



Analiza eksperymentalna ruchu promieniowego pierścieni rozciąganych elektromagnetycznie

JACEK JANISZEWSKI, KRZYSZTOF RUTYNA¹

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, ¹Instytut Optoelektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dotyczących rozciągania promieniowego pierścieni metalowych za pomocą impulsowego pola elektromagnetycznego. Badaniom poddano pierścienie wykonane z miedzi Cu-ETP oraz duraluminium AW-2017A. Rozciąganie próbek przeprowadzono z wykorzystaniem stanowiska eksperymentalnego zaprezentowanego w pracy [1]. Do rejestracji kształtu pierścienia w poszczególnych fazach jego ruchu zastosowano system kamer cyfrowych, które zapewniały otrzymanie obrazów o rozdzielczości 1360×1024 pikseli. Stwierdzono, że dla zastosowanych parametrów napędzania elektromagnetycznego, pierścienie miedziane rozciągają się z maksymalną prędkością wynoszącą około 170 m/s, podczas gdy pierścienie z duraluminium osiągną prędkość około 160 m/s. Ponadto potwierdzono, że pierścień jest rozciągany osiowoosymetrycznie, jednakże w późniejszej fazie napędzania ruch ścianek pierścienia jest zaburzony przez niestabilność pola magnetycznego wywołanego uskokiem linii nawojowej pomiędzy uzwojeniami cewki.

Słowa kluczowe: elektromagnetyczna metoda pierścieniowa, elektromagnetyczne rozciąganie pierścieni

Symbole UKD: 669.018.2

1. Wprowadzenie

Odształcanie metali za pomocą impulsowego silnego pola elektromagnetycznego wzbudza coraz większe zainteresowanie zarówno wśród naukowców zajmujących się badaniem metali w warunkach dynamicznej deformacji, jak i wśród technologów opracowujących metody wytwarzania części maszyn z blach metalowych.

Pionierem w zastosowaniu pola elektromagnetycznego do rozciągania pierścieni był Niordson [2]. Zastosował on układ elektryczny, który zapewniał uzyskanie impulsowego pola elektromagnetycznego w wyniku rozładowania baterii kondensatorów

przez solenoid, na którym znajdował się osadzony osiowo symetrycznie pierścień metalowy. W przypadku sztywno zamocowanej cewki, powstałe w ten sposób siły elektromagnetyczne powodowały radialną ekspansję pierścienia z prędkościami przewyższającymi 300 m/s. Elektromagnetyczne napędzanie początkowo zastosowano do badań właściwości mechanicznych metali w warunkach dynamicznego odkształcenia. Rejestrując ruch napędzonego pierścienia przemieszczającego się pod wpływem działania jedynie sił inercji, można wyznaczyć obwodowe naprężenia hamujące ruch pierścienia, a ponadto odkształcenia plastyczne oraz szybkość odkształcenia. Obok napędzania wybuchowego, napędzanie elektromagnetyczne jest obecnie najbardziej rozpowszechnione w badaniach właściwości dynamicznych materiałów [3, 4]. Jak donoszą szczególnie ostatnie publikacje naukowe, metoda ta dodatkowo pozwala badać zjawiska pęknięcia metali w warunkach dynamicznej deformacji i adiabatycznego nagrzewania [5].

Idea elektromagnetycznego napędzania elementów wykonanych z materiału o małej oporności została również wykorzystana w produkcji części maszyn. W literaturze anglojęzycznej technologię tę określa się terminem *electromagnetic forming*. Technologia ta polega na kształtowaniu części o skomplikowanych kształtach z blach metalowych [6]. Zazwyczaj stosuje się ją w przypadku elementów produkowanych tradycyjnymi metodami, których geometria wymaga stosowania wielokrotnego głębokiego tłoczenia połączonego z międzyoperacyjnym wyżarzaniem. W przypadku formowania elektromagnetycznego te skomplikowane elementy blaszane są kształtowane tylko w jednej operacji technologicznej. Ponadto ten sposób kształtowania stosuje się podczas wytwarzania części z metali o małej zdolności do odkształceń plastycznych (np. niektóre stopy aluminium lub stali wysokowytrzymałych). Przykład wysokiej zdolności kształtowania elektromagnetycznego blachy stalowej, w porównaniu z konwencjonalną metodą tłoczenia, ilustruje rysunek 1 [7].

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych, których głównym celem była ocena możliwości zbudowanego stanowiska doświadczalnego do elektromagnetycznego napędzania próbek pierścieniowych. Ocenę tę przeprowadzono



Rys. 1. Porównanie zdolności do kształtowania plastycznego blachy stalowej odkształcanej tradycyjną metodą tłoczenia (element z lewej) oraz techniką elektromagnetyczną (element z prawej) [7]

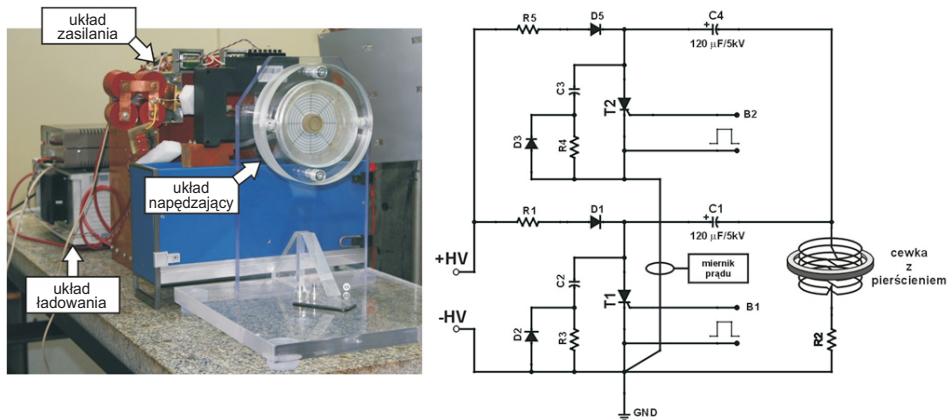
na podstawie badania ruchu ścianek pierścieni wykonanych z materiałów o małej oporności elektrycznej, tj. miedzi Cu-ETP oraz duraluminium AW-2017A. W pierwszej części pracy przedstawiono stanowisko eksperymentalne do rozciągania elektromagnetycznego oraz metodykę rejestracji ruchu pierścienia za pomocą systemu kamer cyfrowych. Z kolei w drugiej części zestawiono wyniki badań rejestracji optycznych oraz dokonano analizy ruchu pierścieni rozciąganych elektromagnetycznie.

2. Stanowisko eksperymentalne

Elektromagnetyczne rozciąganie pierścieni przeprowadzono za pomocą stanowiska laboratoryjnego, którego dokładny opis zaprezentowano w pracy [1]. Widok stanowiska oraz schemat elektryczny układu napędzającego próbki pierścieniowe przedstawiono na rysunku 2.

Zasadniczymi układami stanowiska są: układ napędzający, którego głównym elementem jest cewka, układ zasilania z dwoma sekcjami kondensatorów o pojemności $120 \mu\text{F}$ i z dwoma przełącznikami tyrystorowymi $T1$ i $T2$ oraz układ ładowania kondensatorów. Stanowisko wyposażono także w układ sterowania, który steruje załączaniem wysokoprądowych tyrystorów impulsowych oraz synchronizuje pracę układu zasilania z peryferyjnymi przyrządami pomiarowymi.

