

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TK12022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Właściwości mechaniczne i modelowanie konstytutywne stopu aluminium AW-5251 w szerokim zakresie szybkości odkształcenia

Robert Panowicz<sup>1</sup>, Marcin Konarzewski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna  
email: robert.panowicz@wat.edu.pl, marcin.konarzewski@wat.edu.pl

**STRESZCZENIE:** Stopy aluminium z dodatkiem magnezu lub manganu charakteryzują się wysoką plastycznością i odpornością na korozję również w środowisku morskim jak również wysoką spawalnością. Dlatego też stosuje się je w przemyśle morskim, stoczniowym jak również i maszynowym. Wytrzymałość większości typowych materiałów konstrukcyjnych, w tym stopów aluminium, rośnie wraz ze wzrostem szybkości odkształcenia. Dlatego też opracowywanie elementów maszyn i nowych rozwiązań konstrukcyjnych za pomocą bardzo szybkich, nowoczesnych, metod obróbki materiałów wraz z wykorzystaniem komputerowych metod mechaniki, a w szczególności metody elementów skończonych, wymaga uwzględnienia wpływu szybkości odkształcenia na właściwości mechaniczne wykorzystywanego materiału. W związku z powyższym, w ostatnim okresie możemy zaobserwować duże zainteresowanie badaniami materiałów w szerokim zakresie szybkości odkształcenia i określaniem stałych materiałowych do związków konstytutywnych. W artykule przedstawiono wyniki badań stopu aluminium AW-5251 w szerokim zakresie szybkości odkształcenia z uwzględnieniem średnich szybkości odkształcenia i temperatury. Na ich podstawie określono stałe materiałowe wybranych związków konstytutywnych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** dynamiczne właściwości materiałów, metoda dzielonego pręta Hopkinsona, maszyna hydropneumatyczna, stopy aluminium, AW-5251

#### 1. Wstęp

Stopy aluminium z dodatkiem magnezu lub manganu charakteryzują się wysoką plastycznością i odpornością na korozję również w środowisku morskim jak również wysoką spawalnością. Dlatego też stosuje się je w przemyśle morskim, stoczniowym jak również i maszynowym.

Wytrzymałość większości typowych materiałów konstrukcyjnych, w tym stopów aluminium, rośnie wraz ze wzrostem szybkości odkształcenia. Dlatego też opracowywanie elementów maszyn i nowych rozwiązań konstrukcyjnych za pomocą bardzo szybkich, nowoczesnych, metod obróbki materiałów wraz z wykorzystaniem komputerowych metod mechaniki, a w szczególności metody elementów skończonych, wymaga uwzględnienia wpływu szybkości odkształcenia na właściwości mechaniczne wykorzystywanego materiału. W związku z powyższym, w ostatnim okresie możemy zaobserwować duże zainteresowanie badaniami materiałów w szerokim zakresie szybkości odkształcenia i określaniem stałych materiałowych do związków konstytutywnych.

#### 2. Opis metod badawczych

Badania w zakresie quasi-statycznym ( $\sim 10^{-1}$  1/s) realizowane są z wykorzystaniem klasycznych – hydraulicznych lub elektromechanicznych maszyn wytrzymałościowych. Natomiast do badań w zakresie dużych szybkości odkształcenia ( $\sim 10^3$  1/s) wykorzystuje się zwykle metodę dzielonego pręta Hopkinsona [1, 2]. W zakresie tych szybkości odkształcenia można również wykorzystać elektrodynamiczny [3] lub wybuchowy [4] test

