



Elektromagnetyczny test pierścieniowy w warunkach próżni

JACEK JANISZEWSKI¹, WIESŁAW PICHOLA²,
KRZYSZTOF MACIASZEK¹

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

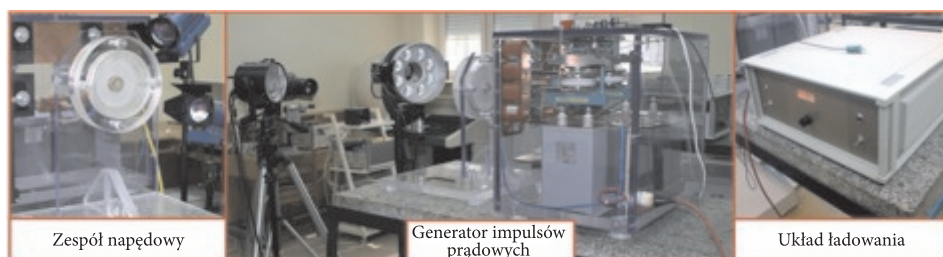
Streszczenie. W pracy przedstawiono konstrukcję próżniowego układu napędzającego, umożliwiającego wykonywanie elektromagnetycznego testu pierścieniowego w warunkach obniżonego ciśnienia. Wykorzystując skonstruowany układ, przeprowadzono badania doświadczalne mające na celu określenie wpływu próżni na zjawisko powstawania łuku elektrycznego i jonizacji powietrza podczas fragmentacji pierścieni wykonanych z miedzi Cu-ETP i stopu aluminium AW 2017A. Otrzymane rezultaty jednoznacznie świadczą, że obecność próżni w trakcie ekspansji elektromagnetycznej ogranicza wyładowanie elektryczne towarzyszące fragmentacji pierścienia i zmniejsza naświetlenie sensora CCD kamery szybkiej. Ponadto, dzięki opracowanemu stanowisku z komorą próżniową, otrzymano fotografie o bardzo wysokiej jakości, pozwalające na obserwację przebiegu procesu fragmentacji w jego początkowych etapach.

Słowa kluczowe: dynamiczne właściwości metali, elektromagnetyczna metoda pierścieniowa, fragmentacja materiałów

1. Wprowadzenie

W ramach prowadzonych od roku 2007 prac badawczych zbudowano stanowisko laboratoryjne, które umożliwiła rozciąganie metalowych próbek pierścieniowych z bardzo dużymi szybkościami odkształcenia ($\dot{\epsilon} > 10^4 \text{ s}^{-1}$) [1]. Zaprojektowana aparatura badawcza wykorzystuje zjawisko ekspansji metalowej próbki pierścieniowej wywołane oddziaływaniem impulsowego pola elektromagnetycznego. Jest to unikatowa aparatura badawcza w skali kraju i obecnie za jej pomocą wykonywane są prace mające na celu badanie zachowania się wybranych metali w warunkach dynamicznego odkształcenia.

Zasada działania opracowanej aparatury polega na tym, iż w wyniku szybkiego rozładowania baterii kondensatorów przez cewkę zostaje wygenerowana duża porcja energii w postaci impulsowego pola elektromagnetycznego, które wywołuje gwałtowne promieniowe rozciąganie pierścienia metalowego, umieszczonego osiowo-symetrycznie wokół cewki. Widok stanowiska laboratoryjnego realizującego elektromagnetyczne rozpęcznie został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Widok stanowiska do elektromagnetycznego rozciągania pierścienia

Opracowane w Wojskowej Akademii Technicznej stanowisko badawcze realizujące ekspansję elektromagnetyczną składa się z trzech zasadniczych zespołów: *napędzającego* — odpowiedzialnego za nadanie prędkości radialnej ściankom pierścienia, *zasilania (generator impulsów prądowych)* — zapewniającego dostarczenie odpowiedniej energii do zespołu napędzającego, oraz *ładowania* — umożliwiającego ładowanie baterii kondensatorów do wybranej wartości napięcia.