W niniejszych badaniach zastosowano cewkę 4-zwojową wykonaną z miedzianego drutu nawojowego o średnicy $1,3 \text{ mm}$. Przyjęta ilość zwojów cewki jest wynikiem doboru parametrów układu elektrycznego ze względu na konieczność otrzymania impulsu prądowego charakteryzującego się krótkim czasem trwania przy stosunkowo dużej amplitudzie. Badaniom poddano pierścienie z miedzi



Rys. 2. Fotografia układu eksperymentalnego — widok od strony cewki z pierścieniem (po lewej), część schematu elektrycznego układu napędzającego (po prawej)

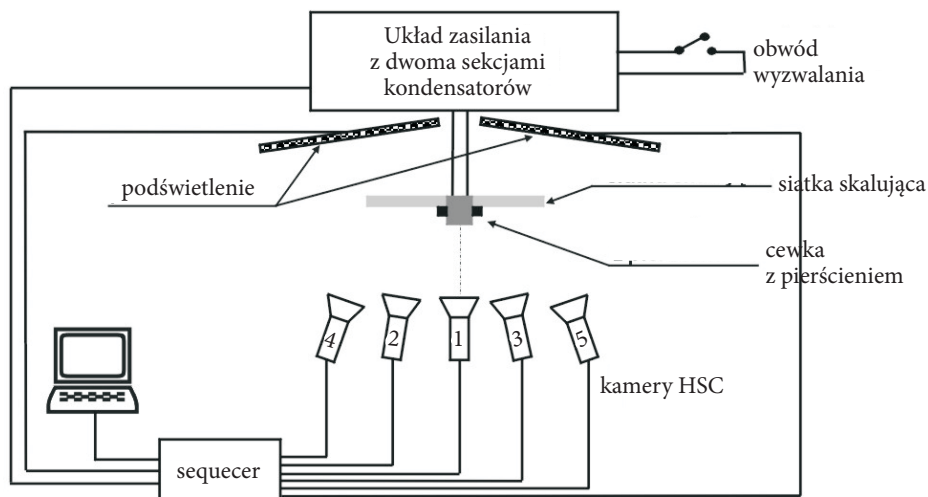
Cu-ETP oraz z duraluminium AW-2017A; średnia średnica tych pierścieni wynosiła 32 mm, a ich przekrój poprzeczny miał wymiary 1×1 mm.

Stanowisko do elektromagnetycznego rozciągania działa następująco: po włączeniu układu ładowania wysokie napięcie ładuje kondensatory gromadzące C1 i C4, odpowiednio przez rezystory R1, R5 i diody D1, D4, do napięcia ustalonego przez operatora. Obydwa obwody ładowania zamykają się do masy przez cewkę i rezystor R2. Podanie z układu sterowania impulsów wyzwalających na bramki B1 i B2 tyrystorów T1 i T2 powoduje rozładowanie baterii kondensatorów przez przewodzące tyrystory, cewkę i rezystor R2. W obwodzie zaczyna płynąć prąd, który, w zależności od napięcia ładowania, osiąga wartość od kilku do kilkudziesięciu kiloamperów. Ten zmienny w czasie prąd generuje zmienny strumień magnetyczny, indukujący w metalowym pierścieniu zmienny prąd o kierunku przeciwnym do kierunku prądu cewki. W ten sposób, w wyniku wzajemnego oddziaływania pól elektromagnetycznych, cewka i pierścień odpychają się wzajemnie, wywołując, w przypadku sztywnego zamocowania zwojów cewki, promieniowe przyspieszenie pierścienia z prędkościami radialnymi osiagającymi nawet kilkaset metrów na sekundę. Następnie, w pewnej chwili od momentu zadziałania przełączników tyrystorowych, kiedy prąd w obwodzie cewki zmienia znak na przeciwny, tyrystory przestają przewodzić prąd, w wyniku czego zanikają siły elektromagnetyczne napędzające pierścień. Dzięki tej właściwości tyrystorów, pomimo oscylacyjnego charakteru rozładowania układu elektrycznego, możliwy jest przepływ prądu tylko w pierwszym półokresie oscylacji. W ten sposób osiąga się impulsowy charakter napędzania, który sprawia, że pierścień po początkowej, krótkiej fazie przyspieszenia i oddaleniu się od cewki, porusza się dalej jedynie wskutek działania sił inercji.

Układ elektryczny stanowiska w przedstawionej konfiguracji pozwala rozładowywać kondensatory, których maksymalne napięcie naładowania nie przekracza 2,25 kV. W związku z tym maksymalna energia rozładowania jest równa około 0,61 kJ. W niniejszej pracy napędzanie pierścieni przeprowadzano przy dwóch napięciach ładowania kondensatorów 1,5 kV i 2 kV, co odpowiada wartościom energii rozładowania równym 0,27 kJ i 0,48 kJ.

3. Układ rejestracji ruchu pierścienia

Kształt pierścienia w kolejnych fazach jego napędzania oraz lotu inercyjnego fotografowano kamerami kadrowymi o krótkim czasie ekspozycji. Do badań zaadaptowano laboratoryjne stanowisko rejestracji szybkich procesów, składające się z pięciu autonomicznych kamer HSC-145BW [8]. Kamery te zostały połączone przez interfejs z komputerem oraz asynchronicznym układem sterującym kamerami — sequencerem. Pierścień podświetlano dwoma impulsowymi układami podświetlającymi oraz jednym źródłem światła ciągłego. Schemat funkcjonalny



Rys. 3. Schemat funkcjonalny stanowiska laboratoryjnego do wykonywania fotografii kadrowej procesu elektromagnetycznego napędzania pierścieni

stanowiska laboratoryjnego do wykonywania cieniowej fotografii kadrowej procesu napędzania pierścienia oraz jego lotu zilustrowano na rysunku 3.

Przedstawiony system rejestracji jest przeznaczony do fotografowania wybranej fazy w czasie trwania procesu napędzania pierścieni do pożądaných prędkości.

Z kolei na rysunku 4 przedstawiono widok zautomatyzowanego stanowiska do fotograficznej rejestracji procesu elektromagnetycznego rozciągania i fragmentacji pierścieni oraz zaprezentowano przykładową akwizycję obrazu wraz z oknem dialogowym parametrów procesu synchronizacji.



Rys. 4. Stanowisko laboratoryjne do fotograficznej rejestracji procesu rozciągania i fragmentacji pierścieni (widok od strony cewki z pierścieniem) oraz przykładowy widok ekranu dialogowego

Kamery pracowały w trybie asynchronicznym pod nadzorem specjalistycznego oprogramowania. Każda kamera w takim rozwiązaniu rejestrowała obraz napędzanego pierścienia w różnych, ustalonych przed testem czasach.

Kamery, z wyjątkiem kamery nr 1, zostały ustawione pod pewnym kątem w stosunku do osi cewki. Zadbano jednakże, aby osie optyczne obiektywów wszystkich kamer leżały w płaszczyźnie poziomej, przechodzącej przez oś cewki. Dzięki temu, pomimo kąтового ustawienia kamer, pomiar promienia rozszerzania się pierścienia w płaszczyźnie pionowej nie był obciążony błędem paralaksy.

