

Pracownia badań właściwości mechanicznych materiałów w warunkach dynamicznego obciążenia

Laboratory for mechanical materials properties under high-strain-rate loading conditions

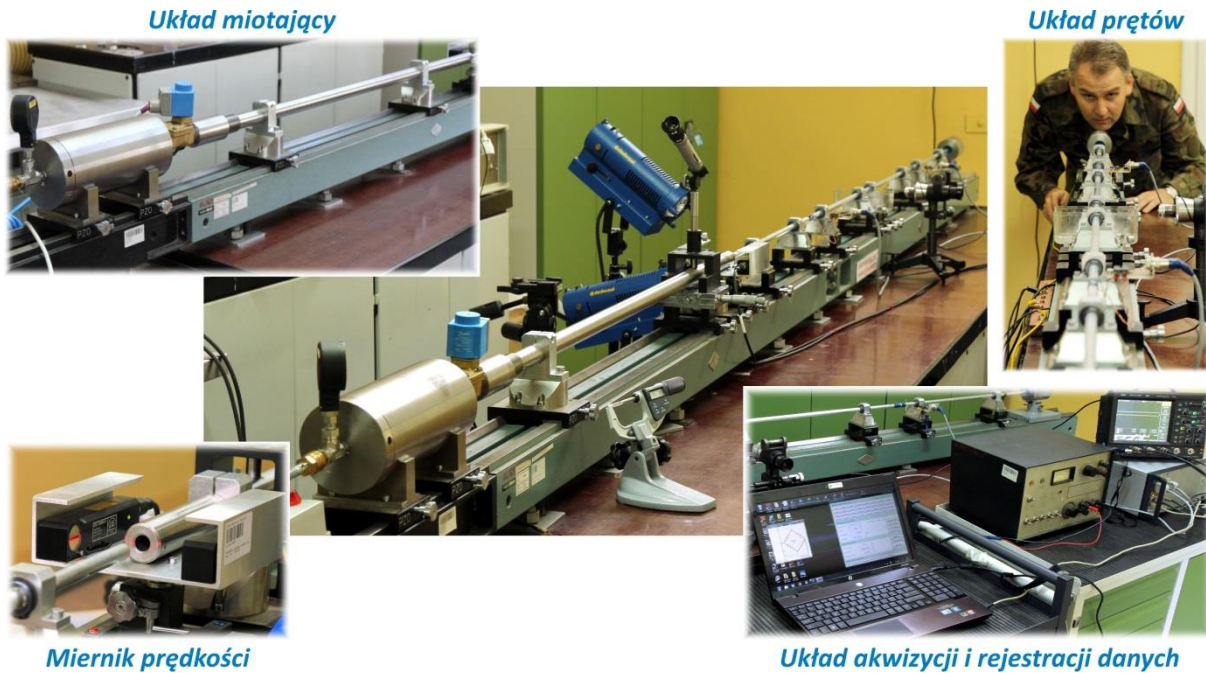
Instytut Techniki Uzbrojenia dysponuje aparaturą badawczą umożliwiającą badanie reakcji mechanicznej materiałów konstrukcyjnych w zakresie szybkości odkształcenia od 10^2 do 10^4 s⁻¹. Dynamiczne badania materiałów mogą być przeprowadzone za pomocą trzech technik eksperymentalnych, tj.: dzielonego pręta Hopkinsona na ściskanie, uderzeniowego testu Taylora oraz elektromagnetycznego testu pierścieniowego. Dzięki opracowanym procedurom badawczym za pomocą ww. technik możliwe jest m.in. wyznaczenie dynamicznych parametrów określających właściwości wytrzymałościowe materiałów oraz ich ciągliwość dynamiczna. Ponadto, opracowano metodyki wyznaczania wartości parametrów materiałowych równania konstytutywnego Johnsona-Cooka na podstawie danych doświadczalnych otrzymanych metodą dzielonego pręta Hopkinsona lub uderzeniowego testu Taylora.

