



Przegląd metod stosowanych w dynamicznych badaniach materiałów

ADAM JESCHKE, ROBERT PANOWICZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,
adam.jeschke@wat.edu.pl, robert.panowicz@wat.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono podstawowy opis oraz metodykę badań materiałów i konstrukcji uwzględniających wpływ oddziaływania dużej szybkości odkształcenia na parametry wytrzymałościowe. Scharakteryzowano takie metrologie badawcze jak: test Taylora, metoda dzielonego pręta Hopkinsona i test pierścieniowy, pozwalające określić dynamiczne właściwości materiałów.

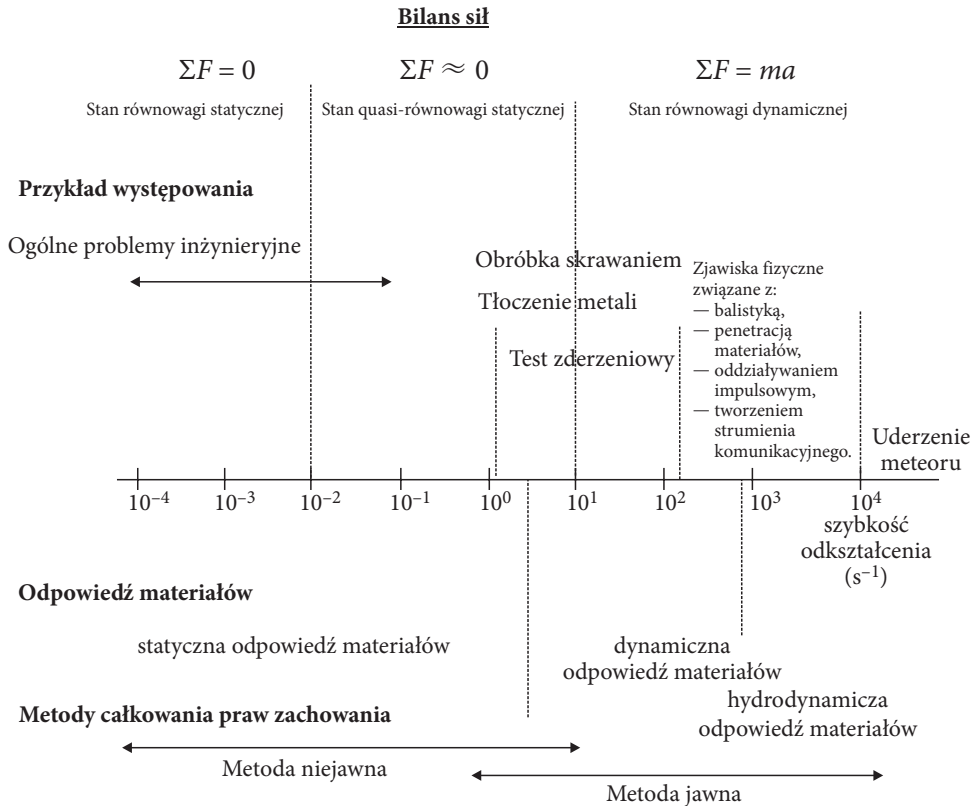
Słowa kluczowe: test Taylora, test pierścieniowy, metoda dzielonego pręta Hopkinsona, dynamiczne badania właściwości materiałów

DOI: 10.5604/01.3001.0054.2892

1. Wprowadzenie

Wiele materiałów konstrukcyjnych obciążonych impulsowo wykazuje odmienne właściwości w porównaniu do właściwości w zakresie quasi-statycznym. Ma to szczególne znaczenie w licznych zagadnieniach związanych z klasyczną obróbką materiałów przeprowadzaną z dużymi (10^3 s^{-1}) i bardzo dużymi szybkościami odkształcenia (10^5 s^{-1}), a także w przypadku projektowania wielu elementów sprzętu wojskowego (np. projektowanie wybuchowo formowanych pocisków, ocena skuteczności ochrony przed oddziaływaniami impulsowymi). Badanie tych zjawisk wymaga zastosowania unikatowej, a zarazem drogiej aparatury badawczej. Dodatkowym czynnikiem utrudniającym badania w zakresie większych szybkości odkształcenia są problemy związane z koniecznością uwzględnienia wpływu sił bezwładności na warunki przeprowadzenia badań eksperymentalnych (rys. 1).

Dotychczas opracowano kilka metod eksperymentalnych umożliwiających badanie właściwości materiałów w zakresie szybkości odkształcenia (od 10^2 s^{-1} do 10^5 s^{-1}), do których można zaliczyć: dzielony pręt Hopkinsona (ang. *split Hopkinson pressure bar*), uderzeniowy test Taylora (ang. *impact Taylor test*), test pierścieniowy (ang. *freely expanding ring test*) i test płyta–płyta (ang. *planar plate impact method*) [1–4] — rys. 1.

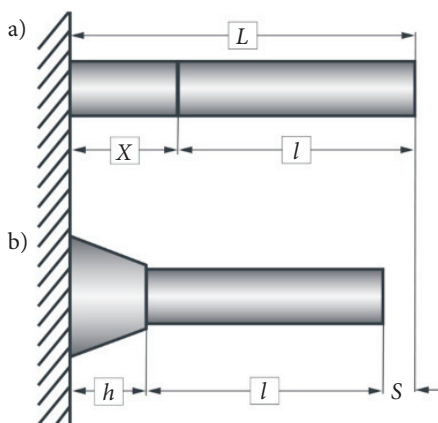


Rys. 1. Zakresy stosowalności technik badań mechanicznych właściwości materiału uwzględniających szybkość odkształcenia [s^{-1}] [5–7]

Bardzo duże wymagania metodologiczne związane z przeprowadzeniem testu płyta–płyta oraz najwyższe szybkości odkształcenia możliwe do osiągnięcia w tej metodzie przy stosunkowo wąskim zakresie ich stosowania powodują, że jest ona rzadko stosowana. Dlatego też w tej pracy zostaną omówione wszystkie wymienione wcześniej metody z wyjątkiem metody płyta–płyta.

2. Test Taylora

Pierwszą metodą badawczą z zakresu badań dynamicznych materiałów jest test Taylora. Pozwala on na oszacowanie granicy plastycznego płynięcia materiału przy średniej szybkości odkształceń z zakresu od 10^3 s^{-1} do 10^5 s^{-1} . Opracowany w 1948 r. przez Geoffreya Ingrama Taylora test polega na napędzeniu cylindrycznej próbki, która uderza prostopadłe w nieskończoną i nieodkształcalną tarczę ze znaną prędkością (rys. 2a) [1, 3, 8, 9]. Na skutek uderzenia próbki w tarczę dochodzi do propagacji w próbce fal sprężystych i plastycznych, czego skutkiem jest jej trwałe odkształcenie (rys. 2b).



Rys. 2. Ilustracja przedstawiająca kształt próbki: a) przed deformacją; b) po deformacji; L — początkowa długość próbki, l — długość niezdeformowanej części próbki, X — początkowa długość próbki, która ulega skróceniu na skutek odkształceń plastycznych, h — długość zdeformowanej części próbki, S — skrócenie próbki [10]

Opracowując podstawy teoretyczne, Taylor założył, że zachowanie próbki podczas dynamicznej deformacji można opisać za pomocą modelu materiału idealnie plastycznego [8]. W modelu tym naprężenie plastycznego płynięcia jest stałe i niezależne od szybkości i wielkości odkształcenia. Dodatkowo Taylor założył, że przebieg fal w próbce ma charakter jednowymiarowy. Przy takich założeniach dynamiczną granicę plastyczności opisuje równanie:

$$\sigma_{pl} = \frac{\rho V_0^2 (L-l)}{2(L-(l+h)) \ln \frac{L}{l}}, \quad (1)$$

gdzie: σ_{pl} — dynamiczna granica plastyczności,
 ρ — gęstość próbki,

- V_0 — prędkość próbki (pocisku) przed zderzeniem z tarczą,
- L — początkowa długość próbki,
- l — długość niezdeformowanej części próbki,
- h — długość zdeformowanej części próbki.