Synchronizację eksperymentu (wyzwolenie migawki kamery w wybranym czasie procesu rozciągania pierścienia) zapewniał autonomiczny cyfrowy generator sequencer. Uruchamiał on proces akwizycji (rejestracji obrazu) po otrzymaniu impulsu od układu sterującego wysokoprądowymi tyrystorami. Sygnał ten — według zaplanowanego wcześniej algorytmu czasowego — wyzwał układy podświetlające oraz migawki sensorów CCD (rys. 3).

Fotografowanie tak szybkiego procesu wymagało zsynchronizowania rejestrowanej fazy z momentem generacji impulsu oświetlającego, a jednocześnie — z wyzwoleniem (z dokładnością do 1 μ s) migawek elektronicznych kamer CCD. Kamery te rejestrowały obrazy w odstępach czasu skorelowanych z prędkością rozciągania pierścienia — aż do jego fragmentacji. Czas pomiędzy kolejnymi naświetlaniami sensora był programowany i wynosił 3 lub 5 μ s. Ponieważ przy tak krótkich czasach naświetlania sensora czułość kamery nie była wystarczająca (ciemny obraz), przemieszczający się pierścień oraz jego fragmenty były dodatkowo doświetlane z dwóch źródeł światła — ciągłego i impulsowego.



Rys. 5. Elementy stanowiska badawczego do fotografowania procesu napędzania i fragmentacji pierścienia (widok ogólny)

Akwizycję obrazu prowadzono wykorzystując metodę fotografii cieniowej. Metoda ta polega na rejestracji kształtu pierścienia (jego fragmentów) na tle rozświetlonego ekranu, na który naniesiono skalę w postaci okręgów o promieniach zwiększających się co 5 mm.

Stosownie do wybranej konfiguracji stanowiska fotografowania wykorzystano autonomiczny oświetlacz (halogen 2000 W) oraz dwa układy podświetlające o regulowanej energii błysku, zsynchronizowane z procesem fotografowania (rys. 3).

Na rysunku 5 przedstawiono fotografię pokazującą rozmieszczenie elementów systemu akwizycji danych obrazowych oraz konfigurację ustawienia kamer podczas rejestracji przebiegu procesu napędzania i fragmentacji pierścienia.

4. Analiza ruchu pierścieni napędzanych elektromagnetycznie

Rozciąganie pierścieni z Cu-ETP

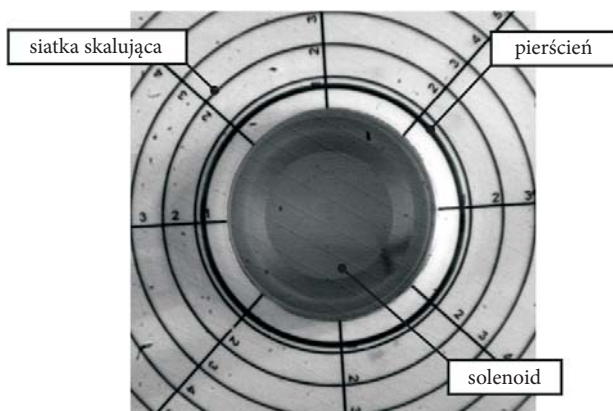
Miedź jest metalem, który ma bardzo korzystne właściwości fizykomechaniczne z punktu widzenia efektywności napędzania elektromagnetycznego. Przede wszystkim metal ten wykazuje stosunkowo małą rezystywnością w porównaniu z innymi metalami konstrukcyjnymi (tab. 1). W związku z tym sprawność sprzężenia elektromagnetycznego pomiędzy cewką a pierścieniem jest bardzo wysoka, co stwarza możliwość napędzania pierścienia miedzianego do bardzo dużych prędkości.

TABELA 1
Rezystywność wybranych materiałów konstrukcyjnych [6]

| Metal | Rezystywność [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$] |
|-----------------|--|
| Stopy aluminium | 3 ÷ 6 |
| Miedź OFHC | 1,7 |
| Stale | 15 ÷ 30 |
| Czyste żelazo | 9,8 |
| Tytan | 160 |
| Magnez | 9,2 |
| Brąz | 6 ÷ 10 |

Ponadto miedź charakteryzuje się bardzo dobrą plastycznością zarówno w warunkach statycznego, jak i dynamicznego odkształcania. Dzięki temu, przez długi czas można obserwować proces rozszerzania się pierścienia, zanim ulegnie on fragmentacji.

Przykładowy obraz chwilowego położenia pierścienia otrzymanego przy zastosowaniu opisanego wyżej systemu rejestracji przedstawia rysunek 6. Widoczne są na nim: cień pierścienia, obudowa cewki (solenoid) oraz okręgi siatki skalującej.



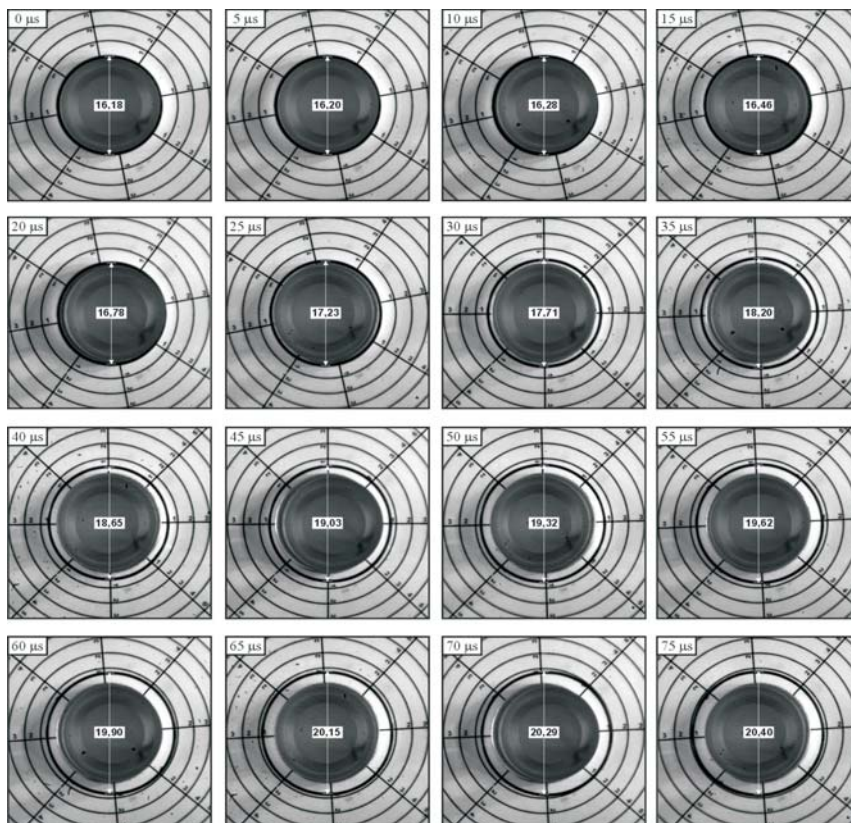
Rys. 6. Przykładowa fotografia pierścienia podczas procesu rozciągania — interpretacja elementów obrazu

Na rysunkach 7 i 8 zestawiono kolejne kadry ekspansji promieniowej pierścieni napędzanych odpowiednio energią 0,27 kJ i 0,48 kJ oraz wartości promienia dla poszczególnych czasów rejestracji. Na zamieszczonych tam fotografiach zestawiono serię szesnastu wyników z trzech eksperymentów dla trzech pierścieni miedzianych. Czasy rejestracji kolejnych kadrów zostały tak dobrane, aby uzyskać informację o możliwie całym ruchu pierścienia od jego startu aż do jego fragmentacji. Przyjęto, że kolejne rejestracje procesu napędzania, w przedziale czasowym od 0 do 75 μs , będą wykonywane z krokiem czasowym wynoszącym 5 μs .