Jedną z niedogodności, jaka pojawia się w trakcie elektromagnetycznego rozszerzania pierścienia, jest zjawisko powstawania łuku elektrycznego w początkowej fazie fragmentacji pierścienia. Zjawisko to jest niepożądane z dwóch głównych powodów. Po pierwsze, w wyniku wyładowania dochodzi do jonizacji powietrza i wydzielenia energii w postaci fali świetlnej, która, w przypadku obserwacji zjawiska metodami optycznymi, naświetla matrycę CCD kamery szybkiej, uniemożliwiając rejestrację procesu fragmentacji w jego początkowych chwilach. Po drugie, podczas wyładowania elektrycznego jest generowana fala uderzeniowa, która zaburza ruch fragmentów pierścienia, wywołując ich obracanie i koziołkowanie [2]. Zjawisko to jest również niepożądane, gdyż utrudnia poprawną analizę procesu fragmentacji na podstawie wyników rejestracji optycznych.

W związku z powyższymi problemami zrodziła się idea eliminacji lub ograniczenia zjawiska powstawania łuku elektrycznego podczas fragmentacji pierścienia napędzanego elektromagnetycznie. Idea ta ogólnie polega na tym, aby proces ekspansji elektromagnetycznej pierścienia przeprowadzać w warunkach próżni. Dokonana analiza stanu wiedzy dotyczącej wyładowań elektrycznych oraz metod gaszenia łuku elektrycznego [3-7] pozwoliła stwierdzić, że — po pierwsze — w celu

gaszenia łuku elektrycznego, powstającego podczas fragmentacji pierścieni, przy dużych wartościach prądu, dobrym oraz stosunkowo prostym w realizacji sposobem wydaje się być umieszczenie elektrod — w tym wypadku całego pierścienia — w próżni lub w atmosferze sześćofluorku siarki. Jednakże, ze względu na fakt, że sześćofluorek siarki posiada lepsze właściwości gaszeniowe od próżni, ale tylko w warunkach bardzo wysokich napięć wyładowania, które nie występują w trakcie testu pierścieniowego, zdecydowano, że lepszym rozwiązaniem będzie zastosowanie samej próżni. Po drugie — dzięki niższemu ciśnieniu panującemu w komorze zespołu napędzającego — możliwe będzie również zmniejszenie jonizacji połukowej gazów [6] znajdujących się w jej wnętrzu. Dzięki temu jakość otrzymywanych rejestracji optycznych powinna się zwiększyć i możliwe będzie obserwowanie początkowych etapów fragmentacji pierścieni.

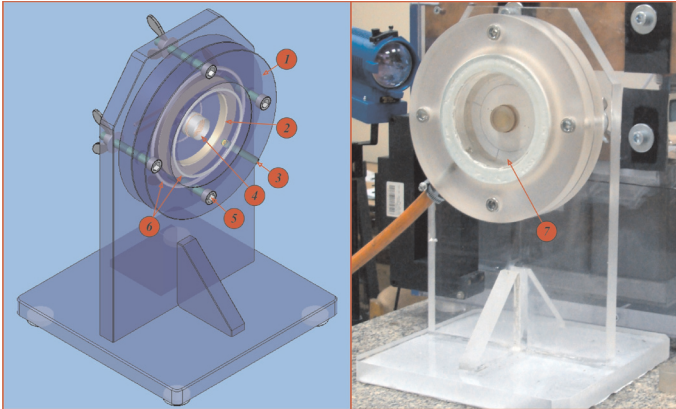
Na podstawie dokonanej analizy literaturowej oraz wypływających z niej wniosków opracowano próżniowy zespół napędzający, którego rozwiązanie konstrukcyjne zostało przedstawione w pierwszej części niniejszego artykułu. Za pomocą tego układu wykonano elektromagnetyczne testy pierścieniowe, których wyniki dokumentujące wpływ próżni na zjawisko palenia się łuku elektrycznego w trakcie fragmentacji próbki pierścieniowej przedstawiono w drugiej części pracy. Ponadto w artykule zaprezentowano oryginalne fotografie ilustrujące początkowe fazy fragmentacji pierścieni wykonanych z miedzi Cu-ETP i stopu aluminium AW 2017A.