Podczas gdy globalną (średnią) wielkość szybkości odkształcenia można wyznaczyć na podstawie równania (2):

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2} \frac{V_0}{L-l}. \quad (2)$$

Z równań (1) i (2) wynika, że wartość mierzonych parametrów jest zależna od prędkości uderzenia (warunki eksperymentu) i całkowitej długości próbki przed eksperymentem oraz od długości części odkształconej i nieodkształconej próbki po eksperymentcie (geometria próbki). Dodatkowo dynamiczna granica plastyczności zależy od gęstości próbki (1).

Parametry geometryczne określa się dzięki klasycznym przyrządom pomiarowym lub za pomocą współrzędnościowej maszyny do pomiarów wielkości geometrycznych [1, 3, 8–11]. Do określenia prędkości uderzenia wykorzystuje się bariery optyczne lub szybkie kamery.

Podczas opracowywania założeń, które pozwoliły uzyskać prostą zależność (1) w funkcji łatwych do określenia parametrów geometrycznych próbki przed eksperymentem i po nim oraz prędkości próbki pominięto wiele zjawisk wpływających na końcowy wynik pomiarów. W modelu nie uwzględniono: wpływu tarcia pomiędzy próbka i tarczą, zmienności prędkości ruchu powierzchni swobodnej próbki podczas procesu jej dynamicznej deformacji, osłabienia termicznego materiału oraz rzeczywistej charakterystyki wytrzymałościowej materiału zależnej między innymi od szybkości odkształcenia. W rezultacie otrzymana na podstawie równania (1) wartość dynamicznej granicy plastyczności jest jedynie wielkością szacunkową.

Ze względu na prostotę i stosunkowo łatwe przygotowanie stanowiska badawczego umożliwiającego realizację testu Taylora ciągle poszukuje się różnorodnych sposobów, które pozwolą zwiększyć dokładność mierzonych wielkości. Badania w tym zakresie prowadzone są w dwóch podstawowych kierunkach. Pierwszy związany jest z modyfikacją warunków przeprowadzenia eksperymentu. Drugi z analizą wyników badań i modelami przebiegu procesu odkształcania próbki.

Już sam Taylor zaproponował modyfikację równania (1) przez wprowadzenie współczynnika korekcyjnego, który uwzględni wpływ zmienności prędkości ruchu powierzchni swobodnej próbki (końca walca) na otrzymany wynik [1, 3, 8].

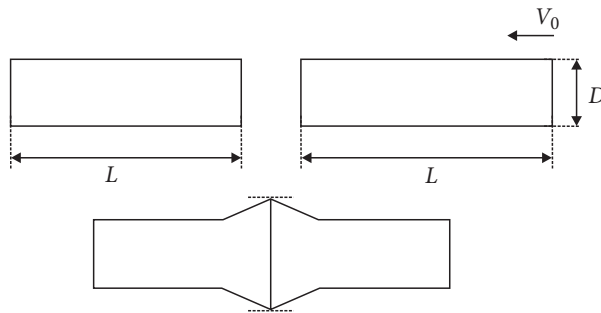
Jeśli przez $\sigma_{plkor.}/\sigma_{pl}$ oznaczy się współczynnik korekcyjny, to wprowadzona przez Taylora zależność ma następującą postać:

$$\frac{\sigma_{plkor.}}{\sigma_{pl}} = \frac{L-(l+h)}{L-l} \frac{\ln \frac{L}{l}}{\left(K - \frac{C_p}{a}\right)^2}, \quad (3)$$

$$a^2 = \frac{2\sigma_{pl}}{\rho}, \quad K = \frac{V_0 + C_p}{a}, \quad C_p = \frac{V_0}{2} \frac{h}{L-(l+h)}. \quad (4)$$

W 2013 r. Włodarczyk i Sarzyński wyprowadzili zależności na dynamiczną granicę plastyczności w przypadku ciała sprężysto-plastycznego z liniowym umocnieniem [12, 13]. Natomiast w 2015 r. opracowali model opisujący dynamiczne ściskanie materiałów porowatych [14].

Jedną z najczęściej wykorzystywanych modyfikacji stanowiska eksperymentalnego jest układ pozwalający na realizację symetrycznego testu Taylora (ang. *symmetrical Taylor impact test*) [1, 11, 15–17]. W tym przypadku dochodzi do osiowosymetrycznego zderzenia dwóch takich samych próbek (rys. 3). Ze względów praktycznych realizowane jest to przez uderzenie napędzonej próbki w próbkę nieruchomą. Próbki charakteryzują się taką samą średnicą oraz długością, dlatego ich powierzchnie będące w kontakcie i odkształcające się mają taką samą prędkość prostopadłą do prędkości uderzenia V_0 . Nie występuje więc ruch względny powierzchni styku próbek i tarcie nie wpływa na proces odkształcania próbek.



Rys. 3. Schemat symetrycznego testu Taylora

Kolejną wersją testu Taylora jest tak zwany asymetryczny test Taylora (ang. *antisymmetric rod impact test*). W układzie tym napędzona tarcza uderza w zamocowaną nieruchomą próbkę, która pozostaje w spoczynku do chwili zderzenia, dzięki czemu łatwiejsza jest realizacja wszelkiego rodzaju pomiarów i rejestracji. Również w takiej sytuacji łatwiej otrzymać inne, różne od typowych warunki eksperymentu. Rozwiązanie to pozwala na stosunkowo łatwe podgrzanie lub ochłodzenie próbki do pożądanej temperatury [1, 18].

Obecnie bardzo często wykorzystuje się test Taylora do walidacji związków konstytutywnych i otrzymanych do nich stałych materiałowych [16, 19, 20]. Trwają również próby nad rozwiązaniami wykorzystującymi inżynierię odwrotną [19, 21, 22]. W podejściach tych, na podstawie warunków eksperymentu i kształtu próbki przed badaniami i po nich, określa się stałe materiałowe.

Test Taylora służył nie tylko do badania metali [11, 23, 24], lecz także polimerów [1, 25], szkiele i materiałów spienionych [1, 3, 14, 15, 26].

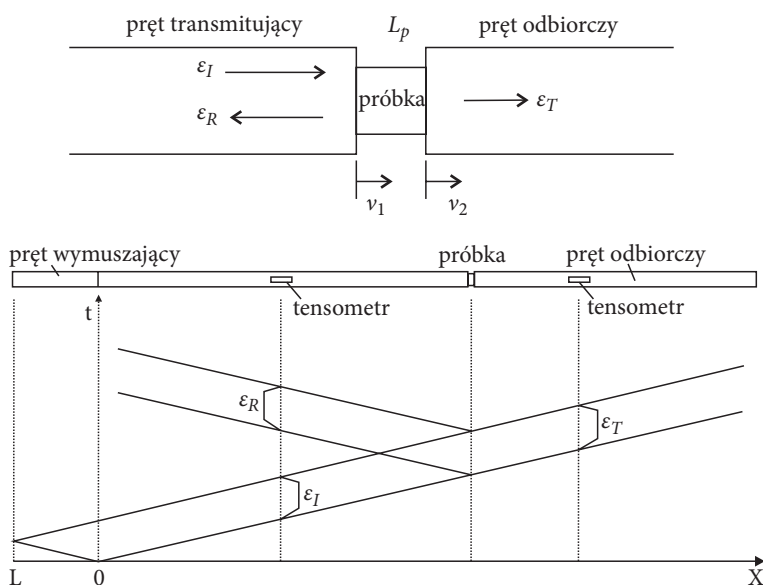
3. Metoda dzielonego pręta Hopkinsona

Obecnie najpowszechniejszą techniką badawczą umożliwiającą badania materiałów w zakresie dużych szybkości odkształcenia jest metoda dzielonego pręta Hopkinsona (ang. *Split Hopkinson Pressure Bar* — SHPB), czasami zwana metodą lub prętem Kolskiego. Dotychczas ukazało się wiele artykułów i książek naukowych dotyczących: metodyki badań realizowanych metodą SHPB [27–29] i prezentujących wyniki badań otrzymanych za jej pomocą, różnorodnych modyfikacji umożliwiających badania materiałów w różnych warunkach obciążeń (rozciąganie, skręcanie, złożone stany obciążeń) [27, 29–32], jak i geometrii badanych próbek [1, 27, 29].