Aby wyeliminować błędy wynikające z połączenia trzech serii kadrów wykonanych dla różnych pierścieni, szczególną uwagę zwrócono na podobieństwo wymiarowe i masowe wytypowanych próbek pierścieniowych. Do badań wytypowano pierścienie o przekrojach poprzecznych, których wymiary mieściły się w tolerancji wykonania wynoszącej $\pm 0,01$ mm, a różnica w masach pierścieni nie była większa niż 0,01 g.

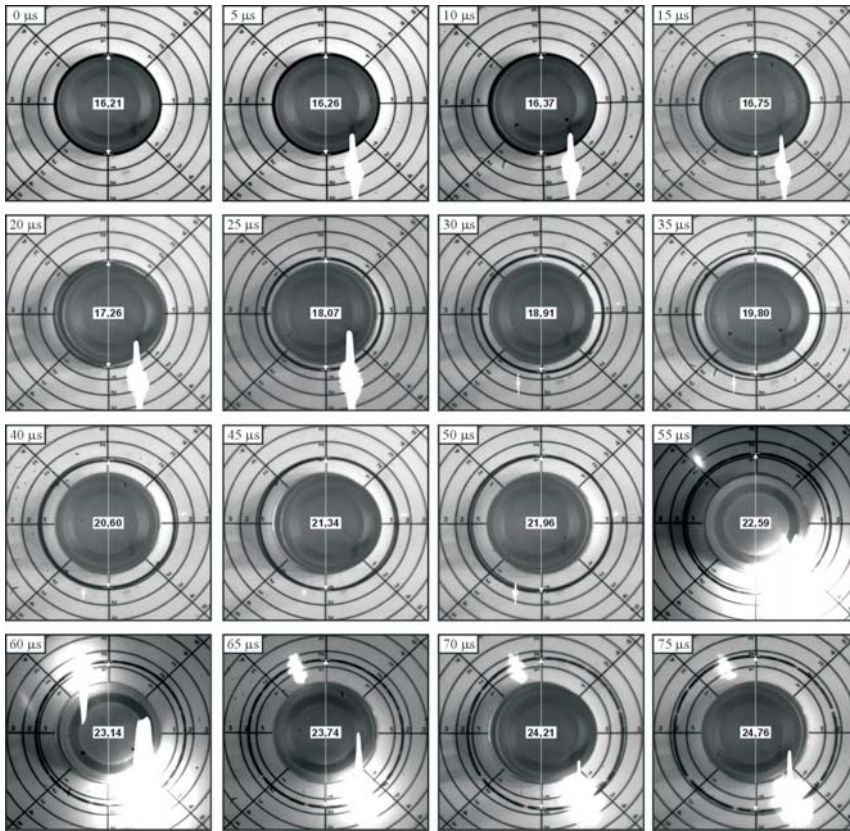
Analiza zdjęć zamieszczonych na rysunkach 7 i 8 pozwala stwierdzić, że ruch ścianek pierścieni jest symetryczny względem osi podłużnej cewki. Dostrzegalna na niektórych zdjęciach asymetria wynika z kąтового ustawienia kamer. Wszystkie obiektywy kamer, z wyjątkiem kamery 1 (zdjęcia 0 μs , 5 μs , 30 μs , 55 μs), obserwowały proces napędzania pierścienia pod pewnym małym kątem w stosunku do osi cewki. Osie optyczne obiektywów były tak ustawione, aby leżały w płaszczyźnie poziomej przechodzącej przez oś cewki. Stąd zauważalna jest mała asymetria i niewielkie

zniekształcenie pierścienia w płaszczyźnie poziomej. Zatem, aby wyeliminować błąd pomiaru wynikający z kąтового ustawienia kamer, pomiary średnicy pierścienia wykonywano jedynie w płaszczyźnie pionowej (rys. 7 i 8).



Rys. 7. Zobrazowanie chwilowych położeń pierścieni z miedzi Cu-ETP w trakcie rozciągania energią rozładowania 0,27 kJ

Dokładna analiza kształtu pierścienia podczas jego ruchu ujawniła także niesymetryczne przemieszczanie się krótkiego odcinka pierścienia słabo widocznego na rysunku 7 (zdjęcie 55 μs), a jednocześnie wyraźnie widocznego na rysunku 8 (zdjęcie 75 μs). Zaburzenie ruchu dotyczy tej części pierścienia, wokół której na fotografii roztacza się jasny obszar, powstały w wyniku prześwietlenia sensora optycznego kamery CCD przez występujący tu łuk elektryczny. Przyczyną nieregularności ruchu tej części pierścienia jest zaburzenie pola elektromagnetycznego będącego rezultatem małego uskoku drutu nawojowego cewki, pomiędzy kolejnymi uzwojeniami solenoidu. Efektem tego zaburzenia jest niepożądany, lokalny układ sił, który



Rys. 8. Zobrazowanie chwilowych położenia pierścieni z miedzi Cu-ETP w trakcie rozciągania energią rozładowania 0,48 kJ

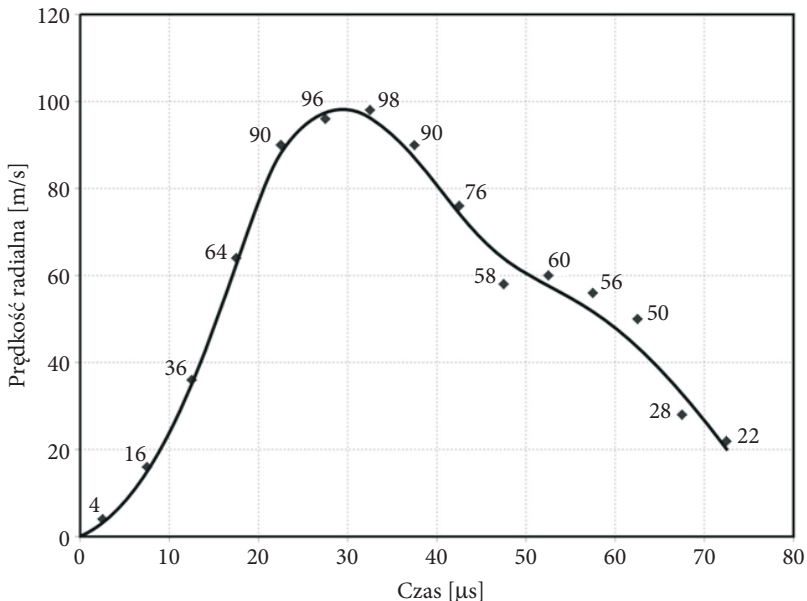
dotąd wywołuje zginanie pierścienia na pewnym jego odcinku. Konsekwencją tego zjawiska jest pęknięcie pierścienia w miejscu zginania. Widocznym objawem fragmentacji pierścienia jest powstanie w miejscu pęknięcia łuku elektrycznego, który miejscowo prześwietla zarejestrowaną fotografię.

