

# Kształtowanie impulsu wymuszającego w zmodyfikowanej metodzie dzielonego pręta Hopkinsona

Robert Panowicz, Michał Trypolin

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna  
email: robert.panowicz@wat.edu.pl, michal.trypolin@wat.edu.pl

**STRESZCZENIE:** W zmodyfikowanej metodzie dzielonego pręta Hopkinsona umożliwiającej badania materiałów w warunkach dynamicznych obciążeń na rozciąganie, podobnie jak w klasycznym układzie pomiarowym, występują niepożądane, zaburzające sygnały pomiarowe, wysokoczęstotliwościowe oscylacje Pochhammera-Chree. W niniejszej pracy przedstawiono numeryczną analizę wpływu kształtowników impulsu wykonanych z różnych materiałów - gumy, miedzi i ołowiu na przebieg impulsu wymuszającego w zmodyfikowanej metodzie dzielonego pręta Hopkinsona. Okazało się, że zastosowanie kształtowników impulsu wykonanych z gumy i ołowiu pozwala na znaczące ograniczenie wysokoczęstotliwościowych oscylacji Pochhammera-Chree przy niewielkim wzroście czasu narastania zbocza impulsu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** Hopkinson, kształtownik impulsu, MES, dynamika

## 1. Wstęp

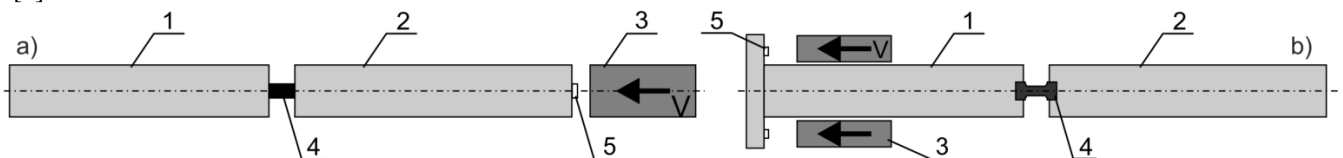
Duża grupa materiałów podczas obciążeń impulsowych (duże szybkości odkształceń) zachowuje się inaczej niż podczas obciążeń quasi-statycznych [1]. Spowodowane jest to różnicami charakterystyk mechanicznych materiałów w tych dwóch zakresach [2].

Granica podziału pomiędzy zjawiskami quasi-statycznymi i dynamicznymi jest umowna. Przyjmuje się, że zjawiska zachodzące z szybkością odkształceń większą niż  $10^2$  1/s zaliczamy do zjawisk dynamicznych zachodzących z dużymi szybkościami odkształceń [3].

Badania materiałów w zakresie dużych i bardzo szybkości odkształceń wykonuje się z wykorzystaniem: testu Taylora, elektromagnetycznej lub wybuchowej metody pierścieniowej, metody płyta-płyta, czy też metody DICT [4]. Jednakże najczęściej wykorzystuje się w tym celu metodę dzielonego pręta Hopkinsona (ang. Split Hopkinson Pressure Bar - SHPB) [1]. Polega ona na dynamicznym ściskaniu próbki umieszczonej pomiędzy dwoma długimi prętami przy założeniu, że zjawisko zachodzi w warunkach dynamicznej równowagi, przy stałej szybkości odkształceń, a przebieg zjawiska można opisać przy pomocy jednowymiarowej teorii propagacji fal. Schemat stanowiska został przedstawiony na rysunku 1a.

Jak wykazali Pochhammera-Chree (P-Ch) z propagacją impulsu w pręcie wiąże się powstanie wysokoczęstotliwościowych oscylacji zaburzających sygnał właściwy [1]. W celu ich zredukowania stosuje się kształtowniki impulsu lub zaokrąglą się czoła pocisków.

Na podstawie wyników badań quasi-statycznych oraz otrzymanych za pomocą metody SHPB można określić parametry materiałowe do związków konstytutywnych. Jednakże w większości przypadków związki te należy uzupełnić o modele zniszczenia. W tym celu wykorzystuje się zmodyfikowaną metodę SHPB, która pozwala na badanie dynamiczne materiałów w zakresie rozciągania i pęknięcia. W najprostszym z możliwych przypadków wykorzystuje się przekładkę, która umożliwia zamianę obciążenia ściskającego na rozciągające [5]. Metoda ta wiąże się z kilkoma problemami technicznymi, które mogą powodować zaburzenie sygnałów pomiarowych [6]. Najczęściej wykorzystywane rozwiązanie zostało przedstawione na rysunku 1b [1].



