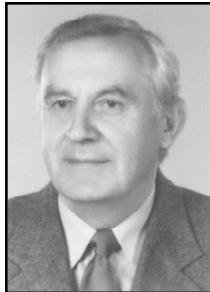


Józef BEDNARCZYK, Gerard GŁUCH, Edward WOJNAR, Tomasz ZAŁUSKI
 AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA AUTOMATYZACJI PROCESÓW

Pomiary przemieszczenia blach formowanych elektrodynamicznie z wykorzystaniem czujnika światłowodowego

Dr hab. inż. Józef BEDNARCZYK, Prof. AGH

Profesor nadzwyczajny Akademii Górniczo-Hutniczej. Tematyka prowadzonych przez niego prac naukowych i dydaktycznych dotyczy metrologii oraz mechanizacji i robotyzacji procesów przemysłowych, a szczególnie obszar jego zainteresowań badawczych jest związany z obróbką metali w impulsowym polu magnetycznym. Jest autorem zwartych wydawnictw i podręczników akademickich, publikacji i patentów poświęconych wspomnianej tematyce.



e-mail: bednarcz@agh.edu.pl

Dr inż. Gerard GŁUCH

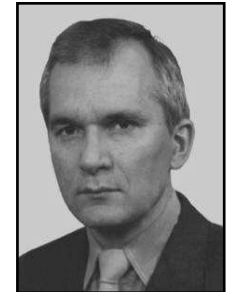
Ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w 1995 roku. Aktualnie jest adiunktem w Katedrze Automatykacji Procesów na Wydziale IMiR Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Główne zainteresowania związane są z obróbką plastyczną metali w impulsowym polu magnetycznym, materiałami wrażliwymi na pole magnetyczne oraz programowaniem sterowników logicznych. Jest współautorem kilkunastu publikacji krajowych i zagranicznych.



e-mail: gluch@imr.agh.edu.pl

Dr Edward WOJNAR

Absolwent Uniwersytetu Jagiellońskiego specjalność fizyka wysokich energii i promieniowania kosmicznego. Doktorat na temat konstrukcji optycznych analizatorów gazów spalinowych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo – Hutniczej. Adiunkt w Katedrze Urządzeń Technologicznych i Ochrony Środowiska AGH. Autor i współautor 34 publikacji, 24 patentów, 6 zgłoszeń patentowych z dziedziny analizatorów optycznych i czujników światłowodowych.



e-mail: wojnar@imr.agh.edu.pl

Mgr inż. Tomasz ZAŁUSKI

Ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w 2004 roku. Aktualnie jest doktorantem w Katedrze Automatykacji Procesów na Wydziale IMiR Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Obszarem jego zainteresowań są zagadnienia dotyczące metrologii, obróbki plastycznej metali w impulsowym polu magnetycznym, modelowania z wykorzystaniem metody elementów skończonych.



e-mail: tzałuski@agh.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób wyznaczania na drodze pomiarowej parametrów ruchu elementów blach poddawanych działaniu udarowych sił Lorentza w impulsowym polu magnetycznym, przy wykorzystaniu toru pomiarowego z fotoelektrycznym czujnikiem światłowodowym.

Słowa kluczowe: elektrodynamiczna obróbka metali, optyczne czujniki światłowodowe

Using optical fibre sensor to measure displacement of electrodynamicly formed sheet metal

Abstract

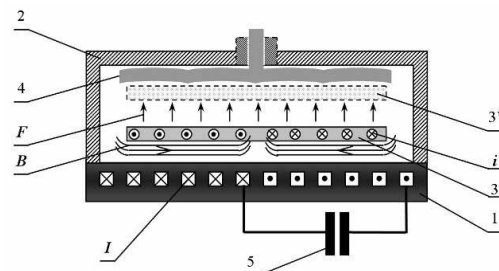
The paper presents measuring method for determining motion parameters for sheet metal elements subject to percussive Lorentz forces in pulse magnetic field. The method uses measuring line with photoelectric optical fibre sensor.