Dzielony pręt Hopkinsona (*ang. split Hopkinson Pressure Bar*)

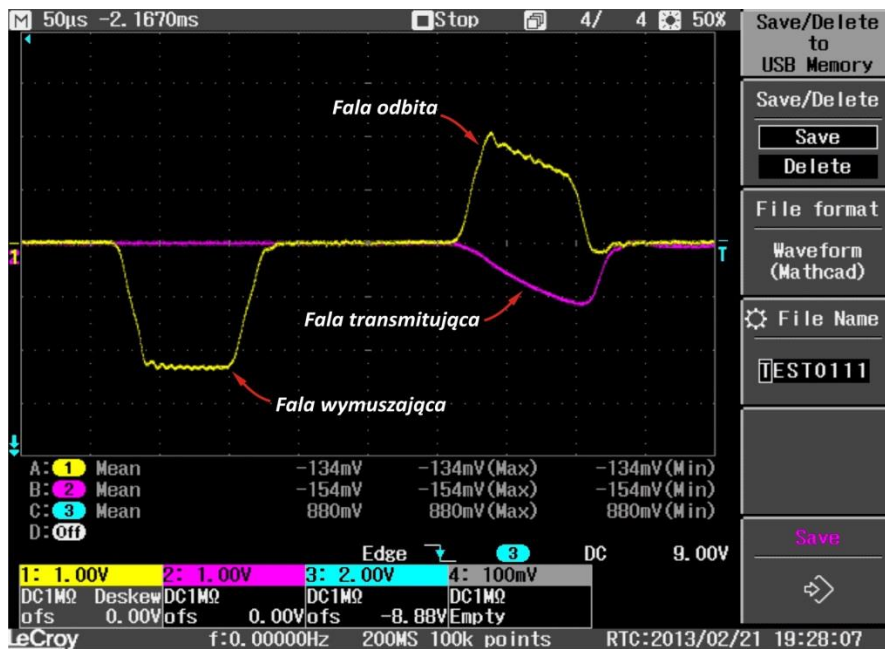
Stanowisko badawcze dzielonego pręta Hopkinsona zostało zbudowane dzięki środkom finansowym przeznaczonym na działalność badawczą statutową Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa w latach 2011 - 2012. Stanowisko to zapewnia badanie materiałów w warunkach jednoosiowego stanu naprężenia ściskającego. Układ badawczy składa się z dwóch zasadniczych podzespołów: mechanicznego i pomiarowego (rys. 1). Podzespół mechaniczny obejmuje układ dwóch prętów o długości 1200 mm i o średnicy 12,05 mm. Standardowo stosowane są pręty ze stali maraging MS 350 o twardości 54 HRC ($R_{0,2} = 2300$ MPa). W przypadku badań materiałów o niskiej wytrzymałości (np. gumy, tworzywa sztuczne itp.) stosowane są pręty wykonane ze stopu aluminium 7075-T6. Ponadto w skład podzespołu mechanicznego stanowiska wchodzi pneumatyczny układ motający zapewniający napędzanie pręta wymuszającego (stosowane długości prętów to 100, 150, 200 i 300 mm) w przedziale prędkości od 4 do 30 m/s.

Z kolei na układ akwizycji i rejestracji danych doświadczalnych składają się następujące urządzenia pomiarowe: wzmacniacz tensometryczny SGA0BV5, oscyloskop cyfrowy LeCroy WJ354A, mikromierz laserowy optoCONTROL ODC 1200/90 (miernik prędkości) oraz kamera szybka Phantom v12. Wzmacniacz tensometryczny i oscyloskop umożliwiają rejestrację profilu fal sprężystych propagujących się w prętach pod wpływem uderzeniowego obciążenia (rys. 2). Natomiast mikromierz laserowy służy do pomiaru prędkości uderzenia pręta wymuszającego. Kamerę szybką wykorzystuje się głównie do obserwacji przebiegu deformacji próbek materiałowych (film 1 i 2). Opracowanie wyników badań