pierścieniowy. Jednakże ze względu na: prostszą budowę, aparaturę pomiarową, czy też warunki bezpieczeństwa (zwłaszcza w porównaniu do wybuchowego testu pierścieniowego) jak i prostszą obróbkę danych, w większości przypadków wykorzystuje się w tym celu metodę dzielonego pręta Hopkinsona. W metodzie tej osiowoosymetryczna próbka umieszczona jest pomiędzy dwoma prętami (rys. 1) [1]. W jeden z nich (pręt transmitujący) uderza z daną, mierzoną prędkością pręt wymuszający (walcowy pocisk) generując w nim poruszającą się w kierunku próbki sprężystą falę obciążenia zwaną falą wymuszającą. Fala ta ma długość odpowiadającą podwojonemu czasowi propagacji fali w pręcie wymuszającym, a amplitudę proporcjonalną do prędkości uderzenia pręta wymuszającego. Po dojściu do drugiego końca będącego w kontakcie z próbką fala ta częściowo odbija się od granicy pręt – próbka (fala odbita), a częściowo przechodzi do drugiego pręta (pręt odbiorczy). Falę propagującą się w pręcie odbiorczym nazywa się falą transmitującą. Mierzając za pomocą mostków tensometrycznych falę wymuszającą, odbitą i transmitującą można otrzymać na podstawie stosunkowo prostych równań zależność pomiędzy naprężeniem, a odkształceniem w próbce, przy danej szybkości odkształcenia [1]:

$$\sigma(t) = \frac{A}{2A_s} E [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (1)$$

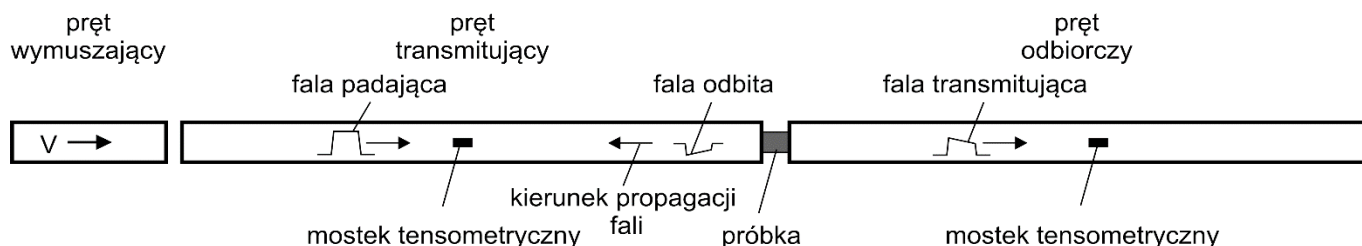
$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{c_0}{L_s} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{c_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_I(\tau) - \varepsilon_R(\tau) - \varepsilon_T(\tau)] d\tau \quad (3)$$

gdzie:  $A_s$  – pole przekroju próbki,  $L_s$  – wysokość próbki,  $C_0$  – prędkość rozchodzenia się fali podłużnej w pręcie,  $E$  – moduł Young’a materiału, z którego wykonano pręty,  $A$  – pole przekroju prętów,  $\varepsilon(t)$  – odkształcenie sprężyste prętów wywołane propagującymi się w prętach falami,  $I$ ,  $R$ ,  $T$  – indeksy oznaczające falę padającą, odbitą i transmitującą się w drugim pręcie.

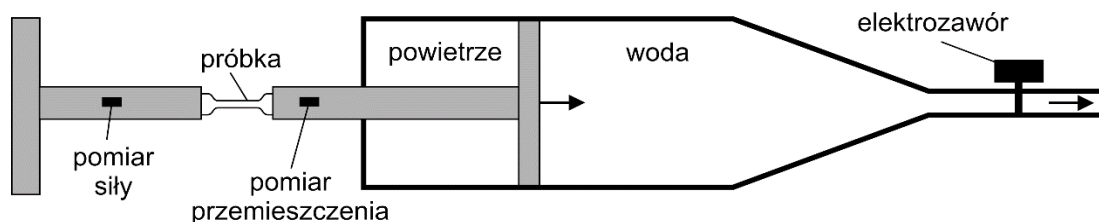
W zakresie średnich szybkości odkształcenia rzędu  $10^2$  1/s wykorzystuje się dwa rozwiązania: zmodyfikowaną metodę pręta Hopkinsona (ang. drop test) [5, 6] lub maszynę hydropneumatyczną (rys. 2) [7]. Składa się ona z dwóch komór, jednej wypełnionej gazem pod wysokim ciśnieniem i drugiej napełnionej cieczą np. wodą. Komory te rozdzielone są ruchomym tłokiem. Do tłoka przymocowane