Keywords: Optical fibre sensors, photoelectric displacement measurements

1. Wprowadzenie

Obróbka elektrodynamiczna (ED) jest niekonwencjonalną metodą plastycznego kształtowania, w której wykorzystywane są objętościowe siły Lorentza działające na metalowe elementy umieszczone w impulsowym polu magnetycznym, [6]. W tej technologii narzędzie robocze stanowi walcowa lub spiralna cewka elektryczna, zwana induktorem, połączona z baterią kondensatorów, które po naładowaniu wyładowują się w jej obwodzie prądem oscylacyjnym. Umieszczenie induktora w pobliżu metalowego półwyrobu wywołuje powstanie w nim prądu wirowego wyidukowanego zmiennym polem magnetycznym,

powstającym wokół cewki. W wyniku przepływu wspomnianych prądów powstaje siła Lorentza o charakterze udarowym, powodująca odepchnięcie półwyrobu od zwojów wzmocnionego mechanicznie induktora, co wykorzystuje się w operacjach montażowych a także do kształtowania fragmentu półwyrobu, na przykład rury lub blachy z użyciem matrycy lub bez jej udziału, [1].



Rys. 1. Schemat układu do formowania blach: 1 – płaski induktor; 2 – obudowa matrycy; 3, 3' – obrabiana blacha w położeniach początkowym i końcowym; 4 – matryca; 5 – kondensator; I – prąd w induktorze; i – prąd wirowy w półwyrobie; B – indukacja pola magnetycznego; F – siła Lorentz'a
 Fig. 1. Sheet forming system diagram: 1 – flat inductor; 2 – die block housing; 3, 3' – processed sheet metal in initial and final position; 4 – die block; 5 – condenser; I – current in inductor; i – rotary current in semi-finished product; B – magnetic field induction; F – Lorentz force

Właściwością obróbki w impulsowym polu magnetycznym jest uzyskiwanie przez elementy formowanych półwyrobów chwilowych prędkości rzędu setek m/s w czasie ułamków sekundy, przy czym wartość powstającej siły Lorentza zależy od geometrii układu induktor-półwyrob, zmieniającej się w trakcie obróbki. W tych warunkach do oceny możliwości realizacji określonej operacji obróbczej metodą ED nieodzowna jest znajomość chwilowych wartości wielkości charakteryzujących ruch elementów obrabianego półwyrobu w czasie trwania całego procesu formowania. Pozwala to na przykład przewidywać końcowe kształty swobodnie obrabianego materiału lub w przypadku stosowania matrycy umożliwić ustawienie jej w takiej

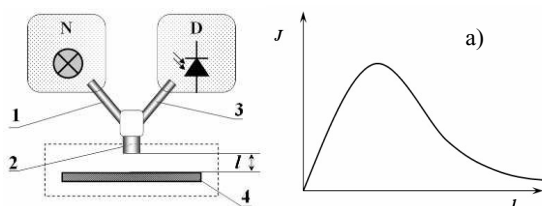
odległości od powierzchni półwyrobu, aby energia kinetyczna przyspieszanego elementu osiągnęła maksymalną wartość w momencie jego zetknięcia się z powierzchnią matrycy.

W artykule przedstawiono wstępne wyniki prac związanych z opracowywaną w Katedrze Automatykacji Procesów (KAP) AGH metodą wyznaczania na drodze pomiarowej wartości przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia elementów blach podczas ich formowania metodą ED. Rys. 1 przedstawia schemat układu do obróbki blach za pomocą płaskiego induktora.