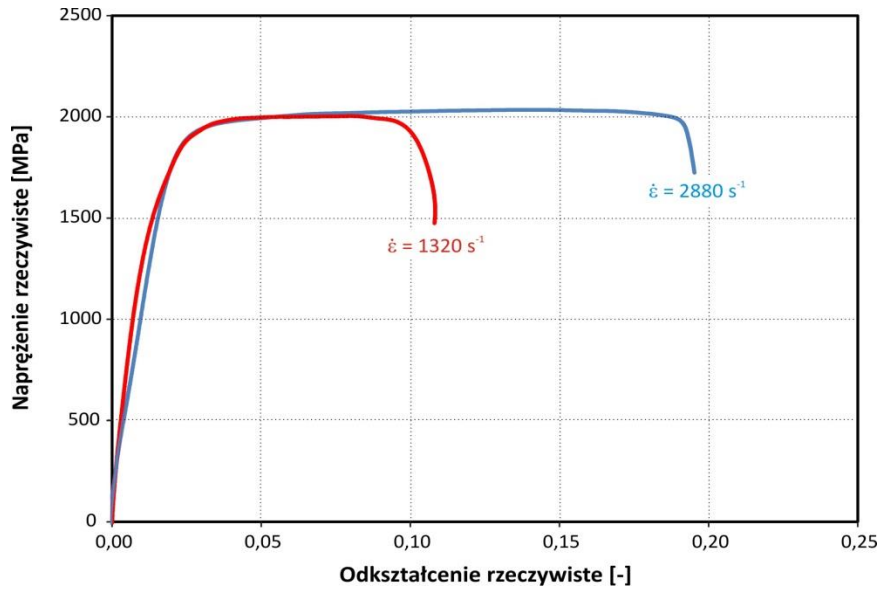
doświadczalnych i ich prezentacja w postaci dynamicznych krzywych umocnienia (rys. 3) jest wykonywana za pomocą procedury obliczeniowej opracowanej w środowisku Mathcad.



Rys. 1. Układ badawczy techniki dzielonego pręta Hopkinsona na ściskanie
 Fig. 1. Testing setup for the compression split Hopkinson pressure bar technique



Rys. 2. Przykładowe profile fal sprężystych zarejestrowane w prętach
 Fig. 2. Example elastic wave profiles recorded in the bars



Rys. 3. Przykładowe dynamiczne krzywe umocnienia dla stali panczernej
Fig. 3. Example dynamic stress-strain curves for amour steel

Film 1. Deformacja próbki ze stali niskowęglowej z szybkością odkształcenia około $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$

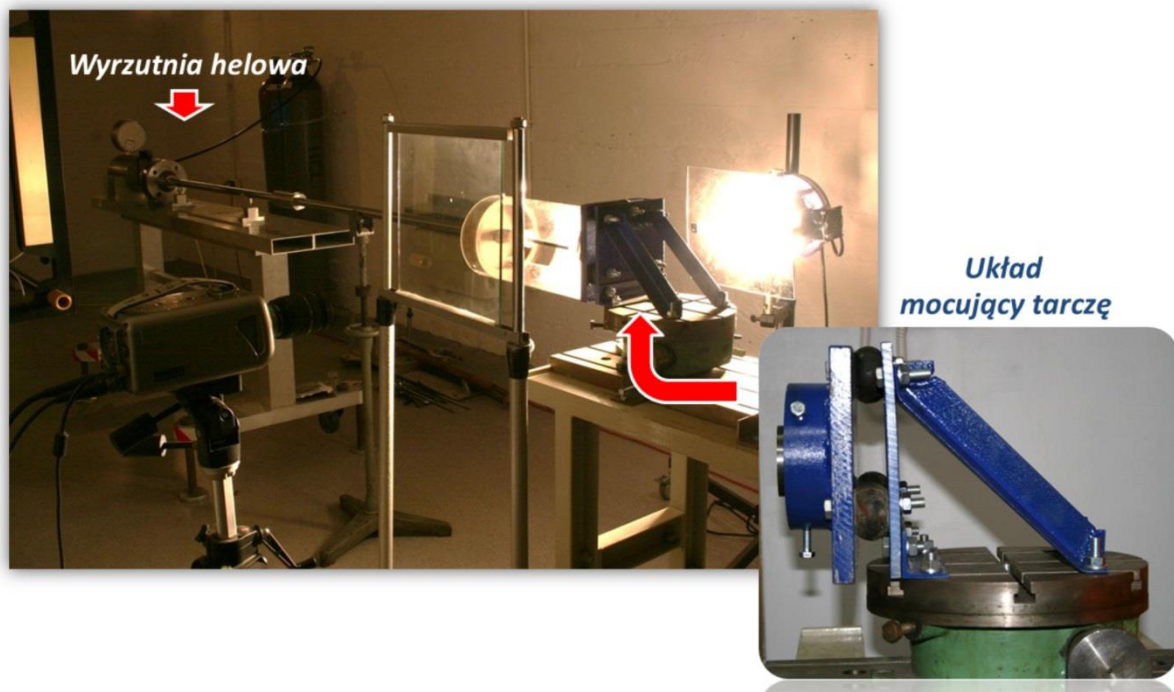
Video 1. Low-carbon steel sample deformation with strain rate of about $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$

