

# XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2024

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

### Wybrane problemy badania próbek warstwowych metodą SHPB

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

<sup>1</sup> Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Wojskowa Akademia Techniczna  
email: robert.panowicz@wat.edu.pl, marcin.konarzewski@wat.edu.pl, adam.jeschke@wat.edu.pl

**STRESZCZENIE:** Praca skupia się na przedstawieniu powszechnie powstających problemów podczas badań próbek z warstwowych. Czyli próbek składających się z złączonych z sobą kolejnych warstw badanego materiału, które zostały zastosowane dla badań dynamicznych przy wykorzystaniu metody dzielonego pręta Hopkinsona. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla próbek warstwowych wykonanych z stopu tytanu Ti6Al4V oraz aluminium PA7. Wyniki badań posłużyły do określenia wpływu niedoskonałości próbek na otrzymane parametry materiałowe i wytrzymałościowe.

**SŁOWA KLUCZOWE:** SHPB, próbki warstwowe, badania dynamiczne, połączenie adhezyjne

#### 1. Wprowadzenie

Wiele materiałów konstrukcyjnych obciążonych dynamicznie wykazuje odmienne właściwości w porównaniu do właściwości w zakresie quasi-statycznym. Obecnie najpowszechniejszą techniką badawczą umożliwiającą badania materiałów w zakresie dużych szybkości odkształcenia jest metoda dzielonego pręta Hopkinsona (ang. Split Hopkinson Pressure Bar — SHPB) [1, 2]. Niestety metoda ta opiera się na odpowiednio przygotowanych próbkach walcowych, spełniających zadane kryterium otrzymanej średnicy jak i grubości wykonania próbki w celu uzyskania odpowiednich wyników względem badanej szybkości odkształcenia, co wymaga zastosowania na próbki odpowiedniego materiału.

W obliczu kryzysu z globalnym łańcuchem dostaw wywołanego przez pandemię z roku 2019, pojawiły się trudności z uzyskaniem odpowiedniego materiału na wykonanie próbek do wykonania badań na dzielonym pręcie Hopkinsona. W celu przeciwdziałaniu brakom optymalnego materiału postanowiono wykorzystać próbki wykonane z połączonych ze sobą warstw blachy. Wytworzone w ten sposób próbki, w badaniach dynamicznego ściskania, rozciągania jak i ścinania wykazują właściwości identyczne jak próbki wykonane z materiału jednorodnego [3–5].

#### 2. Opis metody badawczej SHPB

Stanowisko badawcze dla metody dzielonego pręta Hopkinsona zazwyczaj składa się z trzech prętów, osiowo symetrycznej próbki oraz pręta wymuszającego, które umieszczone są w jednej osi symetrii (rys. 1)[6]. 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

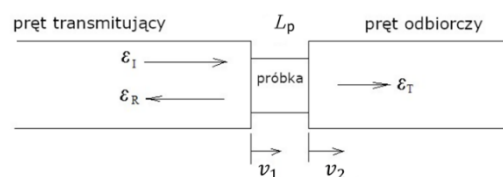
prędkości uderzenia pręta wymuszającego. Po dojściu do powierzchni pręta będącego w kontakcie z próbką fala ta częściowo odbija się od granicy pręta i próbki (fala odbita), a częściowo przechodzi do drugiego pręta (pręt odbiorczy). Falę propagującą w pręcie odbiorczym nazywa się falą transmitującą. Mierząc za pomocą mostków tensometrycznych falę wymuszającą, odbitą i transmitującą można otrzymać na podstawie stosunkowo prostych równań zależność pomiędzy naprężeniem i odkształceniem w próbce, przy danej szybkości odkształcenia[1]:

$$\sigma = \frac{A_0}{2A_p} E (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_0}{L_p} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{C_0}{L_p} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad (3)$$

gdzie:  $A_p$  – pole przekroju próbki,  $L_p$  – grubość próbki,  $C_0$  – prędkość rozchodzenia się fali podłużnej w pręcie,  $E$  – moduł Young'a materiału, z którego wykonano pręty,  $A_0$  – pole przekroju prętów,  $\varepsilon$  – odkształcenie sprężyste prętów wywołane propagującymi się w prętach falami, I, R, T – indeksy oznaczające falę padającą, odbitą i transmitującą

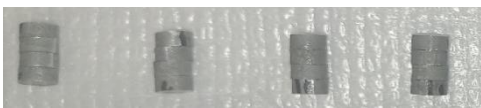


Rys. 1. Uproszczony schemat układu badawczego dzielonego pręta Hopkinsona

### 3. Problemy próbek warstwowych

Głównym problemem występującym podczas przygotowania próbek warstwowych do badań metodą dzielonego pręta Hopkinsona jest odpowiednio dokładne złączenie ze sobą kolejnych warstw próbki, aby zminimalizować powstanie im perfekcji. Szczególną uwagę należy zwrócić na zachowanie odpowiedniego pola tolerancji, w szczególności współosiowości powstałej w ten sposób próbki (rys. 1).