2. Metodyka pomiarów

2.1. Wybór czujnika pomiarowego

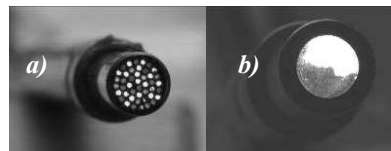
Zgodnie z rozważaną koncepcją przyjęto do realizacji wariant bezpośredniego pomiaru chwilowych położenia blachy przemieszczanej w procesie obróbki ED oraz programowego wyznaczania prędkości i przyspieszenia. Aby w trakcie pomiaru uniknąć zakłóceń wywołanych szybko zmiennymi polami magnetycznymi do pomiaru przemieszczenia zastosowano czujnik fotoelektryczny w wersji światłowodowej, który charakteryzuje się prostą konstrukcją i może być łatwo wbudowany w ograniczony wymiarowo obszar zamknięty przez induktor 1, obrabianą blachę 3 i matrycę 4, które są umieszczone względem siebie w niewielkich odległościach, (rys. 1). Ideę działania takiego czujnika przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat ideowy światłowodowego czujnika odbiciowego: 1 – światłowód nadawczy, 2 – głowica czujnika, 3 – światłowód odbiorczy, 4 – blacha, l – przemieszczenie blachy, N – nadajnik, D – detektor; (a) - Zależność natężenia promieniowania światła odbitego J od odległości l między blachą i głowicą czujnika Rys. 2. Schematic diagram of optical fibre reflective sensor: 1 – transmitting fibre-optic cable, 2 – sensor head, 3 – receiving fibre-optic cable, 4 – sheet metal, l – sheet metal relocation, N – transmitter, D – detector; (a) - Relation between radiation intensity J of reflected light and the distance l between sheet metal and sensor head

Fala świetlna emitowana przez nadajnik N jest transmitowana światłowodem 1 do głowicy czujnika 2. Światło odbite od przemieszczającej się blachy 4 trafia do światłowodu odbiorczego 3 i zostaje doprowadzone do detektora D. Ogólny charakter zależności natężenia światła J od przemieszczenia l powierzchni odbijającej określa przebieg przedstawiony na rysunku 2a przy czym, w zależności od układu użytych światłowodów, jego zakres przetwarzania może wynosić od jednego do kilkunastu milimetrów, [4, 5].

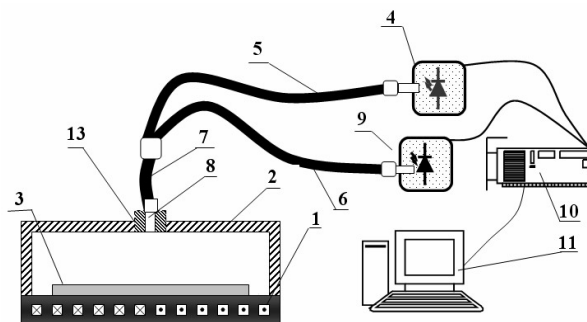
W pomiarach badano dwa rodzaje produkowanych czujników, różniących się typem użytych światłowodów. W czujniku numer I zastosowano światłowód, składający się z 36 pojedynczych włókien światłowodowych rozdzielających się na dwie wiązki (nadawczą i odbiorczą) po 18 włókien w każdej; podstawowe dane światłowodu: średnica rdzenia $\Phi_{r1} = 200 \mu\text{m}$, średnica płaszczki $\Phi_{p1} = 380 \mu\text{m}$, apertura numeryczna $NA_1 = 0,9$, skokowy profil rdzenia. W czujniku numer II użyto światłowodu, składającego się z 3000 luźno ułożonych, pojedynczych włókien światłowodowych nierówno podzielonych na część nadawczą i odbiorczą o większej liczbie włókien; dane techniczne światłowodu: $\Phi_{r2} = 30 \mu\text{m}$, $\Phi_{p2} = 35 \mu\text{m}$, $NA_2 = 54$, skokowy profil rdzenia. Na fotografii, (rys. 3) przedstawiono w powiększeniu widok czoła głowic omawianych czujników.