Rys. 1. Schemat typowego stanowiska SHPB (a) i stanowiska zmodyfikowanego na rozciąganie (b);  
1 – pręt wymuszający, 2 – pręt odbierający, 3 – pocisk, 4 – próbka, 5 – kształtownik impulsu

W tym przypadku pocisk uderza w kowadełko znajdujące się na końcu pręta wymuszającego powodując powstanie fali rozciągającej w pręcie. Również w tym rozwiązaniu występują problemy z oscylacjami P-Ch. W związku z powyższym celem niniejszej pracy jest numeryczna analiza wpływu kształtownika impulsu na przebieg sygnału wymuszającego w zmodyfikowanej metodzie SHPB. W ramach przeprowadzonych analiz zostały dobrane parametry geometryczne oraz materiałowe kształtownika impulsu, pozwalającego na ograniczenie oscylacji P-Ch. Analizowano wpływ kształtowników impulsu wykonanych z takich materiałów jak: miedź, ołów oraz guma.

## 2. Model numeryczny

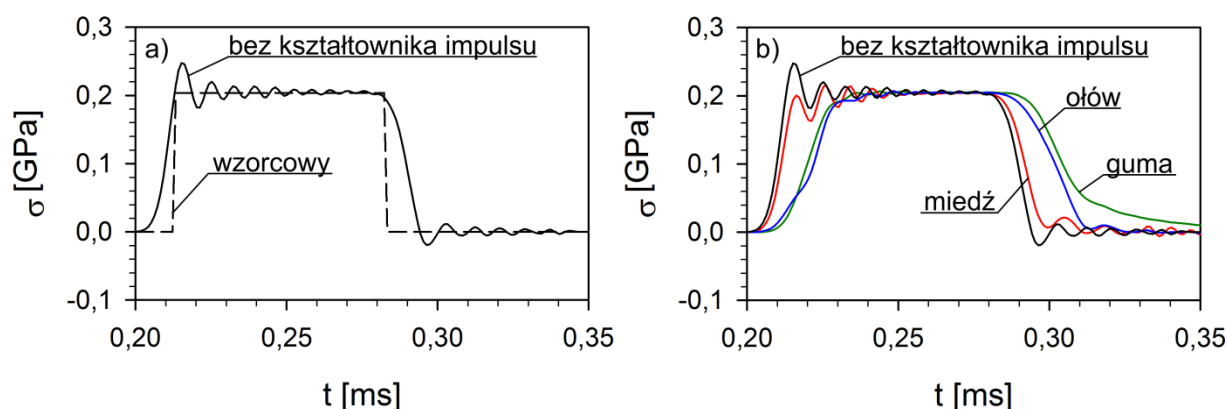
Model numeryczny opisujący przebieg zjawisk w zmodyfikowanej metodzie SHPB składał się z pręta o średnicy 12 mm i długości 2 m na końcu którego znajduje się kowadełko, kształtownika impulsu oraz uderzającego z prędkością  $V = 10$  m/s pocisku w postaci rury o średnicy wewnętrznej wynoszącej 12 mm oraz średnicy zewnętrznej - 17 mm oraz długości 20 cm.

Analizy numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem jawnej implementacji metody elementów skończonych [7], natomiast model przygotowano przy pomocy programu Altair Hypermesh [8]. Przebieg sygnałów w pręcie rejestrowano w miejscu, gdzie mocowane są tensometry, czyli w połowie jego długości pręta.

Do opisu zachowania pręta oraz pocisku wykorzystano sprężysty model materiałowy. Miedź oraz ołów opisano modelem Johnsona-Cooka [9], natomiast gumę - modelem materiałowym Mooney-Rivlina [7]. Parametry materiałowe zaczerpnięto z literatury [6, 9-11].