O ile położenie prześwietleń można utożsamiać z miejscami pojawienia się pierwszych pęknięć pierścienia, o tyle moment pojawienia się prześwietleń w danym kadrze nie może być uznany za początek fragmentacji pierścienia. Wynika to ze specyfiki właściwości zastosowanych sensorów kamer optycznych oraz ze sposobu wyczytywania informacji z kolejnych pikseli. Po krótkim naświetleniu przetwornika CCD kamery (czas migawki $1\ \mu\text{s}$) następowało długie wyczytywanie informacji (czas rzędu milisekund), podczas którego przez kraty matrycy sensora, w miejscu występowania dużej ilości światła (łuk elektryczny) dochodziło do dodatkowego, pasożytniczego doświetlenia pikseli. Dlatego np. na rysunku 8 (zdjęcia $5\ \mu\text{s}$, $10\ \mu\text{s}$, $15\ \mu\text{s}$, $20\ \mu\text{s}$ i $25\ \mu\text{s}$) prześwietlenia są już widoczne, pomimo że kadry

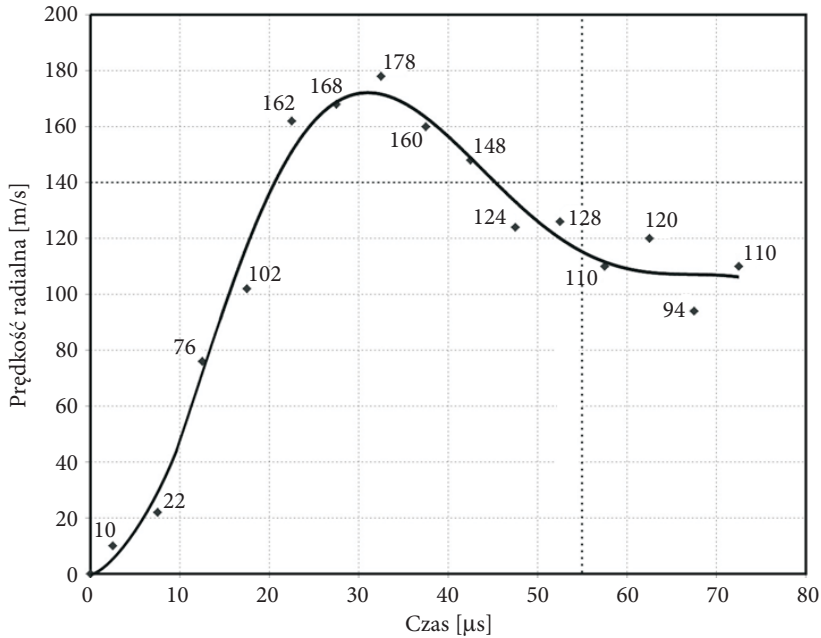
te zostały wykonane w początkowej fazie przyspieszania pierścienia, w której nie dochodzi jeszcze do fragmentacji.

Przedstawione wyżej (rys. 7 i 8) zestawienia kadrów chwilowych położenia pierścieni miedzianych stanowią cenne źródło informacji, na których podstawie można oszacować prędkość radialną ścianek rozciąganego pierścienia. Na rysunku 9 i 10 przedstawiono wykresy zmiany prędkości radialnej w czasie fazy napędzania i fazy inercyjnego ruchu dla przyjętych energii rozładowania.

W przypadku rozciągania z mniejszą energią rozładowania, ścianki pierścienia przyspieszają gwałtownie i osiągają wartość przyspieszenia około $5,1 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ w przedziale czasowym $10 \div 20 \text{ } \mu\text{s}$. Po około $30 \text{ } \mu\text{s}$ prędkość ścianek pierścienia osiąga maksymalną wartość wynoszącą około 100 m/s . Dalszy ruch pierścienia jest już inercyjny. Prędkość ścianek pierścienia prawie liniowo maleje, co jest konsekwencją istnienia w pierścieniu naprężeń obwodowych hamujących jego ruch. Opóźnienie w przedziale czasowym $35 \div 45 \text{ } \mu\text{s}$ wynosi około $2,1 \times 10^6 \text{ m/s}^2$. Widoczna nieliniowość zmian prędkości na odcinku ruchu inercyjnego wydaje się w tym przypadku nie mieć związku z zachodzącymi w pierścieniu zjawiskami fizycznymi. Jest ona wynikiem tego, że przy konstruowaniu wykresu $v-t$ użyto danych z dwóch testów, dla których warunki napędzania różniły się między sobą — mimo zachowania wspomnianych wcześniej rygorów co do zbieżności parametrów przeprowadzenia eksperymentu.



Rys. 9. Zmiana prędkości radialnej w czasie dla pierścienia z Cu-ETP dla energii rozładowania $0,27 \text{ kJ}$



Rys. 10. Zmiana prędkości radialnej w czasie dla pierścieni z Cu-ETP dla energii rozładowania 0,48 kJ

W podobny sposób przebiega rozciąganie pierścienia przy wyższej energii rozładowania 0,48 kJ. Średnie przyspieszenie w fazie napędzania dla przedziału czasowego $10 \div 20 \mu\text{s}$ jest wyższe i wynosi około $8,8 \times 10^6 \text{ m/s}^2$, a maksymalna prędkość, jaką osiągają ścianki pierścienia, jest bliska 180 m/s. Również wartość opóźnienia w fazie ruchu inercyjnego jest wyższa niż w przypadku napędzania z energią 0,27 kJ i wynosi ona około $2,8 \times 10^6 \text{ m/s}^2$. Opóźnienie ruchu inercyjnego pierścienia jest — w pewnym przybliżeniu — jednostajne do około 55 μs . Po tym czasie prędkość ścianek pierścienia nie zmniejsza się już tak gwałtownie. Spowolnienie spadku prędkości pierścienia prawdopodobnie jest skutkiem pojawienia się na obwodzie pierścienia lokalnych przewężeń, a następnie pęknięć ścianek. Skutkiem tego jest zanik naprężenia obwodowego hamującego rozciąganie pierścienia. Dalszy ruch fragmentów pierścienia jest już tylko spowalniany przez siły oporu aerodynamicznego. Dla przedziału czasowego $55 \div 72,5 \mu\text{s}$ wydaje się, że obliczone wartości chwilowych prędkości (rys. 10) są obarczone dużym błędem. Może on wynikać z tego, że pomiar średnicy rozciągania pierścienia był dokonywany na dwóch przeciwległych fragmentach, których ruch mógł być zaburzony przez powstający łuk elektryczny i towarzyszącą temu falę uderzeniową [9]. Zjawisko to może wywoływać obrót fragmentu pierścienia („koziolkowanie”) i wpływać niekorzystnie na dokładność pomiaru średniego promienia rozprzestrzeniania się wszystkich fragmentów pierścienia. Stąd prawdopodobnie tak duże, widoczne na rysunku 10, wahania w wartościach prędkości radialnej po fragmentacji.

Zjawisko koziołkowania pierścienia zobrazowano na rysunku 11, na którym przedstawiono fotografię otrzymaną z wykorzystaniem pojedynczej kamery z zaawansowanym procesem sterowania. Sensor kamery podczas rejestracji został czterokrotnie naświetlony z czasem ekspozycji $3 \mu\text{s}$ i co $10 \mu\text{s}$. W wyniku naświetlania wykonanego zgodnie z tym algorytmem, na jednej fotografii uzyskano zobrazowanie czterech faz lotu fragmentów pierścienia. Dzięki zastosowaniu takiej metody rejestracji otrzymano precyzyjne dane o symetrii procesu napędzania i fragmentacji.