Podstawy teoretyczne metody SHPB bazują na jednowymiarowej teorii propagacji fal sprężystych. Typowy układ badawczy w metodzie dzielonego pręta Hopkinsona składa się z: dwóch długich prętów, próbki oraz cylindrycznego pręta wymuszającego (pocisku) — rys. 4 [27]. Wszystkie elementy umieszczone są na jednej osi symetrii. Pierwszy z prętów, w który uderza pocisk, nazywany jest transmitującym, a drugi odbiorczym. Pomiędzy ich czołami znajduje się krótka, w porównaniu do długości prętów, próbka materiałowa (rys. 4).

W chwili początkowej pneumatyczny układ napędowy wprawia w ruch pręt wymuszający, który uderza w pierwszy, transmitujący pręt. Na skutek uderzenia cylindrycznego pocisku w pręcie transmitującym wygenerowana jest trapezoidalna fala sprężysta ε_I . Zakłada się, że pręty odkształcają się wyłącznie sprężysto, dlatego prędkość tej fali wynosi $C_0 = \sqrt{E/\rho}$. Natomiast czas trwania tej fali, nazywanej falą wymuszającą ε_I (ang. *I* — *incident or input wave*), odpowiada podwójnemu czasowi przejścia fali w pręcie wymuszającym, a jej amplituda jest wprost proporcjonalna

do prędkości uderzenia pocisku V . Fala wymuszająca ε_I , dochodząc do czoła pręta transmitującego, będącego w kontakcie z próbką, przechodzi częściowo do próbki materiałowej, zaś częściowo się od niej odbija, propagując w kierunku przeciwnym w postaci fali rozciągającej ε_R (fala odbita, ang. R — *reflected*). Odbicie fali jest efektem różnicy impedancji mechanicznych pomiędzy próbką a prętami, z którymi próbka jest w kontakcie. Amplituda padającej fali wymuszającej oraz stosunek powierzchni czołowych prętów i próbki jest na tyle duża, że próbka ulega deformacji plastycznej. W deformowanej próbce dochodzi w bardzo krótkim czasie do wielokrotnych odbić fal od jej granic. Część fal jest przejmowana przez pręt odbiorczy, tworząc falę transmitującą (przechodzącą) ε_T (ang. T — *transmitted output wave*) — rys. 4, zawierającą informację o dynamicznej reakcji materiału próbki [1, 27].



Rys. 4. Układ badawczy dzielonego pręta Hopkinsona z trajektorią propagacji fali naprężenia zaprezentowaną na dolnym rysunku [29]

W pierwszych rozwiązaniach do generacji pierwszego impulsu w pręcie transmitującym używano materiałów wybuchowych [27, 29, 33]. Obecnie w tym celu wykorzystuje się pneumatyczne układy napędowe (działa gazowe) [1, 27, 29, 34, 35]. Pojawiły się również badania, w których pocisk napędzono zmiennym polem magnetycznym [36–40].

Na podstawie jednowymiarowej teorii propagacji fal sprężystych oraz zarejestrowanych przebiegów fali wymuszającej ε_I , odbitej ε_R oraz transmitującej ε_T można wyznaczyć dynamiczną krzywą umocnienia badanego materiału.

Zgodnie z teorią prędkość powierzchni kontaktowej pręta transmitującego v_1 (rys. 4) wyraża się równaniem:

$$v_1 = C_0(\varepsilon_I - \varepsilon_R), \quad (5)$$

podczas gdy prędkość czoła pręta odbiorczego v_2 można zapisać jako:

$$v_2 = C_0\varepsilon_T. \quad (6)$$

Wtedy średnią szybkość odkształcenia próbki $\dot{\varepsilon}_p$ można określić z zależności:

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{v_1 - v_2}{L_p} = \frac{C_0}{L_p}(\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T), \quad (7)$$

gdzie: L_p — początkowa długość próbki.

Nominalne odkształcenie plastyczne próbki w czasie eksperymentu ε_p otrzymywane jest w wyniku całkowania równania (7):

$$\varepsilon_p = \frac{C_0}{L_p} \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt. \quad (8)$$

Ponownie wykorzystując teorię propagacji fal sprężystych, można określić wartości sił normalnych występujących na powierzchniach kontaktowych pręta transmitującego i odbiorczego:

$$F_1 = E(\varepsilon_I + \varepsilon_R)A_0, \quad (9)$$

$$F_2 = E\varepsilon_TA_0, \quad (10)$$

gdzie: E — moduł Younga materiału, z którego wykonano pręty,
 A_0 — pole przekroju poprzecznego prętów.

W celu wyznaczenia naprężenia nominalnego w próbce σ_p podczas deformacji zakłada się równowagowy stan naprężenia. Oznacza to, że siły działające na powierzchnie czołowe próbki są równe $F_1 = F_2$, a naprężenie nominalne w próbce można wtedy wyrazić równaniem (11):

$$\sigma_p = \frac{F_1 + F_2}{2A_p}, \quad (11)$$

gdzie: A_p — początkowe pole przekroju poprzecznego próbki.

Po podstawieniu zależności (9) i (10) do równania (11) otrzymujemy:

$$\sigma_p = \frac{E A_0}{2 A_p} (\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T). \quad (12)$$

W sytuacji równowagowego stanu naprężenia z (9) i (10) wynika również, że $\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T$. Prowadzi to do uproszczenia zależności (5), (6) oraz (12) do następujących postaci:

$$\sigma_p = E \frac{A_0}{A_p} \varepsilon_T, \dot{\varepsilon}_p = -\frac{2C_0}{L_p} \varepsilon_R, \varepsilon_p = \frac{C_0}{L_p} \int_0^t \dot{\varepsilon}_p dt = -\frac{2C_0}{L_p} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt. \quad (13)$$

Zależności (13) pozwalają określić dynamiczną krzywą naprężenia w funkcji odkształcenia, w zależności od zadanej szybkości odkształcenia. Natomiast rzeczywistą krzywą umocnienia i rzeczywistą szybkość odkształcenia uzyskuje się z zależności:

$$\sigma_{rzp} = \sigma_p(t) [1 - \varepsilon_p], \varepsilon_{rzp} = \ln [1 - \varepsilon_p], \dot{\varepsilon}_{rzp} = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{1 - \varepsilon_p}. \quad (14)$$

Przed przystąpieniem do eksperymentów należy określić geometrię próbki i prędkość uderzenia pręta wymuszającego V w zależności od planowanej, zakładanej szybkości odkształcenia oraz wielkości naprężenia.

Z teorii sprężystości wynika również, że amplitudę fali wymuszającej można określić z zależności (15):

$$A_I = \frac{V}{2C_0}. \quad (15)$$

Naprężenie w pręcie spowodowane propagacją fali o amplitudzie określonej zależnością (15) nie może być większe niż granica plastyczności materiału, z którego wykonano pręt wymuszający. W przypadku prętów wykonanych ze stali maraging o granicy plastyczności 1 GPa i prędkości dźwięku wynoszącej około 4700 m/s maksymalna prędkość uderzenia musi być mniejsza od 52 m/s.

Korzystając z zależności (7), przy założeniu, że amplituda fali przechodzącej będzie mała ($\varepsilon_I \approx -\varepsilon_R$), można określić maksymalną do osiągnięcia wartość szybkości odkształcenia:

$$\dot{\varepsilon}_{pmax} = \frac{V}{L_p}, \quad (16)$$

która dla próbki o długości 1 cm będzie wynosiła 5200 1/s.