jest tłoczek wychodzący z komory i połączone z próbką wykonaną z badanego materiału. Z drugiej strony badana próbka jest przymocowana do korpusu stanowiska. W stanie początkowym obydwie komory zbiornika znajdują się w równowadze. W chwili początkowego otwarcia ulega zawór w komorze z wodą, która przepływa przez krzyż ze stałą prędkością. Wpływ wody powoduje ruch tłoka przekładany na próbkę. Równocześnie rejestrowane jest położenie wału i siła oddziaływująca na próbkę analogicznie jak w przypadku klasycznej maszyny wytrzymałościowej. Znając przekrój początkowy próbki można wyznaczyć krzywą naprężenie – odkształcenie oraz obliczyć szybkość odkształcenia.



Rys. 1. Schemat stanowiska do metody dzielonego pręta Hopkinsona,

$V$  – prędkość uderzenia pręta wymuszającego w pręt transmitujący



Rys. 2. Schemat hydropneumatycznej maszyny pomiarowej

### 3. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań stopu aluminium AW-5251 w szerokim zakresie szybkości odkształcenia. Do badań w zakresie quasi-statycznym wykorzystano maszynę INSTRON 8862 wraz z komorą klimatyczną. Badania w zakresie średnich szybkości odkształcenia wykonano na maszynie hydropneumatycznej, a w zakresie dużych szybkości odkształcenia na stanowisku do metody dzielonego pręta Hopkinsona. Zarówno maszyna hydropneumatyczna jak i stanowisko do metody dzielonego pręta Hopkinsona zostały zaprojektowane i wykonane na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Wojskowej Akademii Technicznej [8].

Wyniki badań eksperymentalnych posłużyły do określenia stałych materiałowych wybranych związków konstytutywnych uwzględniających wpływ szybkości odkształcenia na zachowanie się materiałów. W tym celu wykorzystano nieliniową metodę najmniejszych kwadratów zaimplementowaną w programie MATLAB.

Praca została wykonana w ramach Uczelnianego Grantu Badawczego Nr 22-769, finansowanego przez Wojskową Akademię Techniczną.

### Literatura

[1] Chen W., Song B., *Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications*. Springer, New York, 2011, 10.1007/978-1-4419-7982-7.

[2] Panowicz R., Janiszewski J., *Tensile split Hopkinson bar technique: numerical analysis on the problem of wave disturbance and specimen geometry selection*, Metrology and Measurement Systems 23 (3), pp 425-436, 2016.

[3] Janiszewski J., Panowicz R., *Development and validation of numerical model for predicting electromagnetic expansion of composite rings*, Solid State Phenomena, Vol. 198, 2013, DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.198.627.

[4] Warnes R. H. i in., *An Improved Technique for Determining Dynamic Material Properties Using the Expanding Ring*, w: Meyers M. A., Murr L. E., (eds) Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals: Concepts and Applications, Springer, Boston, 1981, DOI: 10.1007/978-1-4613-3219-0\_2.

[5] Song B. i in., *Development of "Dropkinson" Bar for Intermediate Strain-Rate Testing*, w: Kimberley J., Lamberson L., Mates S. (eds) Dynamic Behavior of Materials, Volume 1. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham., 2019, DOI: 10.1007/978-3-319-95089-1\_12.

[6] Song B. i in., *Development of "Dropkinson" Bar for Intermediate Strain-rate Testing*, EPJ Web Conf. 183 02004, 2018, DOI: 10.1051/epjconf/201818302004.

[7] Cadoni E., Dotta M., Forni D., Meda A., Plizzari G. A., *Rate effects of high performance fibre reinforced cementitious composite under tensile loading*, DYMAT - International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading 1 809-815, 2009, DOI: 10.1051/dymat/2009113.

[8] Ziętała M., Durejko T., Panowicz R., Konarzewski M., *Microstructure Evolution of 316L Steel Prepared with the Use of Additive and Conventional Methods and Subjected to Dynamic Loads: A Comparative Study*, Materials, 13(21), 4893, 2020, DOI:10.3390/ma13214893.