

**Wojciech Moćko**

Instytut Transportu Samochodowego

**Zbigniew L. Kowalewski**

Instytut Transportu Samochodowego

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

**OPRACOWANIE I WERYFIKACJA MODELU MES  
ZMINIATURYZOWANEGO STANOWISKA DO BADAŃ  
METODĄ BEZPOŚREDNIEGO UDERZENIA POCISKU W PRÓBKĘ**

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych polikrystalicznego tantalu przy bardzo dużej prędkości odkształcania ( $7,5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ). Pomiary zostały przeprowadzone z wykorzystaniem stanowiska do badań metodą bezpośredniego uderzenia w próbkę, które było wyposażone w pręt transmitujący o średnicy 3 mm. Badane próbki miały kształt walcowy o średnicy 1,5 mm i długości 0,55 mm. W celu prześledzenia zjawisk zachodzących w trakcie procesu deformacji próbki i oceny ich wpływu na końcowy wynik pomiaru opracowano w środowisku ABAQUS model numeryczny stanowiska. Wymiary stanowiska, jak i parametry testu zastosowane w obliczeniach, były takie, jak dla badań z wykorzystaniem DICT (ang. Direct Impact Compression Test – metoda bezpośredniego uderzenia w próbkę). Wyniki symulacji komputerowej wykazały bardzo dużą zgodność z wynikami eksperymentalnymi, co pozwala stwierdzić, że metoda elementów skończonych dobrze odwzorowuje zachowanie stanowiska i może być wykorzystana w analizach przyczyn powstawania błędów pomiaru naprężenia plastycznego płynięcia.

**DEVELOPING AND VALIDATION OF FEM MODEL  
OF MINIATURIZED DIRECT IMPACT COMPRESSION TESTING STAND**

The paper presents the results of tests on polycrystalline tantalum at very high strain rates ( $7.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ). The measurements were carried out using miniaturized Direct Impact Compression Test (DICT) method. The transmitting bar diameter was 3mm, and the tested specimens were cylindrical shape of 1.5 mm diameter and 0.55 mm thickness. A numerical model of the testing stand was developed in the ABAQUS environment to trace the phenomena occurring during specimen deformation and to evaluate their influence on the final result. The test stand dimensions and the test parameters used in the calculations were this same as for DICT experiments. The results of computer simulations demonstrated good agreement with experimental results, which proves that the Finite Element Method (FEM) reproduces well the behavior of the stand and can be applied in analyses performed to find the reasons of errors in plastic stress flow measurements.

## 1. Wprowadzenie

Zastosowanie zminiaturyzowanej metody bezpośredniego uderzenia w próbkę pozwala na badanie właściwości mechanicznych materiałów w zakresie prędkości od  $10^4 \text{ s}^{-1}$  do  $1,5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ , a więc znacznie powyżej prędkości odkształcania osiągalnej w metodzie zmodyfikowanego pręta Hopkinsona (ang. SHPB - Split Hopkinson Pressure Bars). Umożliwia to stworzenie modelu zachowania materiałów w zakresie bardzo dużej wartości prędkości deformacji, który może być wykorzystywany w procesie projektowania i badania elementów oraz konstrukcji zabezpieczających przed zderzeniem, pancerzy, kamizelek kuloodpornych, kasków itp.

Celem niniejszych badań było stworzenie modelu numerycznego zminiaturyzowanego stanowiska DICT, który umożliwi prześledzenie zjawisk zachodzących w trakcie badania próbek i walidację uzyskanych rezultatów. W trakcie deformacji przy bardzo dużej prędkości odkształcenia zachodzi bowiem szereg niekorzystnych zjawisk wpływających na otrzymane rezultaty m.in.: tarcie, bezwładność, adiabatyczne nagrzewanie, wzbudzenie fal sprężystych. Aby sprawdzić zgodność opracowanego modelu z wynikami eksperymentalnymi przeprowadzono próbę dynamicznego ściskania próbki wykonanej z polikrystalicznego tantal, a otrzymane wyniki porównano z danymi obliczonymi w środowisku ABAQUS.