2. Konstrukcja próżniowego układu napędzającego

W trakcie opracowywania projektu konstrukcji próżniowego zespołu napędzającego kierowano się następującymi założeniami: po pierwsze — przyjęto, aby nowo powstały zespół można było zaadaptować do istniejącego obecnie generatora prądu i był on przystosowany do optycznej metody rejestracji ruchu pierścienia. Po drugie — połączenia elektryczne nie mogą mieć wpływu na przebieg prądów w silnoprądowym obwodzie elektrycznym stanowiska — problem ten dotyczy głównie podłączenia styków cewki. Po trzecie, w celu uniknięcia nadmiernej czasochłonności badań, przestrzeń komory próżniowej, w której będzie zachodzić ekspansja promieniowa pierścienia, będzie jak najmniejsza, a jej konstrukcja możliwie prosta i zapewniająca łatwy i szybki jej demontaż. Po czwarte, materiały, które zostaną wykorzystane do budowy zespołu, muszą charakteryzować się odpowiednimi właściwościami fizycznymi i mechanicznymi, tj. powinny być odpowiednio wytrzymałe, należeć do dielektryków, posiadać małą przenikalność gazów oraz być łatwo dostępne.

W wyniku przeprowadzonych prac projektowych opracowano konstrukcję próżniowego układu napędzającego (rys. 2), który składa się z dwuelementowej obudowy (1) wykonanej z 20 mm płyty poliakrylanowej, wewnątrz której wykonano wnęki z powierzchniami ustalającymi położenie parafinowego pierścienia żelowego

(2) oraz cewki. Ponadto pomiędzy elementami obudowy umieszczono uszczelnienia typu O-ring (6), które pod wpływem docisku wywołanego śrubami zaciskowymi (5) zapewniają szczelność komory próżniowej. W przedniej części obudowy znajduje się okno wziernikowe, które jest osłonięte krążkiem szklanym (7) o grubości 6 mm. Dzięki takiemu rozwiązaniu konstrukcyjnemu zapewniono możliwość wykonywania rejestracji optycznych za pomocą kamery szybkiej. Odpompowanie powietrza z wnętrza komory odbywa się za pośrednictwem mosiężnej tulei (3) połączonej z przewodem giętkim pompy próżniowej. Z kolei pomiar ciśnienia w przestrzeni obniżonego ciśnienia jest dokonywany za pomocą wakuometru membranowego typ 600072 firmy Ilmvac (dokładność wskazań 0,01 mbar). W testach zastosowano pompę próżniową RZ 2.5 firmy Vacuubrand, która zapewnia osiągnięcie podciśnienia o wartości około 4×10^{-4} mbar.

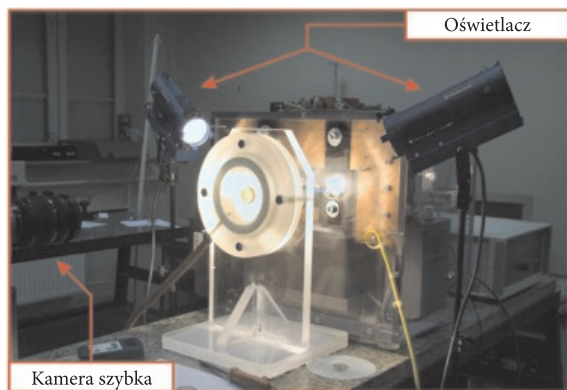


Rys. 2. Rozwiązanie konstrukcyjne próżniowego zespołu napędzającego: (1) dwuelementowa obudowa zespołu napędzającego; (2) pierścień żelatynowy; (3) tuleja przewodu próżniowego; (4) cewka z gniazdem elektrycznym; (5) śruby zaciskowe; (6) uszczelnienia typu O-ring; (7) krążek szklany

3. Elektromagnetyczny test pierścieniowy z wykorzystaniem próżniowego układu napędowego

3.1. Metodyka badań

Za pomocą wyżej opisanego stanowiska badawczego przeprowadzono elektromagnetyczny test pierścieniowy w warunkach obniżonego ciśnienia. Do oceny wpływu obecności próżni na przebieg i ograniczenie zjawiska wyładowania elektrycznego wykorzystano system rejestracji optycznej składający się z kamery szybkiej Phantom v12 oraz układu oświetleniowego Dedocool. Usytuowanie kamery i oświetlacza względem próżniowego układu napędowego pokazano na rysunku 3.