Natomiast korzystając z równania (12) i (15) w warunkach równowagi, zależność na naprężenie w warunkach dynamicznych obciążeń przyjmuje postać:

$$\sigma_p = E \frac{A_0}{A_p} \frac{V}{2C_0} - E \frac{A_0}{A_p} \frac{L_p}{2C_0} \dot{\epsilon}_p \quad (17)$$

i osiąga maksymalną wartość w przypadku, gdy szybkość odkształcenia będzie równa zero:

$$\sigma_p = E \frac{A_0}{A_p} \frac{V}{2C_0}. \quad (18)$$

Przy określaniu geometrii próbki bierze się również pod uwagę efekty bezwładnościowe, których wpływ na krzywą naprężenie — odkształcenie nie powinien przekroczyć 5%.

Wpływ bezwładności promieniowej próbki na wyniki pomiarów określił już Kolsky [27, 41]. Badania w tym zakresie zostały rozwinięte przez Daviesa i Huntera przez uwzględnienie bezwładności osiowej [27, 41, 42]:

$$\sigma_{mT} = \sigma_p + \left(\frac{L_0^2}{6} - \frac{D_0^2}{8} v^2 \right) \rho \ddot{\epsilon}, \quad (19)$$

gdzie: σ_{mT} — zmierzona na pręcie odbiorczym wartość naprężenia w próbce,
 D_0 — średnica próbki,
 v — współczynnik Poissona,
 $\ddot{\epsilon} = d\dot{\epsilon}_p / dt$.

Na zachowanie próbki nie będą miały wpływu efekty bezwładnościowe, kiedy czynniki w nawiasie równania (19) będą się znosić. Otrzymujemy w ten sposób optymalną długość próbki (20):

$$\frac{L_0}{D_0} = \frac{\sqrt{3}}{2} v. \quad (20)$$

Dalsze prace w tym zakresie prowadzili Samanta [43] i Gorham [41], co doprowadziło do opracowania najczęściej obecnie wykorzystywanej poprawki uwzględniającej efekty bezwładnościowe w metodzie dzielonego pręta Hopkinsona:

$$\sigma_m = \sigma_p + \rho \left(\frac{L_0^2}{6} - \frac{D_0^2}{32} \right) \ddot{\epsilon} + \rho \left(\frac{D_0^2}{64} + \frac{L_0^2}{6} \right) \dot{\epsilon}^2, \quad (21)$$

gdzie: σ_m — wyznaczona z pomiarów wartość naprężenia w próbce.

Zależność ta często uzupełniana jest jeszcze o czynnik uwzględniający wpływ tarcia pomiędzy próbką a czołami prętów (22) [44]:

$$\sigma_m = \sigma_p \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{D_0}{L_0} \right) + \rho \left(\frac{L_0^2}{6} - \frac{D_0^2}{32} \right) \ddot{\epsilon} + \rho \left(\frac{D_0^2}{64} + \frac{L_0^2}{6} \right) \dot{\epsilon}^2, \quad (22)$$

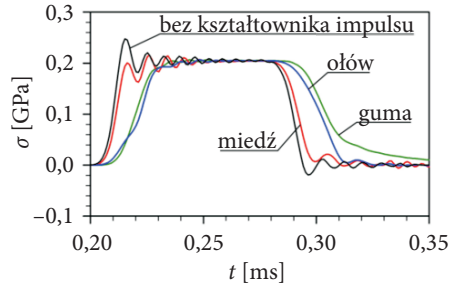
gdzie: μ — współczynnik tarcia.

Z zależności (13) wynika, że szybkość odkształcenia jest odwrotnie proporcjonalna do długości próbki. Biorąc dodatkowo pod uwagę przedstawione wcześniej wymagania dotyczące prętów oraz problemy techniczne związane z napędzeniem pocisku do większych prędkości, często jedynym sposobem osiągnięcia większych szybkości odkształcenia podczas badań jest skrócenie długości próbek. Stosunek długości próbki do jej średnicy L_0/D_0 mieści się zazwyczaj w przedziale od 0,5 do 1 [1, 27]. Z kolei średnica próbki jest zazwyczaj od dwóch do czterech razy mniejsza od średnicy prętów [1, 29].

Innym rozwiązaniem umożliwiającym osiągnięcie większych szybkości odkształceń jest użycie w badaniach prętów o mniejszych średnicach. Dość często wykorzystuje się pręty o średnicach 3 lub 6 mm pozwalające uzyskać szybkości odkształceń rzędu 10^4 s^{-1} [45].

Malinowski i Klepaczek wyprowadzili zależności pozwalające otrzymać dynamiczną krzywą naprężenie — odkształcenie w układzie bez pręta transmitującego, w którym próbka jest obciążana bezpośrednio przez uderzenie w nią pocisku (ang. *direct impact compression test* — DICT) [27, 46]. Układ ten umożliwia otrzymanie podczas badań większych szybkości odkształceń ($10^3 - 10^5 \text{ s}^{-1}$). Do uzyskania dokładnych wyników wymaga jednak określenia prędkości pocisku oddziałującego z próbką, a otrzymane krzywe naprężenie–odkształcenie charakteryzują się większymi oscylacjami wynikającymi z generacji w układzie eksperymentalnym wysokoczęstotliwościowych oscylacji Pochhammera–Chree (P-Ch). Dopiero rozwój możliwości szybkich kamer i oprogramowania przeznaczonego do analizy ruchu spowodował częstsze wykorzystywanie tej metody [47–49].

Wysokoczęstotliwościowe oscylacje P-Ch wynikają ze skończonej, rzeczywistej geometrii prętów, wpływając na zaburzenia sygnałów propagujących się w nich [50]. Widoczne są w postaci zaburzenia rejestrowanych sygnałów ϵ_I oraz ϵ_R . Jednym ze sposobów neutralizacji tego zjawiska jest wykorzystanie kształtowników impulsu [51]. Są to niewielkie, cienkie elementy wykonane z plastycznego materiału (miedź i jej stopy, aluminium) umieszczane na czole pręta transmitującego od strony pocisku [32]. Zastosowanie kształtownika impulsu powoduje wzrost czasu narastania impulsu wymuszającego, znacząco utrudniając powstanie oscylacji P-Ch (rys. 5). Inną metodą stosowaną w tym celu jest zaokrąglenie czoła pocisku [52].



Rys. 5. Wpływ materiału kształtownika impulsu na otrzymany sygnał [51]

Metoda dzielonego pręta Hopkinsona doczekała się licznych modyfikacji. Najprostsze dotyczą badania materiałów w podwyższonych i obniżonych temperaturach [27, 29, 53]. Inne umożliwiają badania materiałów w zakresie skręcania [29, 54, 55] i rozciągania [27, 29, 56] oraz w zakresie złożonych stanów obciążeń [57, 58]. Istnieją rozwiązania do dynamicznego badania zginania trójpunktowego [27, 59] oraz czteropunktowego [60, 61].

W warunkach dynamicznych obciążeń z wykorzystaniem metody SHPB badane były zarówno materiały ciągliwe [27, 29], jak i kruche [62, 63]. Szczególną wrażliwość na szybkość odkształceń wykazują różnego rodzaju betony [64–66]. W obszarze zainteresowań badaczy leżały również: pianki [67], kości [68, 69], materiały ceramiczne [63], jak i różne kompozyty [70, 71].