## 2. Metoda bezpośredniego uderzenia w próbkę

Koncepcja usunięcia pręta inicjującego z klasycznego stanowiska SHPB [1] została zaprezentowana po raz pierwszy w roku 1970 [2] i dała podstawę do opracowania metody bezpośredniego uderzenia pocisku w próbkę (DICT). Podstawową zaletą takiego rozwiązania w stosunku do SHPB, jest znaczne zwiększenie osiągalnej prędkości odkształcenia próbki, określanej w przybliżeniu jako  $V_0/l_{s0}$ , która w połączeniu z miniaturyzacją stanowiska może dochodzić do  $1,5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ , przy prędkości pocisku  $V_0$  wynoszącej 150 m/s i długości początkowej próbki  $l_{s0}$  równej 1 mm. Zmniejszenie długości próbki wymaga także zmniejszenia jej średnicy tak, aby zapewnić wartość współczynnika kształtu próbki  $s=l_{s0}/d_{s0}$  na poziomie 0,5, co jest niezbędne dla zminimalizowania efektów tarcia i bezwładności [3,4,5]. Redukcja wymiarów próbki pociąga za sobą konieczność redukcji wymiarów całego stanowiska, co daje szereg korzyści w postaci: skrócenia czasu osiągania jednorodności naprężeń w próbce, zmniejszenia gradientów odkształcenia spowodowanych falami plastycznymi wzdłuż kierunku ściskania, zmniejszenia efektów bezwładności wzdłużnej i poprzecznej oraz redukcji dyspersji sprężystej fali wzdłużnej.

Najtrudniejszym zadaniem w trakcie prowadzenia badań z wykorzystaniem zminiaturyzowanej metody bezpośredniego uderzenia w próbkę jest precyzyjne określenie przebiegu odkształcenia próbki w czasie. W tym celu w pierwszych eksperymentach założono, że pocisk jest idealnie sztywny [2], mierzono prędkość tylnej powierzchni pocisku [15], stosowano szybkie kamery [12], bądź też założono równomierność naprężenia w próbce w trakcie deformacji [12-14]. Problem pomiaru wynika z faktu, iż po pierwsze w metodzie bezpośredniego uderzenia brak jest pręta inicjującego, a co za tym idzie brak możliwości pomiaru fali inicjującej i odbitej, po drugie cały proces odkształcania trwa kilka mikrosekund, z czego wynika minimalne pasmo przenoszenia układu pomiarowego rzędu 10MHz, a rozdzielczość pomiaru przemieszczenia powinna

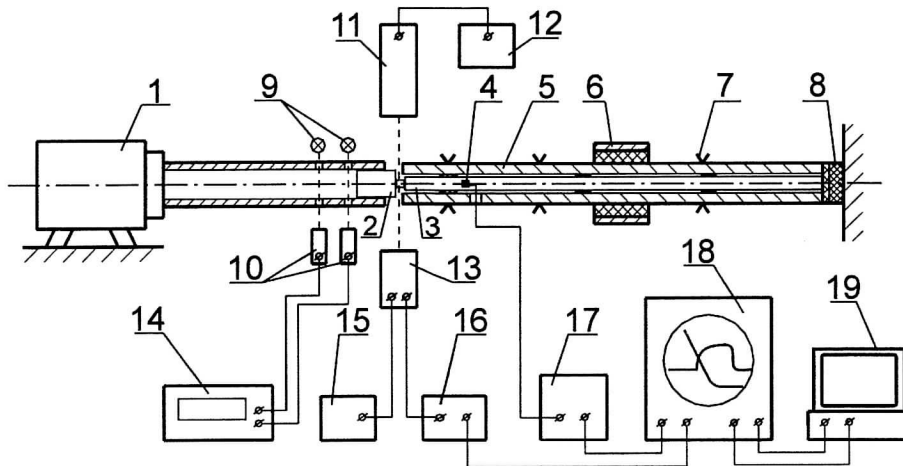
wynosić co najmniej  $10\mu\text{m}$ , w celu zapewnienia dokładności pomiaru odkształcenia na poziomie  $\varepsilon = 0,01$ . Obecnie do pomiaru odkształcenia stosuje się kilka rozwiązań opartych na metodach optycznych. Pierwszym z nich jest metoda LORD [6] (ang. Laser Occlusive Radius Detector), która polega na określeniu odkształcenia na podstawie chwilowej średnicy próbki. Spójna, równoległa wiązka światła laserowego o płaskim kształcie i niewielkiej szerokości oświetla detektor liniowy. Część wiązki jest przesłaniana przez badaną próbkę, która w trakcie odkształcenia zwiększa swoją średnicę, a w wyniku tego ogranicza ilość światła rejestrowanego przez detektor. Na podstawie zmierzonej ilości światła, zakładając stałą objętość próbki, można określić przebieg odkształcenia w czasie.

Kolejną metodą pomiaru odkształcenia w technice DICT jest zastosowanie dwukanałowego ekstensometru optycznego [7,8], który potrafi wykryć przemieszczenie granicy pomiędzy czarnym a białym polem. Aby uzyskać pola pomiarowe pocisk oraz koniec pręta transmitującego są pomalowane na czarno, natomiast próbka jest pomalowana na biało. Pierwszy kanał ekstensometru dokonuje pomiaru przemieszczenia kontaktu pocisk-próbka, natomiast drugi kanał dokonuje pomiaru przemieszczenia kontaktu próbka-pręt podpierający. Ograniczeniem możliwości zastosowania tej metody są rozmiary próbki, której średnica musi być większa od 3mm, co wynika z konstrukcji układu optycznego urządzenia.