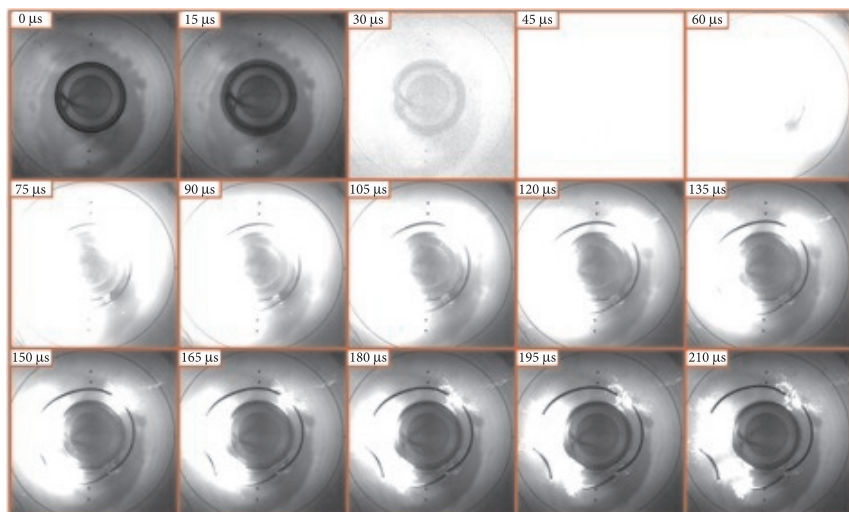
Rys. 3. Usytuowanie komory próżniowej względem oświetlaczy oraz kamery cyfrowej

Testy elektromagnetycznego rozciągania pierścieni przeprowadzono na próbkach wykonanych z miedzi Cu-ETP oraz stopu aluminium AW 2017A. Przygotowane do badań pierścienie posiadały następujące wymiary: przekrój poprzeczny próbki — 1×1 mm, średnia średnica pierścienia — 32 mm. Proces rozciągania pierścieni zrealizowano przy napięciu kondensatorów wynoszącym 2 kV i w różnych wartościach ciśnienia, tj.: pierwszą serię testów wykonano przy ciśnieniu atmosferycznym (około 99 300 Pa), a drugą z wytworzoną w komorze próżnią (około 6 Pa). W celach porównawczych rejestracje optyczne dla obydwóch ciśnień dokonano przy takich samych parametrach nastawczych kamery szybkiej, tj.: przesłona — 2,8, czas ekspozycji — 12 μ s, szybkość klatkowa — 66 037 klatek/s, rozdzielczość — 256×256 .