Film 2. Przebieg deformacji i propagacji zniszczeń próbki ze spieku Cu-Sn w warunkach testu Brazylijskiego

Video 2. Deformation and damage propagation history of the Cu-Sn sinter sample under Brazilian test conditions

Uderzeniowy test Taylora (*ang. Taylor impact test*)

Test ten jest realizowany za pomocą układu badawczego opracowanego w ramach działalności statutowej Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa w latach 2009-2010 (rys. 4). Głównym elementem tej aparatury badawczej jest helowy układ miotający. Składa się on z lufy o długości 2400 mm i o kalibrze 12.1 mm, zespołu membrany, elektrozaworu oraz zbiornika ciśnieniowego. Wyrzutnia helowa umożliwia napędzanie próbek walcowych (rys. 5) o masie około 25 g do prędkości rzędu 450 m/s. Drugim podzespołem stanowiska do wykonywania testu Taylora jest układ mocujący tarczę, który jest montowany naprzeciwko wylotu lufy w odległości około 40 cm. Jako tarcze stosowane są krążki o średnicy 80 mm i grubości 35 mm wykonane ze stali maraging MS350 obrabianej cieplnie na twardość 53 HRC. Do rejestracji przebiegu deformacji próbek walcowych wykorzystywana jest kamera szybka Phantom v12 (Film 3 i 4).



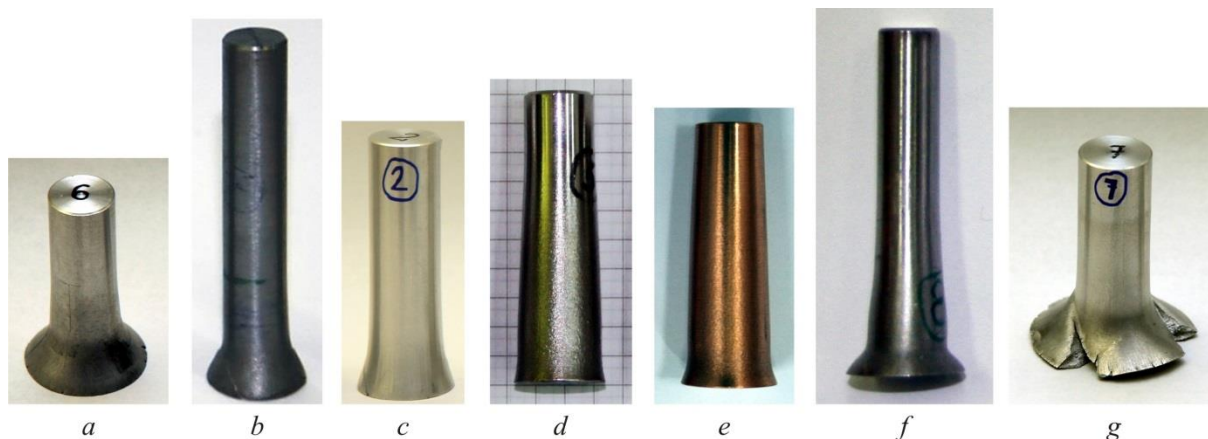
Rys. 4. Układ badawczy techniki uderzeniowego testu Taylora
Fig. 4. Testing setup for the Taylor impact test technique