W pomiarach odkształcenia zminiaturyzowanych próbek o długości rzędu 0,5mm można zastosować także metodę wykorzystującą zasadę śledzenia cienia, podobną do LORD, jednak zamiast średnicy próbki mierzona jest odległość pomiędzy pociskiem a tuleją hamownika [9]. Spójna wiązka świetlna jest w trakcie odkształcania próbki stopniowo przesłaniana z jednej strony przez przemieszczający się pocisk, a z drugiej strony przez stałą tuleję oporową. Zmierzone przez przetwornik optyczny natężenie oświetlenia jest proporcjonalne do przesunięcia pocisku względem tulei.

W literaturze można spotkać opis zminiaturyzowanych stanowisk o średnicy pręta mniejszej od 5mm, zastosowanych do badań właściwości dynamicznych aluminium i jego stopów, miedzi, żelaza, a także wolframu zarówno w konfiguracji zmodyfikowanego pręta Hopkinsona [10,11] jak i bezpośredniego uderzenia w próbkę [12,13,14]. Największa prędkość odkształcania ( $2,5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ ) została osiągnięta przez Kamlera [14], przy wykorzystaniu stanowiska wyposażonego w pręt o średnicy 1,5mm, do badania właściwości próbek miedzianych o długości 0,3 mm i średnicy 0,7mm.

Przedstawione w niniejszej pracy eksperymenty zostały przeprowadzone z wykorzystaniem kolejnej wersji rozwojowej stanowiska DICT [9], w którym zmniejszono średnicę pręta pomiarowego do 3mm [16]. Przedmiotem badań był polikrystaliczny tantal, którego właściwości mechaniczne są stosunkowo dobrze poznane w zakresie obciążeń statycznych i dynamicznych do ok.  $10^4 \text{ s}^{-1}$  [17, 18]. W przypadku deformacji przy bardzo dużej prędkości (pow.  $10^4 \text{ s}^{-1}$ ) dostępne są jedynie dane otrzymane z wykorzystaniem metody płyta-płyta przy prędkości odkształcania ok.  $10^6 \text{ s}^{-1}$ , opublikowane przez Dupfrey'a i Cliftona [20], brak jest natomiast wyników z zakresu prędkości od  $10^4 \text{ s}^{-1}$  do  $10^5 \text{ s}^{-1}$ , możliwych do uzyskania za pomocą metody pręta Hopkinsona.



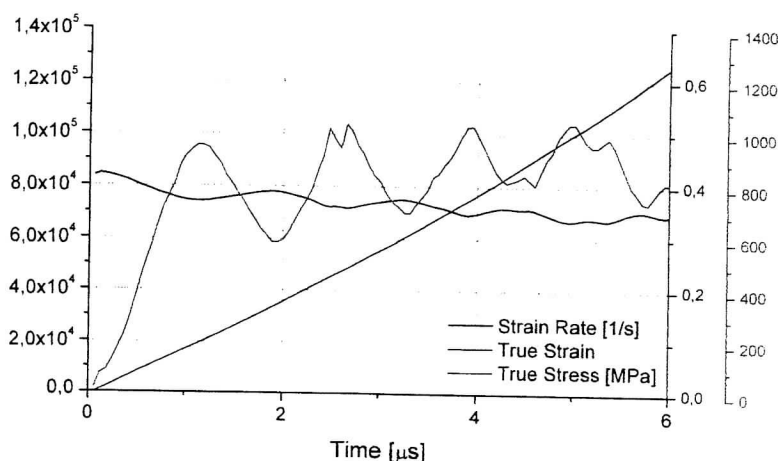
Rys. 1. Schemat stanowiska DICT; 1 – wyrzutnia pneumatyczna, 2 – pocisk, 3 – pręt sprężysty, podpierający próbkę, 4 – tensometr elektrooporowy, 5 – tuleja oporowa, 6 – hamownik obwodowy, 7 – podpora, 8 – hamownik podpierający, 9 – diody laserowe nadawcze, 10 – fotodiody, 11 – laser kompaktowy z układem optycznym, 12 – zasilacz stabilizowany lasera, 13 – fotodioda odbiorcza z układem optycznym, 14 – czasomierz, 15 – zasilacz fotodiody odbiorczej, 16 – wzmacniacz sygnału z fotodiody, 17 – wzmacniacz sygnału z tensometrów, 18 – oscyloskop z pamięcią numeryczną, 19 – komputer PC