Rys. 3. Widok czoła głowicy czujników światłowodowych, numer I - (a), numer II - (b); obszar szary – wiązki nadawcze, obszar jasny – wiązki odbiorcze Fig. 3. View of head front of optical fibre sensors, no. I- (a) and no. II- (b): transmitting bundles – grey shade; receiving bundles – light shade

2.2. Stanowisko pomiarowe

Schemat ideowy stanowiska do pomiaru przemieszczenia przedstawia rysunek 4. W układzie fotoelektrycznego przetwornika źródłem światła 4 jest półprzewodnikowa dioda LED o podwyższonej jasności, jej światłość może być zmieniana za pośrednictwem regulatora prądu zastosowanego w obwodzie zasilania. Światło emitowane przez diodę doprowadzane jest za pośrednictwem światłowodu nadawczego 5 do zamocowanej w obudowie matrycy 2 końcówki 8 światłowodu 7, która kieruje go w stronę ułożonej na zwojach induktora 1 blachy 3. Część światła odbitego od powierzchni blachy poprzez światłowód 6 jest przesyłana do fotodetektora 9, którym jest przetwornik OPT 210. Napięciowy sygnał wyjściowy z detektora, proporcjonalny do natężenia światła padającego na jego światłoczułą powierzchnię jest dostarczany poprzez kartę pomiarową 10 do pamięci operacyjnej komputera 11. Karta pomiarowa o częstotliwości próbkowania 100 kHz jest równocześnie kondycjonerem dostarczającym napięcie do zasilania źródła światła 4 i fotodetektora 9.

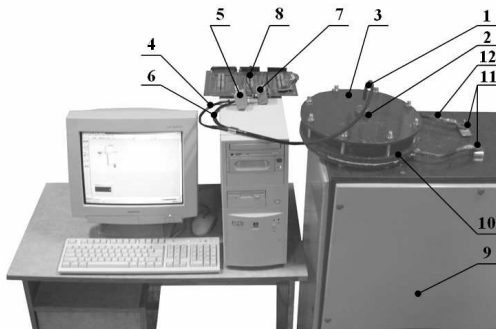


Rys. 4. Schemat ideowy stanowiska do pomiaru parametrów ruchu blachy z zastosowaniem czujnika światłowodowego. Objasnienia w tekście Fig. 4. Schematic diagram of station for measuring sheet metal motion parameters using optical fibre sensor. Explanations in the text

Pomiary realizowano w laboratorium KAP, korzystając ze stanowiska, rys. 5 wyposażonego w udarowy generator 9 o regulowanej energii oraz głowicę 10 do elektrodynamicznego tłoczenia blach, połączoną z wyjściowymi zaciskami 11 generatora. Zasadniczą częścią głowicy jest płaski induktor, (rys. 6) o średnicy 200 mm, nawinięty według spirali Archimedesesa ośmioma podwójnie prowadzonymi zwojami, wykonanymi z miedzianego płaskownika o przekroju $5 \times 10 \text{ mm}^2$. Na stanowisku realizowano również pomiary prądu, płynącego przez zwoje induktora, wykorzystując do tego celu miniaturową sondę indukcyjną 12 naklejaną na przewodzie łączącym induktor z generatorem, (rys. 5). W początkowym położeniu formowana blacha była układana bezpośrednio na roboczej powierzchni induktora, (rys. 6), zaś matrycę wraz z mocującą ją pokrywą 3, (rys. 5) umieszczano nad blachą, w odległości wybieranej za pomocą pierścieni dystansowych 1 pokazanych na rysunku 6.

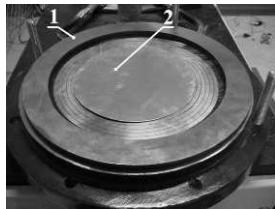
Końcówkę pomiarową 1 światłowodu umieszczono centralnie w osi induktora, unieruchamiając ją za pomocą nakrętki 2 wbudowanej w pokrywę 3 matrycy. Standardowo wykonane przez producenta wtykowe zakończenia wiązek nadawczych 4 i

odbiorczych 6 przewodu światłowodowego zostały doprowadzone do kostek 5 i 7, mieszczących diodę LED i fotoelement OPT210. Ostatnim członem toru pomiarowego był



Rys. 5. Stanowisko pomiarowe. Objaśnienia w tekście
Fig. 5. Measuring station. Explanations in the text

komputer PC wyposażony w kartę pomiarową połączoną przewodami 8 z układami oświetlacza i fotodetektora.