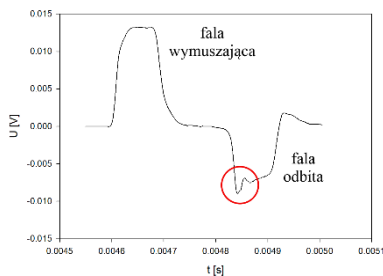
Natomiast drugim zasadniczym problemem jest sposób połączenia ze sobą kolejnych warstw w taki sposób by nie doszło do zaburzenia przechodzących przez próbkę fal. W tym przypadku najczęściej używa się do połączenia poszczególnych warstw próbki kleju. Wymaga to odpowiedniego przygotowania powierzchni łączonych elementów [4], dobór kleju tworzącego bardzo cienką warstwę połączenia adhezyjnego jak i właściwego dla sposobu obciążenia próbek [8, 9].



Rys. 1. Próbkki przygotowane do badań

### 4. Wyniki badań

Wpływ występujących imperfekcji w próbkach do badań metodą dzielonego pręta Hopkinsona widać szczególnie wyraźnie w przebiegu fali odbitej. W fazie początkowej następuje gwałtowny skok wartości rejestrowanego sygnału, a dopiero po pewnym czasie sygnał osiąga poprawną wartość. Związane jest to z występującymi przerwami pomiędzy poszczególnymi warstwami materiału próbki. Dopiero kiedy fala ściśnie poszczególne warstwy próbki tak, że wystąpi kontakt na całej powierzchni rejestrowany sygnał osiąga poprawną wartość.



Rys. 2. Przykładowy przebieg fali padającej i odbitej w przypadku źle przygotowanej próbki wielowarstwowej. Zaburzenia sygnału spowodowane niedostatecznie dobrze przygotowaną próbką warstwową zaznaczono czerwonym okręgiem.

W przypadku krzywej naprężenie – odkształcenie przekłada się to na przesunięcie w kierunku wartości dodatnich odkształceń punktu, od którego następuje wzrost naprężenia oraz nieliniowy przebieg krzywej dla odkształceń o małej wartości (rys. 3). Nie widać natomiast wpływu niedoskonałości na dalszy przebieg krzywej naprężenie – odkształcenie.

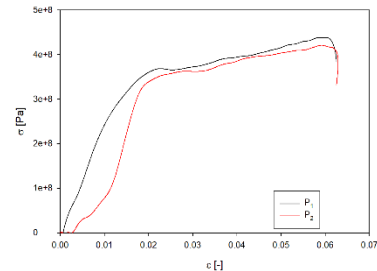
### 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wybrane problemy związane z im perfekcjami próbek warstwowych stosowanych do badań metodą dzielonego pręta Hopkinsona. Z przeprowadzonych prac wynika, że istniejące niedoskonałości wpływają na

początkowy przebieg krzywych pomiarowych, co przekłada się na otrzymane wyniki. Oznacza to również, że wymagania związane z przygotowaniem próbek warstwowych powinny być większe niż w przypadku próbek litych, zarówno w zakresie płasko równoległości powierzchni jak i średnic kolejnych warstw próbki.

Ze względu na możliwe dokładności wykonania próbek mniejsze błędy względne będą występowały w przypadku próbek o większych średnicach.

Mimo istniejących problemów z zastosowaniem próbek warstwowych opisanych w niniejszym opracowaniu zastosowane podejście spełnia inne wymagania metody dzielonego pręta Hopkinsona.



Rys. 3. Naprężenie – odkształcenie; P<sub>1</sub> – prawidłowo przygotowana próbka, P<sub>2</sub> – wpływ imperfekcji.

*Praca została częściowo wykonana w ramach Uczelnianego Grantu Badawczego Nr 22-715, finansowanego przez Wojskową Akademię Techniczną.*

### Literatura

- [1] Chen, W.W., Song, B., Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications, Springer, New York, NY Heidelberg 2011.
- [2] Panowicz, R., Janiszewski, J., *Tensile Split Hopkinson Bar Technique: Numerical Analysis of the Problem of Wave Disturbance and Specimen Geometry Selection* Metrol. Meas. Syst. 2016, 23, 425–436.
- [3] Bendarma, A., Jankowiak, T., Rusinek, A., Lodygowski, T., et al., *Dynamic Behavior of Aluminum Alloy Aw 5005 Undergoing Interfacial Friction and Specimen Configuration in Split Hopkinson Pressure Bar System at High Strain Rates and Temperatures* Materials 2020, 13, 4614.
- [4] Challita, G., Othman, R., Guegan, P., Khalil, K., et al., *New Experimental Sample For Shear Testing Of Adhesively Bonded Assemblies* Int. J. Mod. Phys. B 2008, 22, 1081–1086.
- [5] May, M., Hesebeck, O., Marzi, S., Böhme, W., et al., *Rate dependent behavior of crash-optimized adhesives – Experimental characterization, model development, and simulation* Eng. Fract. Mech. 2015, 133, 112–137.
- [6] Jeschke, A., Panowicz, R., *An overview of methods used in dynamic testing of materials* Bull. Mil. Univ. Technol. 2023, 72, 15–35.
- [7] Othman, R. (Ed.), *The Kolsky-Hopkinson Bar Machine*, Springer International Publishing, Cham 2018.
- [8] Wei, Y., Jin, X., Luo, Q., Li, Q., et al., *Adhesively bonded joints – A review on design, manufacturing, experiments, modeling and challenges* Compos. Part B Eng. 2024, 276, 111225.
- [9] Sassi, S., Tarfaoui, M., Ben Yahia, H., *An investigation of in-plane dynamic behavior of adhesively-bonded composite joints under dynamic compression at high strain rate* Compos. Struct. 2018, 191, 168–179.