Fig. 1. Diagram of the DICT stand, 1 – pneumatic launcher 2 – projectile, 3 – elastic rod supporting sample, 4 – electro-resistance tensiometer, 5 – resistance sleeve, 6 – circuit brake, 7 – support, 8 – assisting brake, 9 – transmitting laser diodes, 10 – photodiodes, 11 – compact laser with the optical system, 12 – laser stabilised power unit, 13 – receiving photodiode with the optical system, 14 – timer, 15 – receiving photodiode power unit, 16 – photodiode signal amplifier, 17 – tensimeters signal amplifier, 18 – oscilloscope with a numerical memory, 19 – PC type computer

Schemat stanowiska umożliwiającego badania właściwości mechanicznych materiałów przy bardzo dużej prędkości odkształcania przedstawiono na rys. 1. Głównym elementem układu jest pręt podpierający o średnicy 3 mm i długości 248 mm, wykonany ze stali typu maraging o wytrzymałości 1900 MPa. Aby zapobiec wyboczeniu pręta, co 40 mm rozmieszczone są teflonowe łożyska podpierające pręt. Na końcu pręta umieszczony jest tłumik, który pochłania falę mechaniczną propagującą się wzdłuż pręta. Na powierzchni pręta w odległości 22 mm od brzoju, na którym umieszczona jest badana próbka, symetrycznie po obu stronach naklejono tensometry oporowe o długości pomiarowej 0,6 mm. Tensometry połączono szeregowo w celu wyeliminowania wpływu zginania na wynik pomiaru. Układ pomiarowy mostka tensometrycznego posiada szerokie pasmo przenoszenia, aby zapewnić prawidłowe pomiary szybkich, bo trwających zaledwie kilkanaście  $\mu$ s, sygnałów pomiarowych. Pocisk wykonany ze stali maraging o średnicy 11 mm i długości 12,5 mm jest rozpędzany w wyrzutni pneumatycznej do prędkości w zakresie od 20 m/s do 150 m/s. Po rozpędzeniu pocisk uderza w badaną próbkę powodując jej deformację plastyczną, aż do momentu kiedy czoło pocisku uderza w czoło tulei hamującej, które może być wysunięte przed powierzchnię pręta podpierającego o odległość od 0 mm do 1 mm. Zastosowanie w urządzeniu tulei hamującej pozwala na zabezpieczenie podatnego na uszkodzenie pręta podpierającego przed zniszczeniem, pomiar przemieszczenia styku pocisk próbka oraz uzyskanie założonego poziomu odkształcania próbki (odzyskiwanie próbki) w celu późniejszych analiz, np. strukturalnych.

### 3. Wyniki badań tantalu

Badanie eksperymentalne mechanicznych właściwości tantalu w warunkach obciążeń ściskających, przy bardzo dużej prędkości odkształcenia, przeprowadzono z wykorzystaniem próbek o średnicy  $d_{s0} = 1,5$  mm oraz długości  $l_{s0} = 0,55$  mm wykonanych z polikrystalicznego tantalu. Przebiegi czasowe naprężenia, odkształcenia i prędkości odkształcenia w próbce w funkcji czasu, otrzymane z zastosowaniem zminiaturyzowanej metody DICT, przedstawiono na rys. 2. Czas, w którym rejestrowane są dane wykorzystywane do późniejszej analizy wynosi ok.  $6\mu s$ , pozostała część zarejestrowanych przebiegów odzwierciedla proces hamowania pocisku na tulei oporowej i sprężystego odbicia pocisku od tulei, co nie jest przydatne w trakcie wyznaczania charakterystyk materiałowych próbki. Prędkość odkształcenia próbki zmniejsza się od wartości  $8 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  do  $7 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ , co jest spowodowane plastyczną deformacją materiału, która skutkuje zwiększaniem się powierzchni obu kontaktów próbki, a co za tym idzie stopniowym zwiększaniem siły nacisku na pręt podpierający. Przyjęto średnią prędkość odkształcenia o wartości  $\dot{\epsilon} = 7,5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ . Przebieg procesu odkształcenia próbki, co jest odzwierciedlone przez krzywą rzeczywistego odkształcenia w funkcji czasu, ma charakter zbliżony do liniowego, przy czym z upływem czasu nachylenie krzywej rośnie w niewielkim stopniu, a więc rośnie również szybkość zmian odkształcenia. Należy zaznaczyć, iż w niniejszych rozważaniach prędkość odkształcenia jest wyznaczana jako pochodna odkształcenia nominalnego. Przedstawiony na rys. 2 przebieg naprężenia rzeczywistego w próbce, obliczony na podstawie sygnału elektrycznego z tensometru naklejonego na pręt transmisyjny, charakteryzuje się bardzo silnymi oscylacjami spowodowanymi odbiciami fali sprężystej wewnątrz badanej próbki. Wartość oscylacji zmniejsza się wraz z kolejnymi falami z 400 MPa do ok. 200 MPa dla ostatniej, czwartej fali. Także odległość pomiędzy wierzchołkami kolejnych oscylacji zmniejsza się z  $1,68 \mu s$  do  $1,25 \mu s$ , co jest wynikiem zmiany geometrii próbki w trakcie deformacji.