### 3. Wyniki obliczeń

W rozważaniach teoretycznych przyjmuje się, że sygnał wymuszający w metodzie dzielonego pręta Hopkinsona, również umożliwiający badanie materiałów w zakresie rozciągania ma kształt prostokąta (rys. 2a). Na skutek zjawisk dyspersyjnych w idealnym impulsie pojawiają się wysokoczęstotliwościowe oscylacje P-Ch., oraz wzrasta czas narastania i opadania zboczy impulsu. W przypadku braku kształtownika impulsu czas narastania wynosi 13  $\mu$ s, a pierwsza, największa amplituda oscylacji ma wartość 44 MPa (rys. 2). Tłumienie oscylacji jest na tyle małe, że widoczne są one w całym zakresie przebiegu impulsu. Zastosowanie kształtownika impulsu pozwala na zmniejszenie zarówno pierwszej amplitudy oscylacji jak i ich tłumienia (rys. 2b). Najmniejszy wpływ kształtownika zauważono w przypadku wykorzystania miedzi, gdzie maksymalna amplituda oscylacji jest mniejsza tylko o 3 MPa. Natomiast użycie gumy i ołowiu spowodowało znaczący spadek tej amplitudy do 13 MPa, czyli ponad trzykrotnie. Wiąże się to ze wzrostem czasu narastania. W przypadku kształtownika wykonanego z miedzi o 2  $\mu$ s, gumy o 11  $\mu$ s oraz ołowiu o 14  $\mu$ s. Zastosowania kształtownika impulsu wykonanego z gumy powoduje znaczące różnice w przebiegu końcowej fazy sygnału. W tym przypadku od 3/4 wartości spadku sygnał zanika znacząco wolniej. Powoduje to znaczący wzrost czasu opadania zbocza impulsu, nawet w porównaniu do sygnału otrzymanego w przypadku kształtownika wykonanego z ołowiu.



Rys. 2. Wpływ kształtowników impulsu na sygnał wymuszający w zmodyfikowanej metodzie SHPB

### 4. Wnioski

W pracy przedstawiono analizy numeryczne wpływu kształtowników impulsu wykonanych z różnych materiałów na przebieg sygnału wymuszającego w zmodyfikowanej metodzie dzielonego pręta Hopkinsona umożliwiającej badanie materiałów w zakresie rozciągania. Okazało się, że zastosowanie kształtowników impulsu wykonanych z gumy i ołowiu pozwala na znaczące ograniczenie wysokoczęstotliwościowych oscylacji Pochhammera-Chree przy niewielkim wzroście czasu narastania zbocza impulsu. Jednakże zastosowanie gumy powoduje znaczący wzrost czasu opadania impulsu sygnału.

Artykuł finansowany za środków MNiSW, Praca Badawcza Statutowa nr 23-937.

### Literatura

- [1] Chen, W. i Song, B., Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications. Berlin: Springer, 2011.
- [2] J. Janiszewski, Badania materiałów inżynierskich w warunkach obciążenia dynamicznego, Redakcja Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa, 2012
- [3] K. T. Ramesh High Strain Rate and Impact Experiments, Editors: William N. Sharpe Jr., Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics, Springer, Berlin, 2008, DOI: 10.1007/978-0-387-30877-
- [4] J. Field, S. Walley, N. Bourne, J. Huntley. Experimental methods at high rates of strain. Journal de Physique IV Colloque, 1994, 04 (C8), pp.C8-3-C8-22, DOI: 10.1051/jp4:1994801
- [5] Nicholas, T. (1981). Tensile testing of materials at high rates of strain, Exp. Mech., 21, 177–185, DOI:10.1007/BF02326644.
- [6] R. Panowicz, J. Janiszewski, Tensile split Hopkinson bar technique: numerical analysis of the problem of wave disturbance and specimen geometry selection, Metrol. Meas. Syst., Vol. 23 (2016), No. 3, pp. 425–436, DOI: 10.1515/mms-2016-0027.
- [7] J. O. Hallquist, *Ls-Dyna Theory Manual*, Livermore Software Technology, 2018
- [8] Altair Hypermesh, <https://www.altairhyper-works.com/product/HyperMesh>, 2018
- [9] Johnson G. R., Cook. W. H. (1983). An constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, *7th International Symposium on Ballistics*, 541–547.
- [10] Mary C. Boyce and Ellen M. Arruda (2000) Constitutive Models of Rubber Elasticity: A Review. Rubber Chemistry and Technology: July 2000, Vol. 73, No. 3, pp. 504-523.
- [11] Carbajal, Leopoldo & Jovicic, Jovan & Kuhlmann, Helga. (2011). Assault Rifle Bullet-Experimental Characterization and Computer (FE) Modeling. Conference proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Experimental and applied mechanics. 6. 10.1007/978-1-4614-0222-0\_77.
- [12] [https://icme.hpc.msstate.edu/mediawiki/index.php/The\\_theory\\_of\\_SHPB\\_Experiment](https://icme.hpc.msstate.edu/mediawiki/index.php/The_theory_of_SHPB_Experiment), 2018