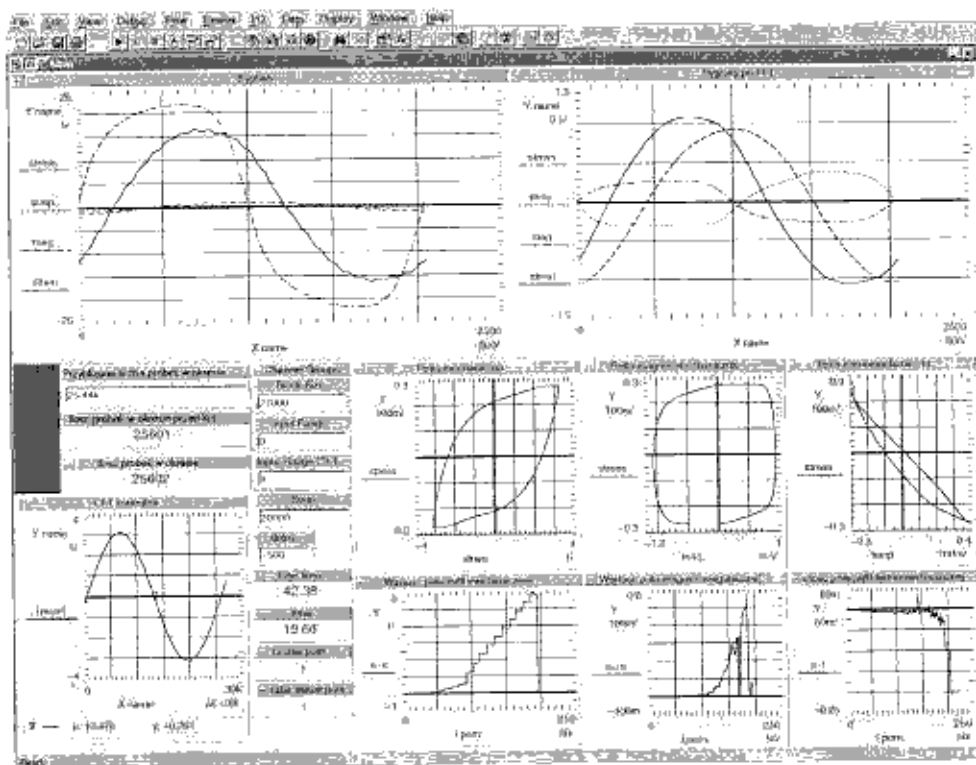
Układ wyposażony jest w procesor sygnałowy o rozdzielczości od 50 do 3200 linii pozwalający wyznaczać FFT i widmo mocy oraz nakładać na sygnały wejściowe typowe okna czy uśredniać mierzone sygnały.

Analizator podłączony jest interfejsem o przepustowości 1.5 MB/s ze stacją roboczą HP C100.

Do implementacji algorytmu wykorzystano pakiet oprogramowania HP – VEE 4 będący językiem programowania wizualnego. Programy budowane są przez łączenie bloków funkcyjnych na panelu. Oprogramowanie przydatne jest zwłaszcza do obsługi urządzeń pomiarowych.

Eksperymenty zmęczeniowe przeprowadzono na próbkach walcowych. Obciążenie zrealizowano na pulsatorze hydraulicznym MTS-810. Sterowano amplitudą naprężenia ( $R=-1$ ). Rejestrowano sygnały  $\sigma(\xi)$ ,  $\varepsilon(\xi)$ , natężenie pola magnetycznego  $H(\xi)$  i przyrost temperatury próbki  $\Delta T(\xi)$  (efekt termosprężysty).

Sygnał magnetyczny (efekt Villariego) [5,13] pomierzono magnetorezystorem a przyrost temperatury termoparą o małej bezwładności cieplnej. W wyniku pomiaru wyznaczono pętlę histerezy możliwych kombinacji sygnałów mechanicznych, magnetycznych i termicznych. Przykładowy tzw. ekran pomiarowy (rys. 1) prezentuje przebiegi czasowe oraz pętle histerezy w układzie współrzędnych odpowiednio  $\sigma - \varepsilon$ ,  $\sigma - H$ ,  $\varepsilon - \Delta T$ .