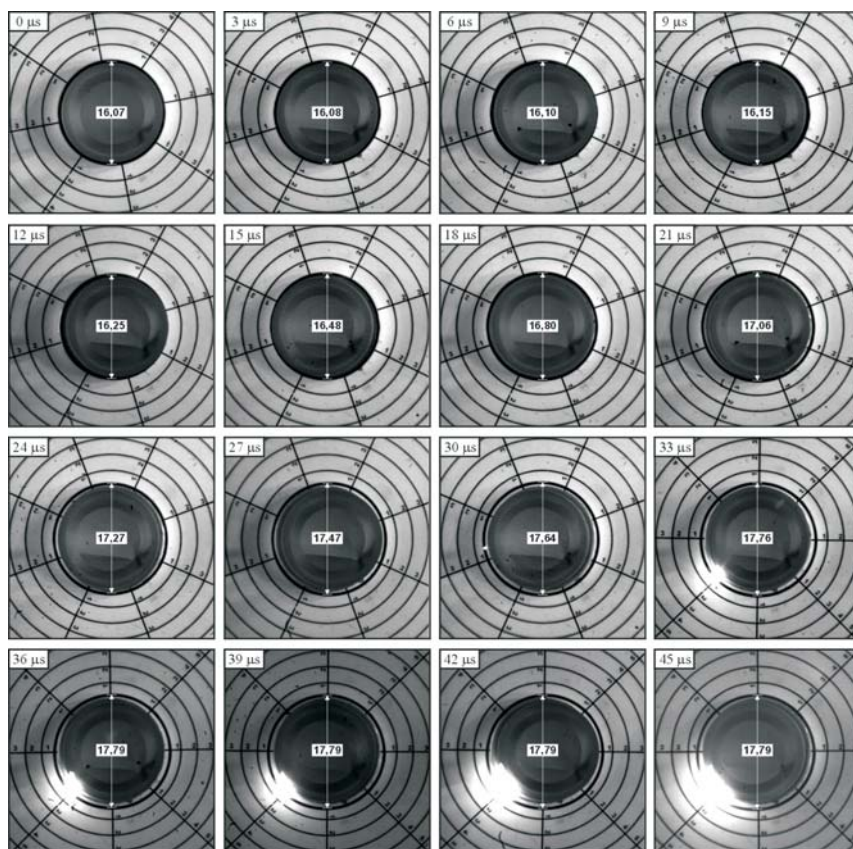


Rys. 11. Zestawienie położenia elementów pierścienia w wybranych czasach ilustrujące koziołkowanie fragmentów

Rozciąganie pierścieni z duraluminium AW-2017A

Wyniki rejestracji rozciągania pierścieni ze stopu aluminium dla energii rozładowania $0,27 \text{ kJ}$ i $0,48 \text{ kJ}$ zostały przedstawione odpowiednio na rysunkach 12 i 13. Tak samo jak w przypadku pierścieni z miedzi, obraz całego procesu rozciągania duraluminium uzyskano w wyniku połączenia kadrów z trzech eksperymentów. Jednakże z uwagi na wcześniejszą fragmentację pierścieni z duraluminium, dla testów z energią rozładowania $0,48 \text{ kJ}$ wykorzystano dane jedynie z dwóch rejestracji.

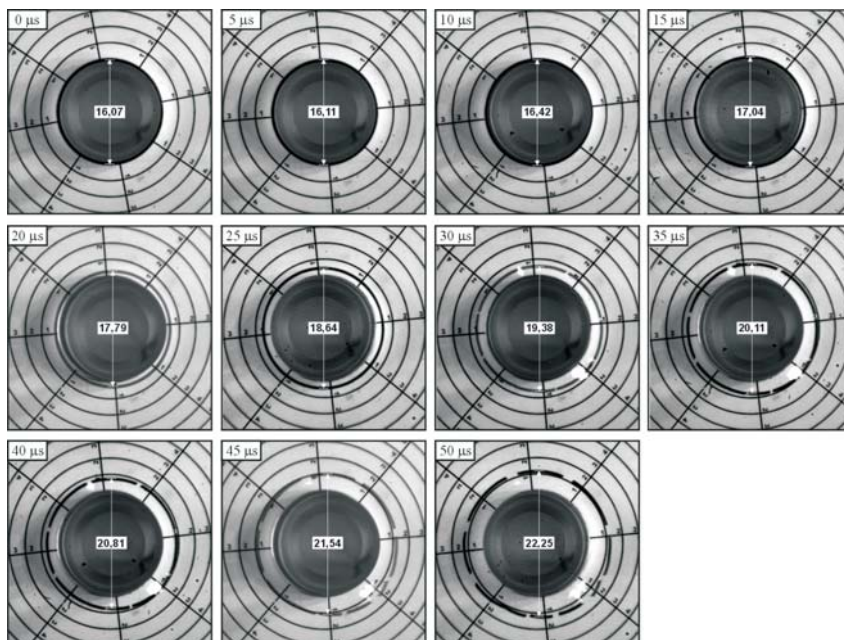
W omawianym obecnie przypadku proces rozciągania jest nieco odmienny od zaprezentowanego wcześniej napędzania pierścieni miedzianych. Ogólnie czas trwania procesu ekspansji duraluminium 2017A jest krótszy. W przypadku rozciągania energią $0,27 \text{ kJ}$, już w $36 \mu\text{s}$ napędzania nie stwierdzono przyrostu promienia, podczas gdy promień pierścienia miedzianego, rozciąganego w analogicznych warunkach, zwiększał się jeszcze w $75 \mu\text{s}$ procesu. Także początek fragmentacji nastąpił wcześniej; pierścień z duraluminium fragmentował już po około $30 \mu\text{s}$, podczas gdy miedziany dopiero po około $55 \mu\text{s}$.



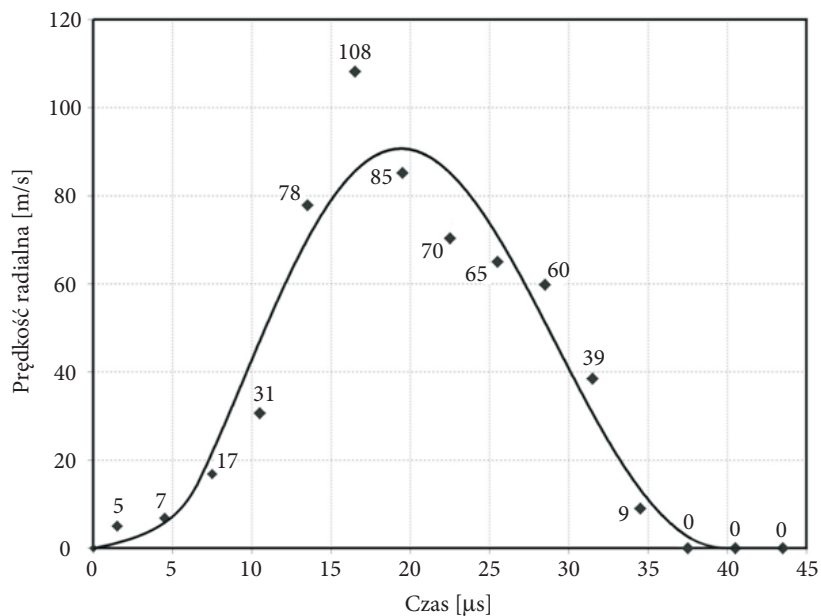
Rys. 12. Zobrazowanie chwilowych położeń pierścieni z duraluminium AW 2017A w trakcie rozciągania energią rozładowania 0,27 kJ

Odmienny charakter przebiegu rozciągania pierścieni z duraluminium potwierdzają także przedstawione na rysunkach 14 i 15 wykresy zmiany w czasie promieniowej prędkości rozciągania. W analogicznych warunkach napędzania pierścienie z duraluminium osiągnęły maksymalne prędkości rozciągania w czasie krótszym niż pierścienie miedziane. Prędkości te wynoszą około 100 i 170 m/s — odpowiednio dla energii 0,27 i 0,48 kJ. Choć są to prędkości bardzo zbliżone do danych otrzymanych w testach pierścieni miedzianych, to jednak nie można pominąć, że zostały one osiągnięte już po około 20 μs, podczas gdy pierścienie miedziane uzyskały maksymalną prędkość dopiero po 30 μs od chwili pojawienia się napięcia na cewce.