Film 3. Przebieg deformacji próbki walcowej wykonanej ze stopu aluminium 6082 (prędkość zderzenia – 281 m/s)

Video 3. Deformation history of cylindrical specimen of the 6082 aluminum alloy (impact velocity – 281 m/s)

Film 4. Przebieg deformacji próbki walcowej wykonanej ze stali austenitycznej AISI 321 (prędkość zderzenia – 205 m/s)

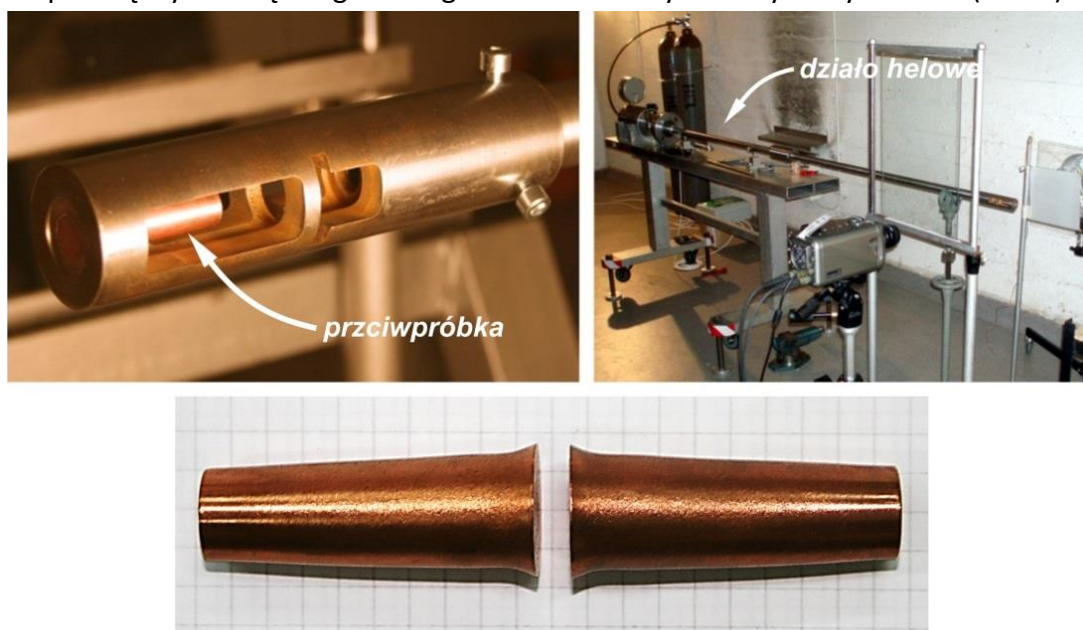
Video 4. Deformation history of cylindrical specimen of the AISI 321 austenitic steel (impact velocity – 205 m/s)



Rys. 5. Widok próbek cylindrycznych po uderzeniowych testach Taylora: a) stop Al 6082, b) spiek ciężki na bazie wolframu, c) stop Al 7075, d) stal AISI 321, e) miedź Cu-ETP, f) stal 12 HGMV, g) zniszczenia próbki ze stopu Al 6082

Fig. 5. View of cylindrical specimens after Taylor impact tests: a) Al 6082 alloy, b) sintered tungsten heavy alloy, c) Al 7075 alloy, d) AISI 321 steel, e) Cu-ETP copper, f) 12HGMV steel, g) damage of Al 6082 sample

Opracowano także zmodyfikowaną wersję stanowiska, która umożliwia realizację symetrycznego testu Taylora (rys. 6). Badanie to polega na zderzeniu próbki walcowej z przeciwpróbką wykonaną z tego samego materiału i o tych samych wymiarach (film 5).