Rys. 2. Przebiegi naprężenia, odkształcenia i prędkości odkształcenia w funkcji czasu, wyznaczone dla próbki wykonanej z tantalu na podstawie próby z wykorzystaniem zminiaturyzowanej metody DICT

*Fig. 2. Stress, deformation and deformation velocity profiles as a function of time, determined for the sample made of tantalum, based on the trial using miniaturised DICT method*

#### 4. Analiza numeryczna

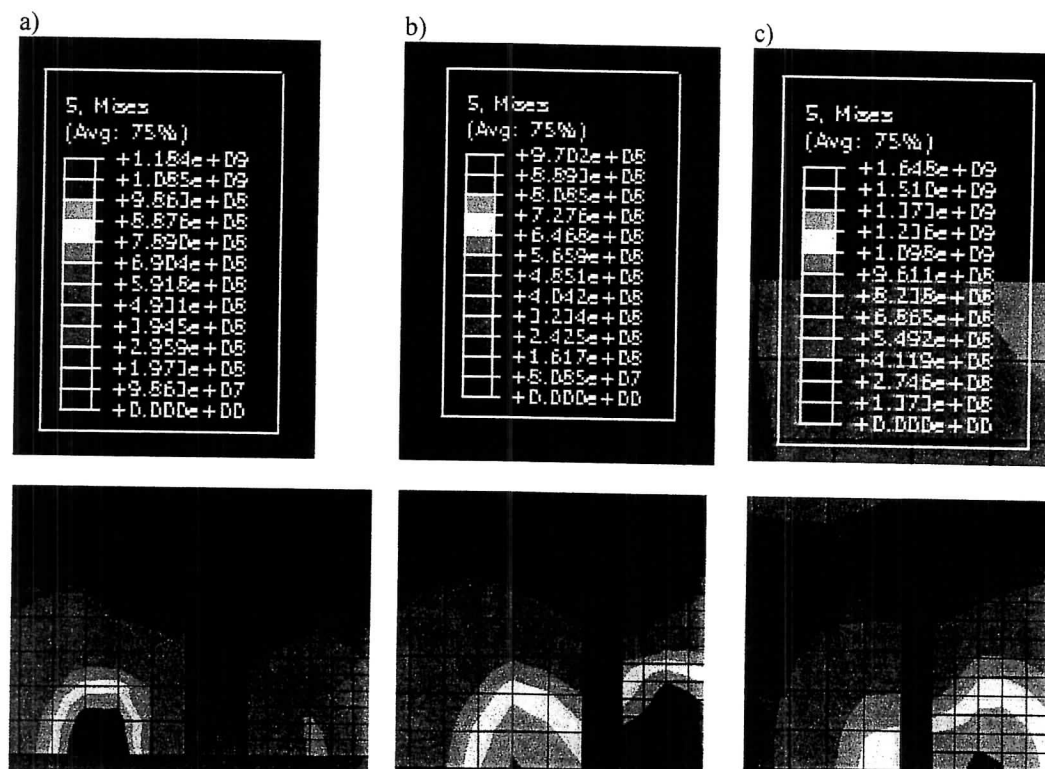
Zastosowanie metody elementów skończonych wydaje się być bardzo dobrym sposobem na sprawdzenie poprawności przeprowadzonych eksperymentów, szczególnie w przypadku zminiaturyzowanego stanowiska DICT, gdzie wykorzystanie szybkich kamer do prześledzenia eksperymentu jest niemożliwe z racji małych wymiarów próbki jak i bardzo krótkiego czasu trwania procesu deformacji. W metodzie bezpośredniego uderzenia nie ma również możliwości zastosowania nadmiarowych technik zbierania danych w celu weryfikacji poprawności uzyskanych wyników (np. sygnał z tensometrów naklejonych na pręt inicjujący i transmitujący oraz dodatkowo z przetwornika LORD), ponieważ urządzenie nie posiada pręta inicjującego.