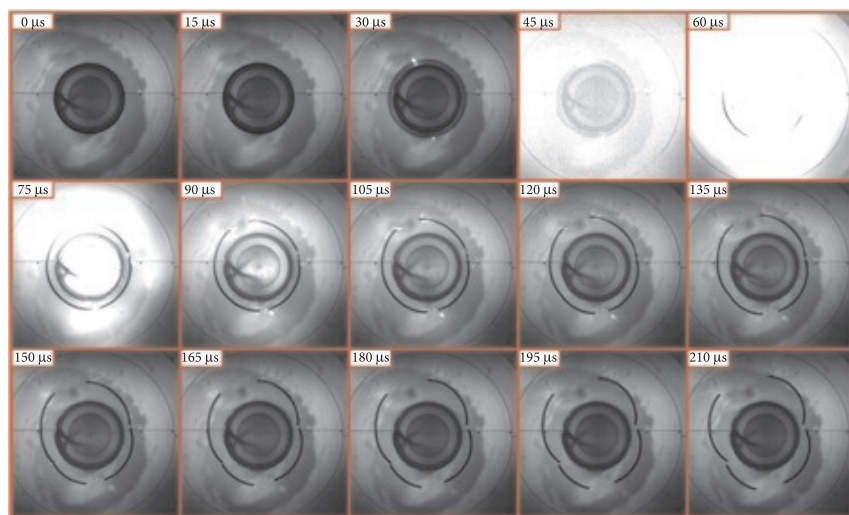
3.2. Wyniki badań

Wybrane kadry rejestracji optycznych dla pierścienia z AW 2017A w warunkach ciśnienia otoczenia zostały zestawione na rysunku 4. Dla danego pierścienia i napięcia rozładowania kondensatorów wynoszącego 2 kV zaobserwowano trzy wyładowania elektryczne, które wystąpiły w miejscach pierwszych pęknięć pierścienia. Stopień naświetlenia sensora CCD kamery szybkiej był tak duży, że w przypadku dwóch kadrów (45 i 60 μ s) nie było możliwe pozyskanie jakiegokolwiek informacji o położeniu pierścienia. Oprócz łuku elektrycznego zauważalna była również jonizacja powietrza, przedłużająca się w czasie i trwająca aż 1440 μ s (nieprzedstawiona na rys. 4).

Na rysunku 5 przedstawiono z kolei ekspansję pierścienia z AW 2017A w warunkach obniżonego ciśnienia. Podczas tego eksperymentu wyładowanie elektryczne wystąpiło w dwóch miejscach, jednakże szybko zostało ono wygaszone, nie powodując dłuższej jonizacji powietrza.



Rys. 4. Wybrane kadry rejestracji optycznej przedstawiającej proces ekspansji elektromagnetycznej pierścienia z AW 2017A w warunkach ciśnienia otoczenia



Rys. 5. Wybrane kadry rejestracji optycznej przedstawiającej proces ekspansji elektromagnetycznej pierścienia z AW 2017A w warunkach próżni

Na podstawie otrzymanych wyników dla pierścieni ze stopu aluminium można już ocenić — w sposób jakościowy — że obniżone ciśnienie znacząco ogranicza jarzenie się łuku elektrycznego. Dla próbki wykonanej ze stopu aluminium wyładowanie elektryczne w próżni objawia się rozbłyskiem występującym jedynie na trzech kłatkach, podczas gdy w powietrzu widoczne ono było na ponad

dziesięciu. Podobne wyniki otrzymano także podczas testów z pierścieniami miedzianymi.

W ramach niniejszej pracy podjęto także próbę ilościowej oceny stopnia naświetlenia łukiem elektrycznym. Oceny tej dokonano na podstawie pomiaru pola powierzchni naświetlonej przez łuk elektryczny na dziesięciu kolejnych kadrach zarejestrowanego filmu. Operację tę wykonano za pomocą systemu komputerowego NIS-Elements. Procentowy stopień naświetlenia sensora kamery CCD obliczono z zależności $P_{10} = [1 - (P_{ca10} - P_{10})/P_{ca10}] \times 100\%$, gdzie P_{ca10} oznacza pole powierzchni całkowitej pierwszych dziesięciu klatek, a przez P_{10} wyrażono pole powierzchni naświetlonej przez łuk na kolejnych dziesięciu klatkach. Otrzymane wyniki (tab. 1) potwierdzają jakościową ocenę wpływu próżni na proces palenia się łuku elektrycznego. Zarówno w przypadku AW 201A, jak i Cu-ETP uzyskano podobną niską wartość procentowego stopnia naświetlenia w warunkach próżni (~18%), przy czym w przypadku pierścieni ze stopu aluminium stopień naświetlenia zmniejszył się w bardzo dużym stopniu, w przybliżeniu pięciokrotnie, podczas gdy dla miedzi stwierdzono jedynie dwukrotne jego zmniejszenie. Przyczyną tego jest fakt, że pierścienie z AW 2017A fragmentują znacznie wcześniej niż z Cu-ETP, a więc wtedy, gdy natężenie prądu pierścienia ma jeszcze dużą wartość. Stąd wyładowanie elektryczne towarzyszące pękaniu pierścienia z AW 2017A jest bardziej intensywne i w znacznie większym stopniu naświetla sensor kamery (82%) niż w przypadku Cu-ETP (35%).