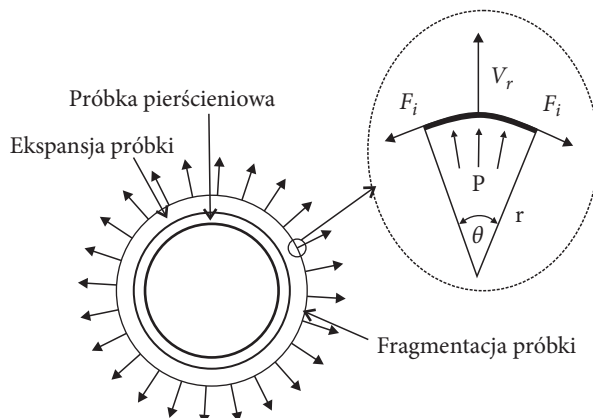
4. Test pierścieniowy

Test pierścieniowy (ang. *freely expanding ring test* — FERT) jest jedną z metod badawczych, która wykorzystuje zjawisko rozciągania promieniowego pierścienia w wyniku oddziaływania sił inercji F_i (rys. 6). Efekt ten uzyskuje się przez równomierne obciążenie P powierzchni wewnętrznej pierścienia, który w wyniku oddziałujących sił ulega osiowosymetrycznej ekspansji promieniowej. Dlatego głównym założeniem testu pierścieniowego jest krótkotrwałe napędzenie pierścienia do zadanej prędkości radialnej V_r (rys. 6) oraz obserwacja ruchu ekspandującego, rozciągającego się promieniowo pierścienia [1, 72].

Podczas swobodnego rozciągania się pierścienia, które zachodzi pod wpływem sił bezwładności, pojawia się obwodowe, jednowymiarowe naprężenie rozciągające σ_θ hamujące ruch ścianek pierścienia. Naprężenie to można określić za pomocą równania:

$$\sigma_\theta = -\rho r \frac{\partial^2 r}{\partial t^2}, \quad (23)$$

gdzie: r — promień pierścienia,
 t — czas.



Rys. 6. Schemat ekspansji promieniowej próbki pierścieniowej

Z kolei odkształcenie względne ε_θ odpowiadające naprężeniu σ_θ oblicza się według równania (24):

$$\varepsilon_\theta = \int_{r_0}^r \frac{dr}{r} = \ln \frac{r}{r_0}, \quad (24)$$

gdzie: r_0 — średni promień początkowy pierścienia.

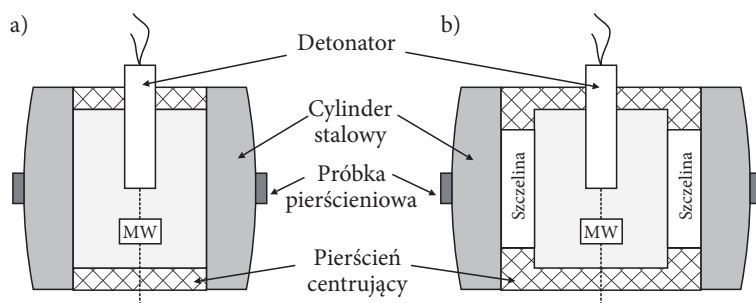
Różniczkując równanie (24) względem czasu, można otrzymać zależność na szybkość odkształcenia w postaci [1]:

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dt} = \ddot{\varepsilon}_\theta = \frac{1}{r} \frac{dr}{dt} = \frac{V_r}{r}. \quad (25)$$

Początki tej metodyki badawczej sięgają prac badawczych Sedlacka i Haldena [74], którzy wymyślili innowacyjne podejście do badania materiałów kruchych przy niskich wartościach szybkości odkształcenia. Obecnie w badaniach dynamicznych wykorzystuje się jego zmodyfikowaną wersję opracowaną przez Hoggata i Rechta [75], którzy jako pierwsi użyli materiałów wybuchowych do napędzenia pierścienia. Dzięki temu podejściu można badać materiały maksymalnie do szybkości odkształcenia na poziomie 10^5 s^{-1} [2, 76].

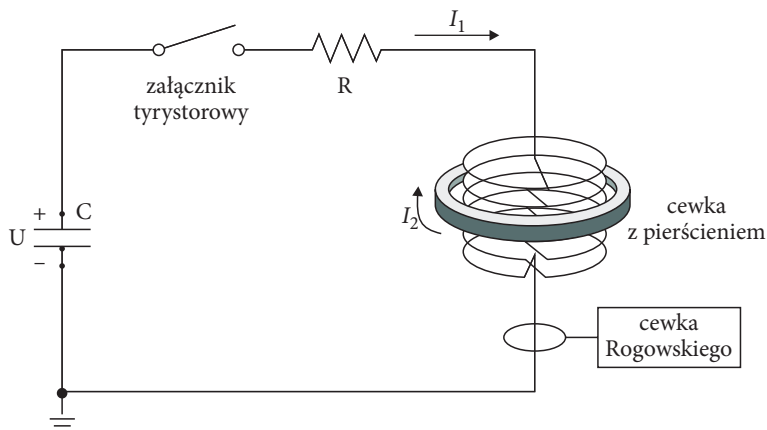
Standardowy układ badawczy (rys. 7) stosowany w wybuchowym teście pierścieniowym składa się z próbki pierścieniowej nakładanej na stalowy cylinder o dużej grubości ścianki. W jego wnętrzu mocowany jest cylindryczny ładunek materiału wybuchowego, który za pomocą pierścieni ustalających jest centrowany względem powierzchni wewnętrznej cylindra (rys. 7). Aby zapewnić jednorodne warunki obciążenia pierścienia, zwykle instalowane są dwa detonatory na obu końcach ładunku wybuchowego. Po równoczesnym zainicjowaniu ładunku materiału wybuchowego

powstaje fala detonacyjna, która docierając do powierzchni wewnętrznej stalowego cylindra, przechodzi w sprężystą falę ściskającą, przemieszczającą się promieniowo w kierunku powierzchni zewnętrznej cylindra. Gdy fala uderzeniowa osiągnie powierzchnię, na której znajduje się pierścień, ulega odbiciu i powraca jako fala rozciągająca. W tym momencie, dzięki pędowi przekazanemu przez sprężystą falę rozciągającą, pierścień oddziela się od powierzchni cylindra. Dalej jest już rozciągany jedynie siłami własnej bezwładności [1, 77]. Dzięki temu napędzenie pierścienia zachodzi w sposób niemal skokowy, co ma szczególne znaczenie podczas badania materiałów charakteryzujących się małą ciągliwością. W przypadku tych materiałów szybko dochodzi do fragmentacji pierścienia, po stosunkowo krótkiej fazie inercyjnej [1].



Rys. 7. Schemat stanowiska do wybuchowego napędzenia pierścienia z jednym detonatorem: a) bez szczeliny, b) ze szczeliną [78]

Badanie materiałów tą metodą ma szczególną wadę związaną z koniecznością przygotowania specjalnego miejsca (bunkra) oraz zastosowania specjalistycznych zabezpieczeń chroniących aparaturę badawczą przed uszkodzeniem. Dlatego Zhang i Ravi-Chandar [79–82] oraz Morales [83] opracowali alternatywną wersję testu pierścieniowego opierającą się na oddziaływaniu sił elektromagnetycznych (rys. 8). Taka wersja testu pierścieniowego nazywana jest elektromagnetycznym testem pierścieniowym (ang. *electromagnetic ring expansion test* — ERET) [84] i pozwala uzyskać szybkość odkształcenia na poziomie $2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ [72]. Wykorzystanie w badaniach zmiennego prądu do generacji zmiennego pola elektromagnetycznego napędzającego próbkę pozwala na dużo łatwiejsze kontrolowanie warunków jej obciążenia. Sterowanie obciążeniem próbki realizowane jest pośrednio przez zmianę amplitudy i szybkości narastania impulsu prądowego. Podczas elektromagnetycznego testu pierścieniowego w próbce występują jedynie siły masowe (brak zjawisk falowych), co wyróżnia tę metodę spośród pozostałych. Należy zwrócić uwagę, że opisaną metodą można przeprowadzać testy w typowych warunkach laboratoryjnych [1, 85, 86].