Rysunek 1. Przykład tzw. okna pomiarowego przy wykorzystaniu zaproponowanej, metody pomiaru, aparatury i pakietu oprogramowania

#### 4. TESTOWANIE ALGORYTMU, MIERNIKA I PAKIETU OPROGRAMOWANIA

Przypadek A. Wygenerowano jeden sygnał o amplitudzie równej jedności i częstotliwości równej 10 Hz. Wartości dyskretne wyznaczono z dokładnością do piętnastego miejsca po przecinku. Okres mierzonego sygnału  $T$  nie był pełną wielokrotnością kroku kwantowania ( $T = 666,67 \Delta T$ ). Wyznaczono składowe FFT, a następnie po zastosowaniu tzw. resamplingu (zmiana częstotliwości próbkowania sygnału z wykorzystaniem interpolacji) powtórnie przeprowadzono analizę Fouriera. Podobną procedurę zastosowano wobec sygnału 2, który przesunięto o kąt  $\phi = 1^\circ$ . W następstwie zastosowanej metody wyznaczono kąt przesunięcia fazowego z dokładnością maszynową (bez błędu). Uzyskane wyniki były praktycznie niezależne od wartości zadanego kąta przesunięcia fazowego. W teście uwzględniono tzw. elektryczne kąty przesunięcia fazowego pomiędzy kanałami analizatora.

**Przypadek B.** Powtórzono test jak dla przypadku A nakładając dodatkowo na oba sygnały w pierwszym przypadku szum biały o amplitudzie równej odpowiednio 1% dla sygnału nr 1 i nr 2 oraz - w drugim przypadku - wartości odpowiednio 1% dla sygnału nr 1 i 10% dla sygnału nr 2. Ten drugi przypadek zbliżony jest do warunków eksperymentalnych kiedy sygnał nr 1 (naprężenie) jest mniej zasumiony jak sygnał nr 2 (odkształcenie). Błędy kąta przesunięcia fazowego wyniosły odpowiednio  $\delta\varphi_1 = 30 \times 10^{-9}$  stopnia ( $\delta\varphi_1 = 5,2 \times 10^{-10}$  rad) dla przypadku 1 i  $\delta\varphi_2 = 11,5 \times 10^{-6}$  stopnia ( $\delta\varphi_2 = 2 \times 10^{-7}$  rad) dla przypadku 2, czyli były znikome.

Należy zaznaczyć, iż wyznaczone błędy dotyczyły w tym przypadku łącznie zaproponowanej metody, zaimplementowanego algorytmu i miernika oraz symulowanych szumów. Nie należy ich utożsamiać z błędami w trakcie próby zmęczeniowej.

## 5. REZULTATY EKSPERYMENTU ZMĘCZENIOWEGO

Następnie przeprowadzono pomiary w ramach eksperymentu zmęczeniowego. Obiektem badań był materiał o bardzo małych odkształceniach plastycznych. Próbkę o przekroju prostokątnym wykonaną ze stali spiekanej obciążano na poziomie granicy zmęczenia ( $\sigma_u = Z_{rc} \cong 125$  MPa) przy symetrycznym, sinusoidalnym widmie o częstotliwości równej 25 Hz. Pole pętli histerezy  $\Delta W$  wyniosło  $1.799 \times 10^{-4}$  MJ/m<sup>3</sup> natomiast odkształcenie plastyczne odpowiednio  $\varepsilon_{pl} = 1,7 \times 10^{-6}$ . Wystąpił wówczas kąt przesunięcia fazowego równy 0,09 stopnia ( $1,7 \times 10^{-3}$  rad). Błąd wyznaczenia kąta był mniejszy jak  $1,0 \times 10^{-4}$  rad.

## 6. WNIOSKI

1. Zaproponowana metoda pomiaru, przy uwzględnieniu sposobu implementacji i założonej dokładności generowania funkcji (do piętnastego miejsca po przecinku), umożliwia wyznaczenie jakiegokolwiek wielkości wykazujących efekt histerezy z dokładnością maszynową (bez błędu). Po nałożeniu na sygnały generowane szumu białego o amplitudzie równej odpowiednio 1% dla obu sygnałów lub odpowiednio 1% dla sygnału nr 1 i 10% dla sygnału nr 2, wartość błędu metody zawiera się w przedziale od  $\delta\varphi = 5,2 \times 10^{-10}$  rad do  $\delta\varphi = 2 \times 10^{-7}$  rad.
2. Metoda umożliwia programową filtrację szumów oraz kompensację tzw. elektrycznego kąta przesunięcia fazowego pomiędzy kanałami pomiarowymi.
3. Metodę zastosowano efektywnie do badań procesu zmęczenia materiałów o nieznacznych odkształceniach plastycznych (stali spiekanych), badanych na