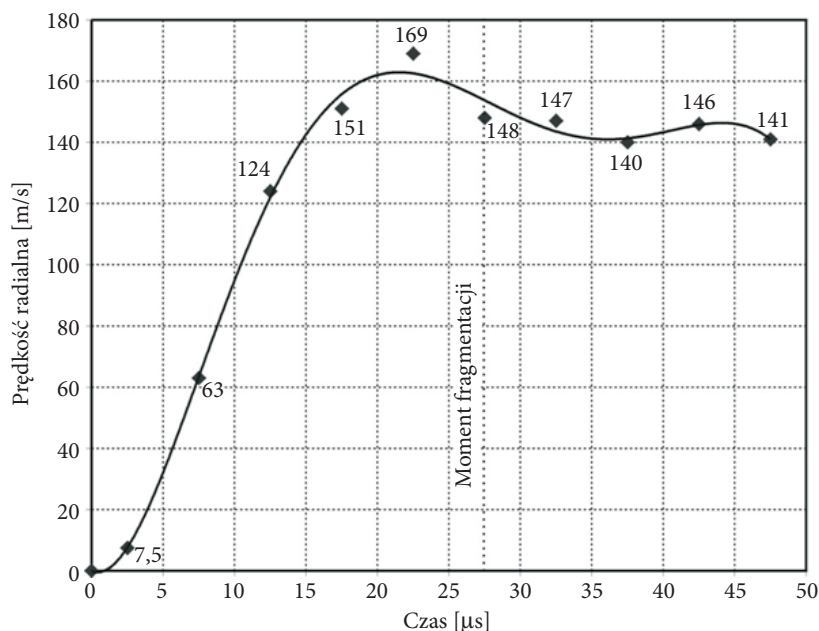
Chwilowe wartości prędkości radialnej pierścienia po jego fragmentacji dla energii rozładowania 0,48 kJ — podobnie jak dla miedzi — są obciążone błędem, który jest skutkiem niedokładności pomiarów wynikających z niesymetrycznego rozlotu fragmentów pierścienia (zjawisko koziołkowania). Oscylacyjny charakter



Rys. 13. Zobrazowanie chwilowych położeń pierścieni z duraluminium AW 2017A w trakcie rozciągania energią rozładowania 0,48 kJ



Rys. 14. Zmiana prędkości radialnej pierścieni w czasie dla duraluminium AW 2017A dla energii rozładowania 0,27 kJ



Rys. 15. Zmiana prędkości radialnej pierścienia w czasie dla duraluminium AW 2017A dla energii rozładowania 0,48 kJ

zmian prędkości fragmentów pierścienia (rys. 15) nie odzwierciedla więc rzeczywistego przebiegu zjawiska.

Dla fazy napędzania liniowego z energiami 0,27 i 0,48 kJ wartości przyspieszenia uzyskiwane przez pierścienie z AW-2017A wynoszą odpowiednio około $8,2 \times 10^6$ i $12,7 \times 10^6$ m/s². Są one zatem znacznie wyższe od analogicznych wartości przyspieszenia obliczonych dla rozciągania pierścieni miedzianych (odpowiednio $5,1 \times 10^6$ i $8,8 \times 10^6$ m/s²). Odmienne relacje między opóźnieniami wystąpiły jednakże na odcinku ruchu inercyjnego. Opóźnienie pierścieni duraluminiowych dla przyjętych energii rozładowania wyniosły około $6,7 \times 10^6$ i 2×10^6 m/s², podczas gdy pierścienie z miedzi hamowały z opóźnieniami $2,1 \times 10^6$ i $2,8 \times 10^6$ m/s².

Zaobserwowane różnice między przebiegiem rozciągania elektromagnetycznego duraluminium i miedzią wynikają z właściwości fizykomechanicznych tych materiałów. Pierścienie ze stopu aluminium, które mają ponadtrzykrotnie mniejszą gęstość od miedzi ($\rho_{2017A} = 2,7$ g/cm³; $\rho_{Cu-ETP} = 8,92$ g/cm³), były rozciągane ze znacznie większymi przyspieszeniami, pomimo że charakteryzują się zbliżonymi do miedzi właściwościami wytrzymałościowymi (duraluminium 2017A — $R_{0,2} = 145$ MPa, $R_m = 220$ MPa; miedź Cu-ETP — $R_{0,2} = 90$ MPa, $R_m = 210$ MPa). Gęstość badanych materiałów wpłynęła również na ruch pierścienia w fazie jego inercyjnego lotu. Było to szczególnie widoczne przy napędzaniu energią rozładowania 0,27 kJ. W tych

warunkach obciążenia i fazy ruchu, rozciąganie pierścienia duraluminiowego jest powodowane przez siłę inercji, która tylko niewiele przewyższa siłę przeciwstawiającą się rozciąganiu, a wynikającą z wytrzymałości odkształcanego pierścienia. Pomimo że oba pierścienie zostały napędzone do porównywalnych prędkości maksymalnych i charakteryzowały się podobnymi właściwościami wytrzymałościowymi, to jednak ruch pierścienia miedzianego odbywał się ze znacznie mniejszym opóźnieniem. Występujące w nim naprężenia obwodowe były dużo mniejsze od siły masowej działającej na pierścień i nie powodowały tak intensywnego hamowania, jak w przypadku pierścienia z duraluminium.

Wpływ wytrzymałości materiału pierścienia na hamowanie ruchu pierścienia nie jest już tak wyraźny podczas rozciągania z energią 0,48 kJ. W tym przypadku podczas lotu swobodnego oba pierścienie mają tak dużą inercję, wynikającą z dużej prędkości rozciągania, że nie występuje tu tak intensywne hamowanie ruchu przez istniejące w materiale pierścienia naprężenie obwodowe. Należy jednak podkreślić, że mimo większej inercji pierścienia miedzianego, jego opóźnienie było większe niż duraluminiowego. Można to tłumaczyć tym, że w przypadku miedzi wraz ze wzrostem szybkości odkształcania następuje wzrost naprężeń plastycznego płynięcia, podczas gdy w badanym duraluminium zauważa się relację przeciwną. Wnioski te w odniesieniu do miedzi i w niektórych stopach aluminium są zgodne z informacjami zawartymi w pracy [3].