W pracy [22] zastosowano symulację komputerową z wykorzystaniem środowiska ANSYS do redukcji wpływu adiabatycznego nagrzewania, efektów dyspersji, niestałości prędkości deformacji, niejednorodności naprężeń oraz powstawania szyjki w procesie dynamicznego rozciągania na wyniki pomiaru. W trakcie analizy zmieniano parametry wybranych równań konstytutywnych materiału próbki, tak aby zminimalizować średniokwadratowy błąd pomiędzy otrzymanymi wynikami symulacji a wynikami eksperymentalnymi. Wykorzystując metody numeryczne można także prześledzić szczegółowo proces propagacji i dyspersji fali sprężystej w metodzie Hopkinsona. W pracy [23] prześledzono wpływ geometrii i materiału, z którego wykonano podkładki kształtujące impuls, na kształt generowanej w prętach fali sprężystej oraz powstawanie oscylacji tej fali.

W niniejszej pracy za pomocą analizy numerycznej wykonano symulację z wykorzystaniem identycznych, jak dla eksperymentu, wymiarów próbki i stanowiska, a także parametrów próby. Miało to na celu sprawdzenie możliwości zastosowania symulacji komputerowej do szczegółowej analizy zjawisk zachodzących w procesie bardzo szybkiej deformacji miniaturowych próbek. Na potrzeby analiz numerycznych opracowano model zminiaturyzowanego stanowiska do pomiaru metodą bezpośredniego uderzenia, zawierający podstawowe elementy takie, jak: pocisk, pręt podpierający, tuleja oporowa oraz próbka. Kształt, wymiary i wzajemne położenie poszczególnych elementów modelu były zgodne z wymiarami rzeczywistymi. Dla modelu określono warunki brzegowe takie jak: utwierdzenie przemieszczenia płaszczyzny mocowania pręta i tulei oporowej w obu osiach, początkową temperaturę próbki wynoszącą 298K, brak wymiany ciepła poprzez kontakt z pociskiem i prętem oraz prędkość początkową pocisku. Osiowo-symetryczny model został poddany w środowisku ABAQUS analizie uwzględniającej zjawiska adiabatycznego nagrzewania oraz tarcia pomiędzy kontaktami pocisk/próbka oraz próbka/pręt, przy współczynniku tarcia  $\mu = 0.1$ . Przyjęto następujące właściwości fizyczne i mechaniczne stali maraging: moduł Younga  $E_S = 200$  GPa, gęstość:  $\rho_S = 7860$  kg/m<sup>3</sup>. Założono, że elementy stanowiska będą poddawane odkształceniom sprężystym, wobec czego w symulacji przyjęto model materiału o właściwościach elastycznych. Dla tantalu zastosowano dane obliczone na podstawie modelu konstytutywnego Z-A (Zerilli – Armstronga), który można przedstawić w postaci [21]:

$$\sigma = c_0 + B_0 e^{-(\beta_0 - \beta_1 \ln \dot{\epsilon})^T} + K \epsilon^n \quad (1)$$

Na potrzeby obliczeń przyjęto następujące wartości poszczególnych parametrów równania:  $c_0 = 30$  MPa,  $B_0 = 1125$  MPa,  $\beta_0 = 0,00535$  1/K,  $\beta_1 = 0,000327$  1/K,  $n = 0,44$ .



Rys. 3. Rozkład naprężeń zastępczych (S. Misesa) w próbce i elementach stanowiska dla współczynnika tarcia  $\mu=0,1$ ;  $l_0=0,55\text{mm}$ ;  $D_0=1,5\text{mm}$  w kolejnych etapach eksperymentu:

a)  $t=8,4 \mu\text{s}$ , b)  $t=13,4 \mu\text{s}$ , c)  $t=15,9 \mu\text{s}$

Fig 3. Distribution of the substitute tensions (stresses) (S. Misesa) in the sample and stand elements for the friction co-efficient  $\mu=0,1$ ;  $l_0=0,55\text{mm}$ ;  $D_0=1,5\text{mm}$  in the subsequent stages of the experiment: a)  $t=8,4 \mu\text{s}$ , b)  $t=13,4 \mu\text{s}$ , c)  $t=15,9 \mu\text{s}$