Rys. 6. Układ badawczy symetrycznego testu Taylora oraz widok próbek miedzianych po deformacji dynamicznej

Fig. 6. Testing setup for the symmetrical Taylor test technique and view of copper samples after high-strain-rate deformation

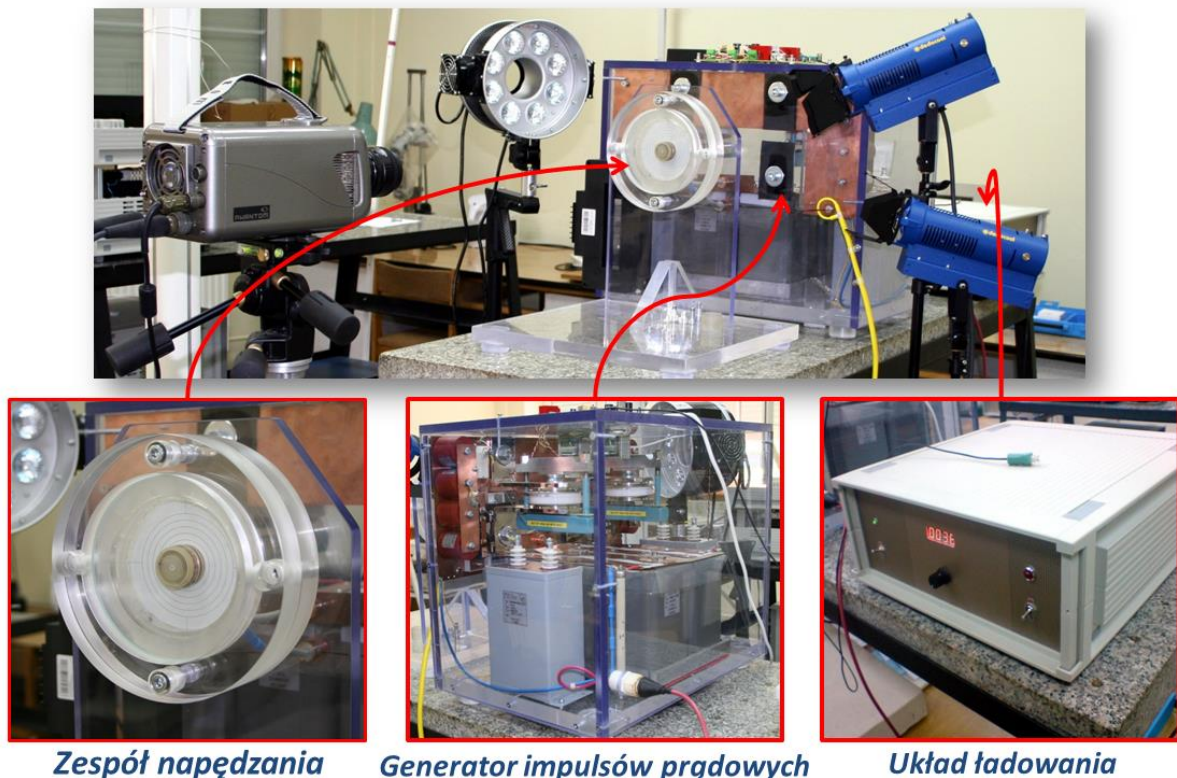
Film 5. Przebieg deformacji próbek miedzianych podczas symetrycznego testu Taylora (prędkość zderzenia – 220 m/s)

Video 5. Deformation history of copper specimens during symmetrical Taylor test (impact velocity – 220 m/s)

Elektromagnetyczny test pierścieniowy (*ang. electromagnetic expanding ring test*)