Interesujące wydaje się również to, że mimo opisanych wyżej cech badanych materiałów, pierścienie były napędzane do bardzo zbliżonych prędkości maksymalnych. Mogłoby wydawać się, że lżejszy pierścień duraluminiowy będzie osiągał większą prędkość rozciągania niż pierścień miedziany. Tymczasem wyniki pomiarów przeczą temu intuicyjnemu wnioskowi, gdyż prędkość pierścieni wykonanych z duraluminium jest nawet nieco mniejsza od prędkość pierścieni z miedzi. Zjawisko to można tłumaczyć w ten sposób, że w przypadku napędzania elektromagnetycznego, rozciąganie jest wynikiem interakcji pomiędzy polami magnetycznymi powstającymi wokół cewki i pierścienia. Natężenie pola elektromagnetycznego wokół pierścienia jest zależne od wielkości indukowanego w nim prądu, ten zaś jest funkcją wielu zmiennych, wśród których istotne znaczenie ma rezystywność materiału pierścienia. Duraluminium wykazuje ponaddwukrotnie większą oporność elektryczną niż miedź ($R_{Cu-ETP} \approx 1,7 \mu\Omega \cdot \text{cm}$; $R_{2017A} \approx 4 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). W związku z tym amplituda impulsu prądowego w pierścieniu duraluminiowym jest mniejsza, a co za tym idzie, mniejsze jest również natężenie pola elektromagnetycznego. Potwierdzeniem tego są między innymi mniejsze prześwietlenia na rejestrowanych kadrach pochodzące od łuku elektrycznego, pojawiającego się w trakcie rozrywania pierścienia, w którym płynie jeszcze prąd. Napędzanie pierścieni duraluminiowych jest powodowane przez mniejsze siły elektromagnetyczne, jednak dzięki temu, że pierścienie duraluminiowe mają mniejszą masę, osiągają stosunkowo wysoką prędkość, zbliżoną do prędkości pierścieni miedzianych.

5. Podsumowanie

Odształcanie plastyczne metali za pomocą energii pola elektromagnetycznego to efektywny sposób formowania z blach części o skomplikowanym kształcie, niemożliwym do osiągnięcia tradycyjnymi metodami. Napędzanie elektromagnetyczne to także dobra metoda kontrolowanego obciążania próbek materiałowych w celu określania ich właściwości wytrzymałościowych w warunkach dynamicznych. Powyższe zalety wynikają głównie z tego, że napędzanie elektromagnetyczne umożliwia odształcanie metali z bardzo dużymi szybkościami. Jak przedstawiono w niniejszej pracy, za pomocą opracowanego układu zasilającego dokonano deformacji pierścieni miedzianych i duraluminiowych z szybkościami odształcenia rzędu 10^4 s^{-1} . Natomiast przyspieszenia jakie uzyskiwały ścianki pierścieni przewyższały wartość $12 \times 10^6 \text{ m/s}^2$. Są to więc ekstremalne warunki obciążenia, w których metale pozwalają się, bez naruszenia spójności, odształcać w takim stopniu, jaki nie byłby możliwy do osiągnięcia tradycyjnymi metodami. Jednocześnie, chociaż elektromagnetyczne napędzanie pozwala uzyskiwać ekstremalne warunki obciążenia, to zapewnia możliwość doboru parametrów i precyzyjnej kontroli warunków dynamicznego odształcenia.

Dla zastosowanej geometrii cewki stwierdzono doświadczalnie, że rozciąganie pierścienia do chwili jego fragmentacji odbywa się osiowosymetrycznie. Po fragmentacji pierścienia rozlot jego fragmentów jest już niesymetryczny i zaburzony przez niestabilność strumienia elektromagnetycznego. Źródłem zaburzenia pola elektromagnetycznego jest uskok linii nawojowej pomiędzy sąsiadującymi uzwojeniami cewki.

Wyniki testów pozwalają stwierdzić, że sukcesem zakończyła się próba wykorzystania stanowiska laboratoryjnego do rejestracji dynamicznych zmian wymiarów cienkościennego pierścienia rozciąganego impulsowym polem elektromagnetycznym. Zastosowanie precyzyjnie synchronizowanych pięciu kamer CCD z czasem ekspozycji $1 \mu\text{s}$ oraz wykorzystanie metody fotografii cieniowej pozwoliło uzyskać fotografie o bardzo wysokiej jakości. Dzięki temu otrzymany obraz procesu napędzania pierścienia o dużej rozdzielczości (1360×1024 pikseli) został z powodzeniem wykorzystany do analizy jego ruchu tzn. do oszacowania prędkości radialnej pierścieni z Cu-ETP i duraluminium AW-2017A oraz oceny kształtu pierścieni i całego procesu ich fragmentacji.

Podziękowania

Autorzy pracy pragną podziękować dr. inż. Wiesławowi Picholi i Janowi Karczewskiemu za pomoc w przeprowadzeniu badań eksperymentalnych.

Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego własnego nr 0 T00C 007 30 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.05.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2008 r.

LITERATURA

- [1] J. JANISZEWSKI, W. PICHOLA, *Stanowisko do elektromagnetycznego rozciągania pierścieni jako aparatura umożliwiająca badanie właściwości dynamicznych metali*, Biul. WAT, 57, 1, 2008.
- [2] F. I. NIORDSON, *A unit for testing Materials at High Strain Rates*, Experimental Mechanics, January 1965.
- [3] M. A. MEYERS, *Dynamic Behavior of Materials*, John Wiley and Sons, 1994.
- [4] W. H. GOURDIN, *Analysis and assessment of electromagnetic ring expansion as a high-strain-rate test*, J. Appl. Phys., 65, 2, 1989.
- [5] S. SATAPATHY, D. LANDEN, *Expanding ring experiments to measure high-temperature adiabatic properties*, International Journal of Impact Engineering, 33, 2006.
- [6] E. J. BRUNO, *High Velocity Forming of Metals*, ASTM, 1968.
- [7] J. SHANG, *Electromagnetically assisted sheet metal stamping*, praca magisterska, Uniwersytet Stanu Ohio, 2006, <http://mse-gsd1.matsceng.ohio-state.edu>.
- [8] L. BARANOWSKI, K. RUTYNA, Z. SURMA, M. SZUDROWICZ, *Wykorzystanie kamery zdjęć szybkich do badania powydotowego działania gazów prochowych*, Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia”, Waplewo, 2006.
- [9] H. ZHANG, K. RAVI-CHANDAR, *On the dynamics of necking and fragmentation — I. Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O*, Int. J Fract., 142, 2006, 183-217.

J. JANISZEWSKI, K. RUTYNA

Experimental analysis of radial motion of rings expanded electromagnetically

Abstract. The experimental investigation results of a radial ring expansion caused by an impulse electromagnetic field are presented in our paper. The Cu-ETP copper and AW-2017A aluminum alloy rings were studied. The ring expansion was performed by using laboratory apparatus, which was presented in [1]. The ring motion was recorded by means of the optical record system, which consisted of five digital cameras. They ensured to obtain images with relatively high resolution 1360×1024 pixels. For applied electromagnetic loading condition, it was found copper rings expanded with a maximum velocity of approximately 170 m/s, whereas aluminum alloy rings were driven with the velocity of approximately 160 m/s. Moreover, it was confirmed an axisymmetric ring expansion, which, however, at further stages of the ring motion, was perturbed by a local instability in a magnetic field. This local magnetic field perturbation was induced by kinks in transition strip of the solenoid.

Keywords: electromagnetic ring expansion, electromagnetic forming

Universal Decimal Classification: 669.018.2