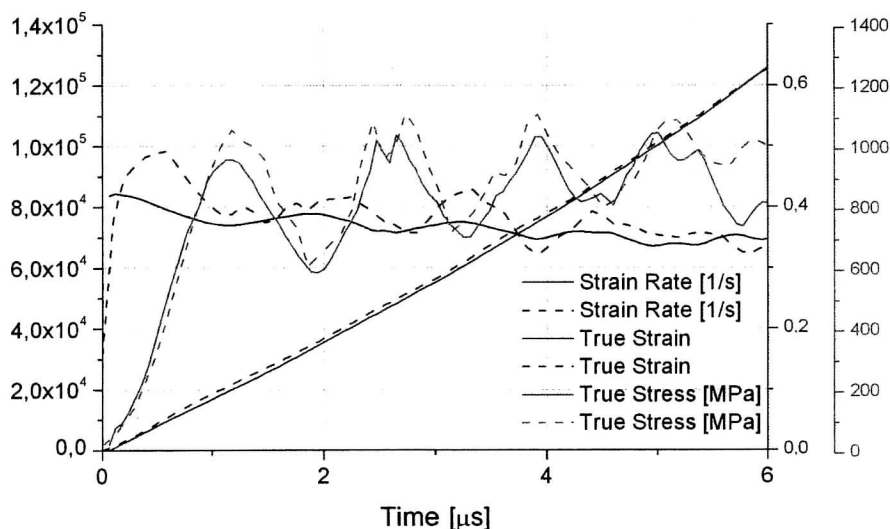
Kolejne etapy deformacji próbki przedstawiono na rys. 3. W części (a) pokazano moment zderzenia pocisku z próbką oraz następujący bezpośrednio po nim proces ustalania się jednorodnego naprężenia w próbce. W pocisku, w obszarze położonym w pobliżu próbki, można zaobserwować strefę silnego naprężenia malejącego wraz z odległością od miejsca kontaktu. W pręcie transmitującym obszar zwiększonego naprężenia jest generowany od miejsca kontaktu próbki z prętą. W części (b) zaprezentowano rozkład naprężenia w trakcie plastycznego odkształcania próbki. Zarówno w pocisku jak i w pręcie zachodzi zjawisko propagacji fali sprężystej. Poprzeczny rozkład naprężeń w pręcie podpierającym jest silnie niejednorodny w pobliżu kontaktu, jednak wraz z oddalaniem się od tego miejsca ujednocila się. Zgodnie z danymi literaturowymi [16] wystarczającą równomierność osiąga w odległości 5 średnic od czoła pręta. W części (c) przedstawiono proces hamowania pocisku z wykorzystaniem tulei oporowej. Zjawisko zachodzi w określonym przedziale czasowym, różnym od zera, w związku z tym próbka po zderzeniu pocisku z tuleją jest jeszcze odkształcana z malejącą prędkością, co może mieć istotne znaczenie w przypadku analizy strukturalnej próbek poddanych odkształceni. Po zderzeniu w tulei hamownika jest generowana wzdłużna fala sprężysta, podobnie jak w przypadku pręta transmitującego.

## 5. Podsumowanie

W trakcie badań przeprowadzono próbę ściskania polikrystalicznego tantalu z wykorzystaniem zminiaturyzowanego stanowiska do bezpośredniego uderzenia w próbkę. Otrzymane wyniki porównano z wynikami symulacji komputerowej (rys. 4), przeprowadzonej w środowisku obliczeniowym ABAQUS, dla opracowanego modelu numerycznego stanowiska. Wyniki badań eksperymentalnych wykazały dużą zgodność z wynikami otrzymanymi z wykorzystaniem metody elementów skończonych:

- otrzymana prędkość odkształcenia maleje od wartości  $8 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  do  $7,5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  w 6  $\mu\text{s}$  przebiegu testu;
- krzywe ilustrujące przebieg odkształcenia w czasie mają bardzo zbliżony kształt, wartość odkształcenia w 6  $\mu\text{s}$  przebiegu testu wynosi  $\varepsilon = 0,65$ ;
- przebieg naprężenia w czasie, w obu przypadkach, posiada charakterystyczne oscylacje, przy czym liczba, amplituda i średni poziom są zbliżone.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wnioskować, że wyniki uzyskane z wykorzystaniem opracowanego modelu numerycznego zminiaturyzowanej metody bezpośredniego uderzenia w próbkę dają dobrą zgodność z wynikami eksperymentalnymi, w związku z tym analiza numeryczna może zostać z powodzeniem zastosowana do badania i analizy zjawisk zachodzących w trakcie procesu deformacji próbki.