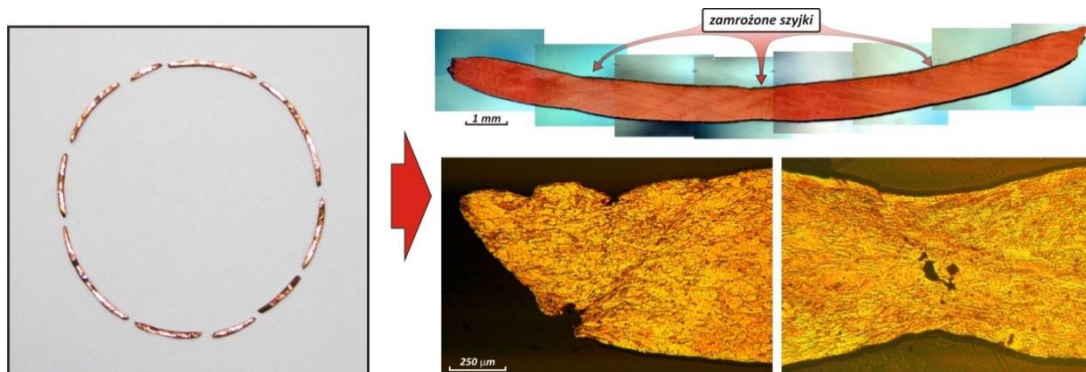
Konstrukcja stanowiska do elektromagnetycznej ekspansji pierścieni (rys. 7) bazuje na rozwiązaniu konstrukcyjnym prototypowej aparatury badawczej, która została opracowana w ramach projektu badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2006-2009. Technika testu pierścieniowego umożliwia badanie materiałów w warunkach jednoosiowego stanu naprężenia rozciągającego. Metoda ta jest zazwyczaj wykorzystywana do wyznaczania parametrów określających dynamiczną ciągliwość materiałów i ich podatność do fragmentacji (rys. 8).

Opracowaną aparaturę do ekspansji elektromagnetycznej można umownie podzielić na trzy główne zespoły: *zespół napędzania* – służący do nadania prędkości radialnej ściankom pierścienia, *zespół generatora impulsów prądowych* – zapewniający dostarczenie odpowiedniej energii do zespołu napędzającego, oraz *układ ładowania* – umożliwiający ładowanie baterii kondensatorów do wybranej wartości napięcia. Osiągane prędkości ekspansji promieniowej mieszczą się w zakresie od kilkudziesięciu do kilkaset metrów na sekundę (np. dla pierścieni miedzianych osiągnięto maksymalną prędkość ekspansji wynoszącą 320 m/s, co odpowiada szybkości odkształcenia rzędu 10^4 s^{-1}). Przebieg procesu ekspansji oraz pomiar prędkości radialnej próbki pierścieniowej dokonywany jest za pomocą kamery szybkiej Phantom v12 (film 6 i 7).



Rys. 7. Układ badawczy elektromagnetycznego testu pierścieniowego

Fig. 7. Testing setup for the electromagnetic ring test



Rys. 8. Widok elementów sfragmentowanej próbki pierścieniowej oraz obrazy mikroskopowe wybranego fragmentu pierścienia i struktury krystalicznej w obszarach przewężeń

Fig. 8. View of ring sample fragments and microscope images of selected ring fragment and microstructure in the neck regions

Film 6. Ekspansja elektromagnetyczna pierścienia miedzianego (prędkość ekspansji – 168 m/s)

Video 6. Electromagnetic expansion of the copper ring (expansion velocity – 168 m/s)

Film 7. Ekspansja elektromagnetyczna pierścienia miedzianego i przebieg procesu

wyhamowywania fragmentów pierścienia w żelu parafinowym (prędkość ekspansji – 221 m/s)

Video 7. Electromagnetic expansion of the copper ring and history of capture process of ring fragments into wax gel ring (expansion velocity – 221 m/s)

Szczegółowe informacje na temat ww. technik badawczych można znaleźć w monografii pt. „Badania materiałów inżynierskich w warunkach obciążenia dynamicznego”, której wydanie zostało sfinansowane przez Wydział Mechatroniki i Lotnictwa WAT.