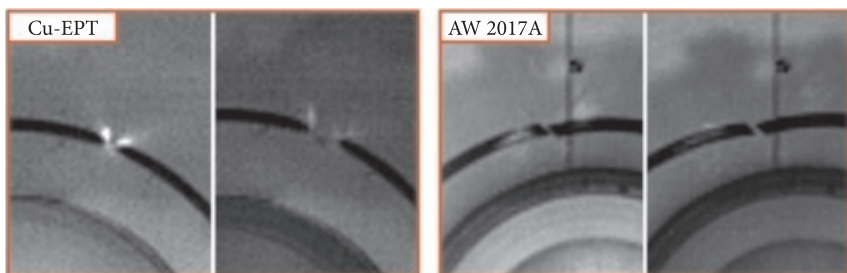
TABELA 1

Procentowy współczynnik naświetlenia klatek P_{10}

Próbka	Ciśnienie	Współczynnik P_{10} [%]
Al 2017A	atmosferyczne	82
Al 2017A	próżnia (6 Pa)	17
Cu-ETP	atmosferyczne	35
Cu-ETP	próżnia (6 Pa)	18

4. Podsumowanie

Przedstawiony w niniejszej pracy próżniowy układ napędzający to kolejny podzespół rozszerzający możliwości badawcze stanowiska do elektromagnetycznej ekspansji pierścieni. Dzięki temu układowi, który wyraźnie ogranicza naświetlenie sensora kamery szybkiej, możliwe było zarejestrowanie wczesnych faz fragmentacji pierścieni. Przykłady oryginalnych kadrów rejestracji optycznych, przedstawiające fragmentację pierścieni ze stopu aluminium i miedzi, zestawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wybrane kadry rejestracji optycznej przedstawiającej proces fragmentacji pierścieni

Artykuł wpłynął do redakcji 31.05.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lipcu 2010 r.

LITERATURA

- [1] J. JANISZEWSKI, W. PICHOLA, *Development of Electromagnetic Ring Expansion Apparatus for High-Strain-Rate Test*, Solid State Phenomena, 147-149, 2009, 645-650.
- [2] H. ZHANG, K. RAVI-CHANDAR, *On the dynamics of necking and fragmentation*, part I. *Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O*, Int. J. Fract., 142, 2006, 183-217.
- [3] J. MAKSYMIAK, *Aparaty Elektryczne*, WNT, Warszawa, 1992.
- [4] Z. CIOK, *Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa, 1976.
- [5] H. MARKIEWICZ, *Urządzenia elektroenergetyczne*, Warszawa, 2001.
- [6] Z. FLISOWSKI, *Technika wysokich napięć*, WNT, Warszawa, 2005.
- [7] H. MARKIEWICZ, K. WOŁKOWIŃSKI, *Urządzenia elektroenergetyczne*, WNT, Warszawa, 1985.

J. JANISZEWSKI, W. PICHOLA, K. MACIASZEK

Electromagnetic expanding ring test at vacuum condition

Abstract. The structure of the vacuum loading assembly for electromagnetic ring expansion at the low-pressure condition is described in this paper. By the use of developed set-up, experimental investigations were performed to determine an influence of vacuum on phenomenon of discharge arc formation and air ionization during fragmentation of ring samples made from Cu-ETP copper and AW 2017A aluminum alloy. The obtained results revealed that due to the vacuum condition, the high overexposure of CCD sensor of high-speed camera resulted from discharge arcs and air ionization generated during ring fragmentation was strongly limited. Moreover, due to vacuum loading assembly, high quality images of the initial stage of the ring fragmentation process were also received.

Keywords: electromagnetic expanding ring test, fragmentation material properties