Rys. 4. Przebiegi naprężenia, odkształcenia i prędkości odkształcenia w funkcji czasu, wyznaczone dla próbki wykonanej z tantalu na podstawie próby z wykorzystaniem zminiaturyzowanej metody DICT (linia ciągła) oraz obliczone z wykorzystaniem MES (linia przerywana)

*Fig. 4. Stress, deformation and deformation velocity profiles as a function of time, determined for the sample made of tantalum, based on the trial using miniaturised DICT method (continuous line) and calculated using MES (intermittent line)*

## LITERATURA:

- [1] Kolsky H., „An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading”, Proc Phys Soc, London (1949) 62B:676



- [2] Dharan C.K.M., Hauser F.E., "Determination of stress – strain characteristic at very high strain rates", *Exp. Mechanics* (1970), 10:370
- [3] Davies E.D.H., Hunter S.C., "The dynamic compression testing of solids by the method of the Split Hopkinson Pressure Bar", *J Mech Phys Solids* (1963) 12(5), p. 317
- [4] Malinowski J.Z., Klepaczko J.R., "A unified analytic and numerical approach to specimen behavior in the SHPB", *Int J Mech Sci* (1986) 28, p. 381
- [5] Gorham D.A., Pope P.H., Cox O., "Sources of error in very high strain rate compression test", In: *Proc. conf. on mech. prop. at high rates of strain*, Oxford (1984), conf. ser., 70, p. 151
- [6] Ramesh K.T., Narasimhan S., "Finite deformations and the dynamic measurement of radial strains in compression Kolsky bar experiments" (1996) *Int. J. Solids Struct* 33:3723.
- [7] Klepaczko J.R., "Advanced experimental techniques in materials testing", In: *New experimental methods in material dynamics and impact*, Inst. Fund. Technological Res., Polish Academy of Sciences (2002) Warsaw, 223
- [8] Ostwald D., Klepaczko J.R., Klimanek P., "Compression tests of polycrystalline  $\alpha$ -iron up to high strains over a large range of strain rates" (1997) *J Phys IV, Colloque C3, France* 7, C3/385
- [9] Malinowski J.Z., Klepaczko J.R., Kowalewski Z.L., "Miniaturized Compression Test at Very High Strain Rates by Direct Impact", *Exp Mech* (2007) 47:451
- [10] Lindholm, U.S., "Deformation maps in the Region of High Dislocation Velocity", in *High Velocity Deformation of Solids*, J. Shioiri, ed., Springer-Verlag, Berlin, (1978) 26-35
- [11] Follansbee P.S., Regazzoni G., Kocks U.F., "The transition to Drag Controlled Deformation in copper at High Strain Rates", *Institute of Physics conference Series* (1984) 70, 71-80
- [12] Gorham D.A., "Measurements of Stress-Strain Properties of Strong Metals at Very high Strain Rates", *Institute of Physics conference Series* (1980) 47, 16-24
- [13] Shioiri J., Sakino K., Santoh S., "Strain Rate Sensitivity of Flow Stress at Very high Rates of Strain", in *Constitutive Relation in High/Very High Strain Rates*, K. Kawata and J. Shioiri, eds., Springer-Verlag, Berlin (1995) 49-58
- [14] Kamler F., Niessen P., Pick R.J., "Measurement of the Behavior of High-purity Copper at Very High Rates of Strain", *Canadian Journal of Physics* (1995) 73, 295-303
- [15] Wulf, G.L., "The High Strain Rate Compression of 7039 Aluminum," *International Journal of Mechanical Science* (1978) 20, 609-615.
- [16] Malinowski J.Z. i inni, "Opracowanie doświadczalnej metody badania lepkoplastycznych własności metali w zakresie superszybkich prędkości deformacji", raport z realizacji projektu badawczego IPPT PAN (2010) Warszawa
- [17] Hoge K.G., Mukherjee AK. The temperature and strain rate dependency of the flow stress of tantalum. *J Mater Sci* (1977) 12:1666–72.
- [18] Zerilli FJ, Armstrong RW. Description of tantalum deformation behavior by dislocation mechanics based constitutive relations. *J Appl Phys* (1990) 68:1580–91
- [19] R. Kapoor, S. Nemat-Nasser, Comparison between High and Low Strain-Rate Deformation of Tantalum, *Metal and Mat Trans A* (2000) 31A:815-823
- [20] Duprey KE, Clifton RJ. Dynamic constitutive response of tantalum at high strain rates. In: Schmidt SC, Dandekar DP, Forbes JW, editors. *Shock compression of condensed matter*. Melville, NY: American Institute of Physics (1998) 475–8.
- [21] Zerilli F.J., Armstrong R.W., "Dislocation-mechanics-based constitutive relation for material dynamics calculations". *J Appl. Phys* (1987) 61; 1816-25
- [22] Sasso M., Newaz G., D. Amodio, "Material characterization at high strain rate by Hopkinson bar tests and finite element optimization", *Materials Science and Engineering A* 487 (2008) 289–300
- [23] Ramirez H., Rubio-Gonzalez C., "Finite-element simulation of wave propagation and dispersion in Hopkinson bar test", *Materials and Design* 27 (2006) 36–44