poziomie granicy zmęczenia. Błąd wyznaczenia kąta przesunięcia fazowego  $\delta\phi$  był wówczas - po uwzględnieniu dodatkowo parametrów pomiarowych pulsatora hydraulicznego - o rząd mniejszy od wartości mierzonych i nie osiągał wartości  $1,0 \times 10^{-4}$  rad. Osiągnięto w ten sposób cel sformułowany w zadaniu.

Badania finansowano częściowo ze środków uzyskanych na realizację grantu w ramach Centrum Materiałów Zaawansowanych i Nanotechnologii Politechniki Wrocławskiej.

## LITERATURA

- [1] Kaleta J.: Kumulacja energii w procesie zmęczenia wybranych stali spiekanych. Mater. Konf. XV Symp. Mech. Dośw. Ciała Stałego, Jachranka 1992, s. 107-113
- [2] Kasprzak W., Kaleta J., Błotny R., Mysza W., Niżankowski M.: APTL-Software. Raporty 25-26 Inst. Mater. i Mech. Techn. PWr, Wrocław 1989
- [3] Kaleta J., Błotny R., Harig H.: Energy stored in a specimen under fatigue limit loading conditions. *J. of Testing and Evaluation* (1991), s. 325-333
- [4] Kaleta J.: O pewnej metodzie pomiaru energii histerezy w procesie zmęczenia. Mater. Konf. XV Symp. Mech. Dośw. Ciała Stałego, Jachranka 1992, s. 114-118
- [5] Kaleta J.: Doświadczalne podstawy formułowania energetycznych hipotez zmęczenia. *Prace Naukowe Instytutu Metaloznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej 59 Seria Monografie 24*. Wrocław (1998)
- [6] Harris J.A.: Elastomer testing under nonsinusoidal nonlinear conditions. *Rubber Chemistry and Technology* 60 (1987), s. 870-887
- [7] Kinra V.K., Wren G.G.: Axial damping in metal-matrix composites. A new technique for measuring phase difference to  $10^{-4}$  radians. *Experimental Mech.* (1992), s. 163-171
- [8] Wren G.G., Kinra V.K.: An experimental technique for determining a measure of structural damping. *Journal of Testing and Evaluation* 16(1988), s.77-85
- [9] Wren G.G., Kinra V.K.: Axial damping in metal-matrix composites. II. A theoretical model and its experimental verification.
- [10] Troscenko V.T.: K voprosu o svjazi rassejanija energii w materiale s ustalostnoj procnostju. *Rassejanie energii pri kolebanijach uprugich sistem* lzd. AN-USSR Kiev 1963
- [11] Pisarenko G.S., Jakowlew A.P., Matwiejew W.W.: Własności tłumienia drgań materiałów konstrukcyjnych. Warszawa WNT 1976
- [12] Lukas P., Klesnil M.: Cyclic stress-strain response and fatigue life in metals in low amplitude region. *Mater. Sci and Eng.* 11(1973), s.345-356
- [13] Kaleta J., Żebracki J.: Application of the Villari effect in a fatigue examination of nickel. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 19 (1996), s.1435-1443

## THE METHOD OF DAMPING MEASUREMENTS IN THE RANGE OF SMALL PHASE ANGLE SHIFTS

### SUMMARY

*The paper presents the method of measurements of various quantities characterizing damping, including hysteresis loop area, for the broad range of phase angle shifts  $\varphi$ . The method remains valid in the range of extremely small angles  $\varphi$  up to  $1 \times 10^{-4}$  rad. The application of the method was done making use of multichannel spectrum analyzer HP E1432A and the program system HP-VEE 4. The method was applied in damping examination during fatigue tests for chosen construction steel under frequency of few tens hertz. For this purpose the mechanical signals (stress  $\sigma(\xi)$ , strain  $\epsilon(\xi)$ ), magnetic signal  $H(\xi)$  and temperature shift  $\Delta T(\xi)$  were registered. On this basis, in real time, the various physical characteristics of damping were examined. The analysis of algorithm error, errors coming from electrical properties of measurement system (i.e. electrical phase shift angle) as well as noise, were carried out.*