Rys. 8. Schemat ideowy układu elektromagnetycznego: C — kondensator ładowany do napięcia U , R — rezystancja obwodu cewki, I_1 — prąd w obwodzie cewki, I_2 — wzbudzony prąd w pierścieniowej próbce [86]

Niestety ta metoda ma kilka istotnych wad wynikających z jej istoty badawczej. Zaliczamy do nich nagrzewanie się materiału próbki w wyniku przepływu prądu (nagrzewanie indukcyjne) oraz możliwość powstawania łuku elektrycznego podczas fragmentacji pierścienia. Powstanie łuku może wywołać dodatkowe, lokalne nagrzewanie się materiału, skutkujące zmianą warunków eksperymentu (zaburzenie ruchu fragmentów pierścienia i rejestracji procesu) [80]. Janiszewski i Pichola [87] zaproponowali przeprowadzenie ERET w warunkach próżni, co znacząco ograniczyło zjawisko powstawania łuku elektrycznego podczas fragmentacji pierścienia. Należy również zwrócić uwagę, że badania te są ograniczone jedynie do materiałów z dobrą przewodnością elektryczną [1, 85, 88–90]. Dlatego do badań materiałów o niskiej przewodności [91, 92] stosuje się tak zwaną technikę pośredniego rozszerzenia, wymyśloną przez Gourдина [91]. Wykorzystuje się w niej pierścień kompozytowy wykonany z miedzi oraz badanego materiału, w celu napędzenia próbki i uniknięcia jej nadmiernego nagrzania [93].

5. Podsumowanie

Przedstawione w artykule metodyki badawcze: test Taylora, test pierścieniowy oraz metoda dzielonego pręta Hopkinsona stanowią obecnie podstawę wyznaczania parametrów materiałowych oraz wytrzymałościowych uwzględniających wpływ szybkości odkształcenia.

Podsumowując wymienione w artykule metody badawcze, można zauważyć powszechność stosowania metody dzielonego pręta Hopkinsona. Związane jest to z jednej strony z możliwością badania różnych typów materiałów, a z drugiej z badaniem materiałów w różnych, również złożonych, warunkach obciążeń. Należy też zaznaczyć, że aparatura badawcza wykorzystywana w metodzie dzielonego pręta Hopkinsona jest obecnie łatwo dostępna, w przeciwieństwie do aparatury używanej w innych opisanych w artykule metodach badawczych. Szczególne wymagania dotyczą zwłaszcza wybuchowego testu pierścieniowego, w którym wykorzystuje się materiały niebezpieczne. Wiąże się to z koniecznością przeprowadzenia badań w specjalnie do tego celu przygotowanych miejscach, jak również naraża wykorzystywany do pomiarów sprzęt na uszkodzenie lub zniszczenie. Natomiast elektromagnetyczny test pierścieniowy może być stosowany tylko do badania materiałów o dobrej przewodności elektrycznej, co znacząco ogranicza rodzaj badanych materiałów. Z kolei test Taylora, ze względu na zastosowane w nim uproszczenia, nadaje się jedynie do wyznaczenia przybliżonej wartości dynamicznej granicy plastyczności danego materiału.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 29.06.2023. Zatwierdzono do publikacji 1.09.2023.

Adam Jeschke <https://orcid.org/0000-0002-3568-0945>

Robert Panowicz <https://orcid.org/0000-0002-0709-1369>

LITERATURA

- [1] JANISZEWSKI J., *Badania materiałów inżynierskich w warunkach obciążenia dynamicznego*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2012.
- [2] PANOWICZ R., JANISZEWSKI J., WŁODARCZYK E., *Wybór związku konstytutywnego do analizy zachowania się materiału pierścienia rozpręzanego impulsowym silnym polem elektromagnetycznym*, Biuletyn WAT, 56, 4, 2007.
- [3] LU G., WANG B., ZHANG T., *Taylor impact test for ductile porous materials —Part 1: theory*, International Journal of Impact Engineering, 25, 10, 2001, 981–991.
- [4] KUHN H., MEDLIN D. (eds.), *Mechanical Testing and Evaluation*, ASM International, 2000.
- [5] PRATHEEKSH M., AKSHATHA D., *FE based Crash Simulation of belly landing of a light transport aircraft*, GITAM University, Hyderabad, India 2019.
- [6] TANSEL D., *Ballistic penetration of hardened steel plates*, Middle East Technical University, 2010.
- [7] ZUKAS J.A. (ed.), *High velocity impact dynamics*, Wiley, New York 1990.
- [8] TAYLOR G.I., *The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress I. Theoretical considerations*, Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci., 194, 1948, 289–299.
- [9] SLAIS M., FOREJT M., DOHNAL I., *Verification of Measurement of Dynamic Loading During The Taylor Anvil Test*, MM Science Journal, 2016, 1343–1345.
- [10] WŁODARCZYK E., JANISZEWSKI J., *Określenie dynamicznej granicy plastyczności materiału penetratora wykonanego ze spieku na osnowie wolframowej metodą Taylora*, Biuletyn WAT, 58, 2, 2009.

- [11] SEN S., BANERJEE B., SHAW A., *Taylor impact test revisited: Determination of plasticity parameters for metals at high strain rate*, International Journal of Solids and Structures, 193–194, 2020, 357–374.
- [12] WŁODARCZYK E., SARZYŃSKI M., *Dynamiczne zachowanie się metalowego pręta ze wzmocnieniem potęgowym uderzającego w sztywną tarczę. Część I. Rozważania teoretyczne*, Biuletyn WAT, 62, 1, 2013.
- [13] WŁODARCZYK E., SARZYŃSKI M., *Strain Energy Method for Determining Dynamic Yield Stress in Taylor's Test*, Engineering Transactions, 65, 2017, 499–511.
- [14] WŁODARCZYK E., SARZYŃSKI M., *Behaviour of ductile low porous materials with strain hardening in Taylor experiment*, Biuletyn WAT / Bulletin of MUT, 64, 2, 2015, 69–101.
- [15] JUNCHENG L., GANG C., YONGGANG L., FENGLEI H., *Investigation on the Application of Taylor Impact Test to High-G Loading*, Frontiers in Materials, 8, 2021.
- [16] FORDE L.C., PROUD W.G., WALLEY S.M., *Symmetrical Taylor impact studies of copper*, Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci. A, 465, 2009, 769–790.
- [17] COUQUE, H., *Experimental and numerical analyses of the dynamic failure processes of symmetric Taylor impact specimens*, EPJ Web Conf., 183, 01043, 2018.
- [18] CHAKRABORTY S., SHAW A., BANERJEE B., *An axisymmetric model for Taylor impact test and estimation of metal plasticity*, Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci., 471, 2174, 2015.
- [19] VOLKOV G.A., BRATOV V.A., BORODIN E.N., EVSTIFEYEV A.D., et al., *Numerical simulations of impact Taylor tests*, Journal of Physics Conference Series, 1556, 012059, 2020.
- [20] BRUNIG M., DRIEMEIER L., *Numerical simulation of Taylor impact tests*, International Journal of Plasticity, 23, 2007, 1979–2003.
- [21] RODIONOV E.S., LUPANOV V.G., GRACHEVA N.A., MAYER P.N. et al., *Taylor Impact Tests with Copper Cylinders: Experiments, Microstructural Analysis and 3D SPH Modeling with Dislocation Plasticity and MD-Informed Artificial Neural Network as Equation of State*, Metals, 12, 2, 2022, 264.
- [22] LIU B., KOVACHKI N., LI Z., AZIZZADENESHELI K. et al., *A learning-based multiscale method and its application to inelastic impact problems*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 158, 2022, 104668.
- [23] JULIEN R., JANKOWIAK T., RUSINEK A., WOOD P., *Taylor's Test Technique for Dynamic Characterization of Materials: Application to Brass*, Experimental Techniques, 40, 2016, 347–355.
- [24] HOUSE J.W., *Taylor Impact Testing*, University of Kentucky, 1989.
- [25] SARVA S., MULLIKEN A.D., BOYCE M.C., *Mechanics of Taylor impact testing of polycarbonate*, International Journal of Solids and Structures, 44, 2007, 2381–2400.
- [26] WANG B., ZHANG J., LU G., *Taylor impact test for ductile porous materials —Part 2: experiments*, International Journal of Impact Engineering, 28, 2003, 499–511.
- [27] OTHMAN R. (ed.), *The Kolsky–Hopkinson Bar Machine*, Springer International Publishing, Cham 2018.
- [28] YANG R., ZHANG J.G., LIANG H.Z., SHAO F., et al., *Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Test and Different Modeling Methods of Aluminum Honeycomb Materials*, Strength of Materials, 54, 2022, 33–40.
- [29] CHEN W.W., SONG B., *Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications*, Springer, New York, NY Heidelberg 2011.
- [30] GARY G., MOHR D., *Modified Kolsky Formulas for an Increased Measurement Duration of SHPB Systems*, Experimental Mechanics, 53, 4, 2013, 713–717.
- [31] PANOWICZ R., JANISZEWSKI J., KOCHANOWSKI K., *Effects of Sample Geometry Imperfections on the Results of Split Hopkinson Pressure Bar Experiments*, Experimental Techniques, 43, 2019, 397–403.

- [32] WANG J., LI W., XU L., DU Z. et al., *Experimental study on pulse shaping techniques of large diameter SHPB apparatus for concrete*, Latin American Journal of Solids and Structures, 18,1, 2021, e343.
- [33] PUSHKOV V.A., MIKHAILOV A.L., TSIBIKOV A.N., OKINCHITS A.A. et al., *Studying the Characteristics of Explosives under Dynamic Load Using the Split Hopkinson Pressure Bar Technique*, Combustion Explosion Shock Waves, 57, 1, 2021, 112–121.
- [34] AMERI A.A.H., BROWN A.D., *Studying the Characteristics of Explosives under Dynamic Load Using the Split Hopkinson Pressure Bar Technique*, Combustion Behavior Materials 2019, 5, 39–50.
- [35] SASSO M., FARDMOSHIRI M., MANCINI E., ROSSI M. et al., *High speed imaging for material parameters calibration at high strain rate*, European Physical Journal Special Topics, 225, 2016, 295–309.
- [36] NIE H., SUO T., WU B., LI Y. et al., *A versatile split Hopkinson pressure bar using electromagnetic loading*, International Journal of Impact Engineering, 116, 2018, 94–104.
- [37] SILVA C.M.A., ROSA P.A.R., MARTINS P.A.F., *An innovative electromagnetic compressive split Hopkinson bar*, International Journal of Mechanics and Materials in Design, 5, 3, 2009, 281–288.
- [38] CAI S., WU D., ZHOU J., ZHANG C. et al., *Improvement and application of miniature Hopkinson bar device based on series-parallel coil array electromagnetic launch*, Measurement, 186, 2021, 110203.
- [39] JIN K., QI L., KANG H., GUO Y. et al., *A novel technique to measure the biaxial properties of materials at high strain rates by electromagnetic Hopkinson bar system*, International Journal of Impact Engineering, 167, 2022, 104286.
- [40] XIE H., ZHU J., ZHOU T., ZHAO J., *Novel Three-dimensional Rock Dynamic Tests Using the True Triaxial Electromagnetic Hopkinson Bar System*, Rock Mechanics and Rock Engineering, 54, 2021, 2079–2086.
- [41] GORHAM D.A., *Specimen inertia in high strain-rate compression*, Journal of Physics D Applied Physics, 22, 12, 1989, 1888–1893.
- [42] HOCKLY M., SIVIOUR C.R., *Specimen Inertia in high strain rate tensile testing*, The European Physical Journal Conferences, 94, 2015, 01050.
- [43] SAMANTA S.K., *Dynamic deformation of aluminium and copper at elevated temperatures*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 19, 3, 1971, 117–135.
- [44] POTTER R.S., CAMMACK J.M., BRAITHWAITE C.H., CHURCH P.D. et al., *Problems Associated with Making Mechanical Measurements on Water–Ice at Quasistatic and Dynamic Strain Rates*, Journal of Dynamic Behavior of Materials, 5, 2019, 198–211.
- [45] ZUANETTI B., RAMOS K.J., CADY C.M., MEREDITH C.S. et al., *Miniature Beryllium Split-Hopkinson Pressure Bars for Extending the Range of Achievable Strain-Rates*, Metals, 12, 2022, 1834..
- [46] BASALIN A., KONSTANTINOV A., IGUMNOV L., BELOV A. et al., *The direct impact method for studying dynamic behavior of viscoplastic materials*, Journal of Applied Computational Mechanics, 8, 2, 2022.
- [47] JAKKULA P., GANZENMÜLLER G.C., BEISEL S., RÜTHNICK P. et al., *The Symmpact: A Direct-Impact Hopkinson Bar Setup Suitable for Investigating Dynamic Equilibrium in Low-Impedance Materials*, Experimental Mechanics, 62, 2022, 213–222.
- [48] FÍLA T., KOUDELKA P., FALTA J., ZLÁMAL P. et al., *Dynamic impact testing of cellular solids and lattice structures: Application of two-sided direct impact Hopkinson bar*, International Journal of Impact Engineering, 148, 2021,103767.
- [49] KIM D., SHIN H., *Minimum Required Distance of Strain Gauge from Specimen for Measuring Transmitted Signal in Split Hopkinson Pressure Bar Test*, MATEC Web Conf., 308, 2020, 04005.
- [50] TYAS A., WATSON A.J., *Experimental evidence of Pochhammer-Chree strain variations in elastic cylinders*, Experimental Mechanics, 40, 2000, 331–337.

- [51] PANOWICZ R., TRYPOLIN M., *Kształtowanie impulsu wymuszającego w zmodyfikowanej metodzie dzielonego pręta Hopkinsona*, XV Konferencja Naukowo-Techniczna Techniki Komputerowe w Inżynierii, Mikołajki 2018.
- [52] PANOWICZ R., KONARZEWSKI M., *Influence of Imperfect Position of a Striker and Input Bar on Wave Propagation in a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Setup with a Pulse-Shape Technique*, Applied Science, 10, 2020, 2423.
- [53] ZHU X., ZHANG X., YAO W., LI W., *Split-Hopkinson Pressure Bar Test of Silicone Rubber: Considering Effects of Strain Rate and Temperature*, Polymers 2022, 14, 3892.
- [54] FAHEM A.F., KIDANE A., *Hybrid Computational and Experimental Approach to Identify the Dynamic Initiation Fracture Toughness at High Loading Rate*, [in:] J. Kimberley, L. Lamberson, S. Mates (eds.), *Dynamic Behavior of Materials*, Volume 1, Springer International Publishing, Cham 2018, pp. 141–146.
- [55] XU Y., ZHOU J., FARBANIEC L., PELLEGRINO A., *Optimal Design, Development and Experimental Analysis of a Tension–Torsion Hopkinson Bar for the Understanding of Complex Impact Loading Scenarios*, Experimental Mechanics, 63, 2023, 773–789.
- [56] ELLWOOD S., GRIFFITHS L.J., PARRY D.J., *A Tensile Technique for Materials Testing at High Strain Rates*, Journal of Physics [E] Scientific Instruments, 15, 1982, 1169–1172.
- [57] LEWIS J.L., GOLDSMITH W., *A Biaxial Split Hopkinson Bar for Simultaneous Torsion and Compression*, Review of Scientific Instruments, 44, 1973, 811–813.
- [58] LIU C., WANG W., SUO T., Tang Z. et al., *Achieving Combined Tension-Torsion Split Hopkinson Bar test based on electromagnetic loading*, International Journal of Impact Engineering, 168, 2022, 104287.
- [59] PIERRON F., SUTTON M.A., TIWARI V., *Ultra high speed DIC on a three point bending test mounted on a Hopkinson bar*, [in:] T. Proulx (ed.), *Application of Imaging Techniques to Mechanics of Materials and Structures*, Springer, New York, vol. 4, 2013, 451–460.
- [60] HENSCHEL S., KRÜGER L., *Crack initiation at high loading rates applying the four-point bending split Hopkinson pressure bar technique*, EPJ Web Conf., 94, 2015, 01028.
- [61] LOYA J.A., RUBIO L., FERNÁNDEZ-SÁEZ J., *Numerical simulation of dynamic four-bending-tests using a modified Split Hopkinson Pressure Bar*, [in:] DYMAT 2009 — 9th International Conferences on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, EDP Sciences, Brussels, Belgium 2009, 1831–1837.
- [62] ZHANG Q.B., ZHAO J., *A Review of Dynamic Experimental Techniques and Mechanical Behaviour of Rock Materials*, Rock Mechanics and Rock Engineering, 47, 2014, 1411–1478.
- [63] DENG Y.J., CHEN H., CHEN X.W., YAO Y., *Dynamic failure behaviour analysis of TiB₂-B₄C ceramic composites by split Hopkinson pressure bar testing*, Ceramics International, 47, 2021, 22096–22107.
- [64] LI Q.M., MENG H., *About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test*, International Journal of Solids and Structures, 40, 2003, 343–360.
- [65] KHOSRAVANI M.R., WEINBERG K., *A review on split Hopkinson bar experiments on the dynamic characterisation of concrete*, Construction and Building Materials, 190, 2018, 1264–1283.
- [66] GONG H., LUO Y., MENG F., DU H., *Failure behavior and strength deterioration model of high-performance concrete under coupled elevated temperature, biaxial constraint and impact loading*, Journal of Building Engineering, 75, 2023, 107002.
- [67] FELTEN M., FRIES M., FÍLA T., ZLÁMAL P. et al., *High Strain-Rate Compression Experiments on Ni/Polyurethane Hybrid Metal Foams Using the Split-Hopkinson Pressure Bar Technique*, Advanced Engineering Materials, 24, 2022, 2100872.

- [68] Tran D.T., Tsai L., *Effect of strain rates on mechanical response of whole muscle bundle*, J. Biol. Phys., 49, 2, 2023, 257-267.
- [69] PILCHER A., WANG X., KALTZ Z., GARRISON J.G. et al., *High Strain Rate Testing of Bovine Trabecular Bone*, Journal of Biomechanical Engineering 2010, 132, 081012.
- [70] SAHA S., BAL S., *Detailed study of dynamic mechanical analysis for nanocomposites*, Emerging Materials Research, 8, 2019, 408-417.
- [71] TARFAOUI M., *Dynamic Composite Materials Characterisation with Hopkinson Bars: Design and Development of New Dynamic Compression Systems*, Journal of Composites Science, 7, 1, 2023, 33.
- [72] ZHOU J., PELLEGRINO A., HEISSERER U., DUKE P.W. et al., *A new technique for tensile testing of engineering materials and composites at high strain rates*, Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci., 475, 2019, 20190310.
- [73] WARNES R.H., KARPP R.R., FOLLANSBEE P.S., *The Freely Expanding Ring Test — A Test to Determine Material Strength at High Strain Rates*, J. Eng. Mater. Technol., 108, 1986, 335-339.
- [74] SEDLACEK R., HALDEN F.A., *Method for Tensile Testing of Brittle Materials*, Review of Scientific Instruments, 33, 298-300.
- [75] HOGGATT C.R., RECHT R.F., *Stress-strain data obtained at high rates using an expanding ring: Investigation indicates that dynamic symmetrical free expansion of thin rings offers a valid means for obtaining uniaxial tensile stress-strain relationships at high strain rates*, Experimental Mechanics, 9, 1969, 441-448.
- [76] IMBERT J., WORSWICK M., *Development of an Interrupted Pulse Expanding Ring Test*, 7th International Conference on High Speed Forming 2016.
- [77] ZHANG J., ZHENG Y., ZHOU F., LIU J., *Experimental Technique for Dynamic Fragmentation of Liquid-Driving Expanding Ring*, EPJ Web of Conferences, 183, 2018, 02034.
- [78] WŁODARCZYK E., JANISZEWSKI J., *Dynamiczne stany naprężenia i skończonego odkształcenia w metalowym cienkim pierścieniu rozszerzanym wybuchowo*, Biuletyn WAT, 56, 1, 2007.
- [79] ZHANG H., RAVI-CHANDAR K., *On the dynamics of necking and fragmentation — II. Effect of material properties, geometrical constraints and absolute size*, International Journal of Fracture, 150, 2008, 3-36.
- [80] ZHANG H., RAVI-CHANDAR K., *On the dynamics of necking and fragmentation — I. Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O*, International Journal of Fracture, 142, 2007, 183-217.
- [81] ZHANG H., RAVI-CHANDAR K., *On the dynamics of localization and fragmentation-IV. Expansion of Al 6061-O tubes*, International Journal of Fracture, 163, 2010, 1-65.
- [82] ZHANG H., LIECHTI K.M., RAVI-CHANDAR K., *On the dynamics of localization and fragmentation —III. Effect of cladding with a polymer*, International Journal of Fracture, 155, 2009, 101-118.
- [83] MORALES S.A., ALBRECHT A.B., ZHANG H., LIECHTI K.M. et al., *On the dynamics of localization and fragmentation: V. Response of polymer coated Al 6061-O tubes*, International Journal of Fracture, 172, 2011, 161-185.
- [84] YANG K., TABER G., SAPANATHAN T., VIVEK A. et al., *Suitability of the electromagnetic ring expansion test to characterize materials under high strain rate deformation*, MATEC Web Conf., 80, 2016, 15002.
- [85] GRADY D.E., BENSON D.A., *Fragmentation of metal rings by electromagnetic loading: Fragmentation studies on rapidly expanding metal rings are performed with electromagnetic loading. Dynamic-fracture strain and fragment-size measurements are reported for aluminum and copper*, Experimental Mechanics, 23, 1983, 393-400.

- [86] PANOWICZ R., JANISZEWSKI J., *Próba wyznaczenia wartości stałych równania Johnsona–Cooka na podstawie testu pierścieniowego*, Biuletyn WAT, 57, 3, 2008.
- [87] JANISZEWSKI J., PICHOLA W., MACIASZEK K., *Elektromagnetyczny test pierścieniowy w warunkach próżni*, Biuletyn WAT, 60, 2, 2011.
- [88] JOYCE P.J., BROWN L.P., LANDEN D., SATAPATHY S., *Measurement of High-Strain-Rate Strength of a Metal-Matrix Composite Conductor*, [in:] T. Proulx (ed.), *Dynamic Behavior of Materials*, Volume 1, Springer New York, New York, NY 2011, pp. 269–276.
- [89] LI F., MO J., LI J., HUANG L. et al., *Effects of Deformation Rate on Ductility of Ti-6Al-4V Material*, *Procedia Engineering*, 81, 2014, 754–759.
- [90] JIANG F., SUN Q.Q., LAI Z.P., LUO B. et al., *Electromagnetically Driven Expanding Ring Test for the Strength Study of the Zylon/Epoxy Composite*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26, 2016, 1–6.
- [91] GOURDIN W.H., *Analysis and assessment of electromagnetic ring expansion as a high-strain-rate test*, *Journal of Applied Physics*, 65, 1989, 411–422.
- [92] GOURDIN W.H., WEINLAND S.L., BOLING R.M., *Development of the electromagnetically launched expanding ring as a high-strain-rate test technique*, *Review of Scientific Instruments*, 60, 1989, 427–432.
- [93] JANISZEWSKI J., *Ductility of selected metals under electromagnetic ring test loading conditions*, *International Journal of Solids and Structures*, 49, 2012, 1001–1008.

A. JESCHKE, R. PANOWICZ

An overview of methods used in dynamic testing of materials

Abstract. The paper presents an elemental description and methodology of tests that take into account the effect of high strain rate on materials strength parameters. The article describes such testing methodology as: Taylor test, split Hopkinson pressure bar method, and expanding ring test to determine the dynamic properties of materials.

Keywords: Taylor test, expanding ring test, split Hopkinson pressure bar, dynamic behaviour of materials

DOI: 10.5604/01.3001.0054.2892