Rys. 6. Głowica induktora: 1 – pierścieni dystansowy, 2 – formowana blacha
Fig. 6. Inductor head: 1 – spacing ring, 2 – formed sheet

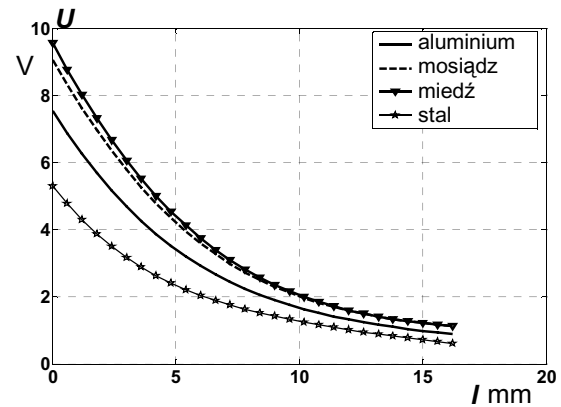
3. Przebieg eksperymentu pomiarowego

3.1. Wyznaczenie charakterystyk statycznych

Charakterystyki statyczne $U(l)$ przetworników używanych w pomiarach wyznaczano mierząc wartości napięcia wyjściowego U fotoelementu odpowiadające odległości l między blachą a końcówką światłowodu, ustawianej za pomocą pierścieni dystansowych 1, (rys. 6) o różnej grubości. Podczas zdejmowania charakterystyk statycznych jak i w czasie prowadzenia pomiarów końcówka światłowodu umieszczona wewnątrz matrycy, była odsunięta od jej powierzchni roboczej na odległość 2 mm. Dzięki temu uniknięto zdarzających się przypadków uszkodzenia światłoczułej powierzchni końcówki w momencie uderzenia blachy w matrycę. Przy takim usytuowaniu końcówki uzyskiwane charakterystyki statyczne układały się wzdłuż opadającego odcinka przebiegu pokazanego na rysunku 2b i nie występowała w nich część narastająca. Na rysunku 7 zamieszczono rodzinę statycznych charakterystyk przetwornika ze światłowodem numer II, wyznaczonych dla blach wykonanych z różnych metali. Czujnik ten używany w dalszych pomiarach, charakteryzuje się mniejszą czułością i większym zakresem pomiarowym w porównaniu z czujnikiem numer I pokazanym na rys.3a. Wykresy z rysunku 7 świadczą o niekorzystnym wpływie współczynnika odbicia blachy na wartość mocy optycznej wprowadzanej do światłowodu odbiorczego w czujniku. W związku z tym konieczne było wyznaczanie charakterystyki statycznej dla każdego rodzaju obrabianej blachy. W celach obliczeniowych wyznaczone charakterystyki statyczne aproksymowano funkcjami kwadratowymi.

3.2. Pomiary parametrów ruchu blach formowanych elektrodynamicznie

W trakcie eksperymentów pomiarowych przeprowadzanych na opisanym stanowisku rejestrowano przebieg płynącego przez



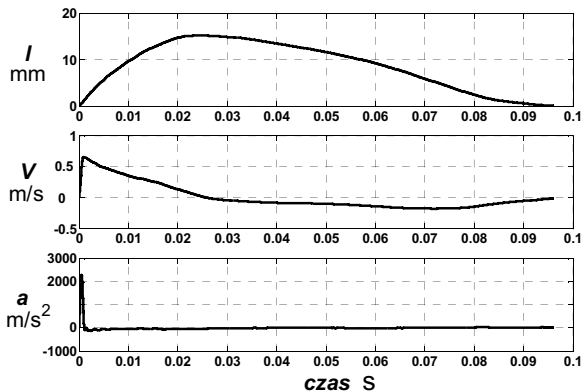
Rys. 7. Charakterystyki statyczne czujnika fotoelektrycznego ze światłowodem nr II
Fig. 7. Static characteristic for sensor with fibre-optic cable no. II, in which fibres are arranged indirectly within the whole range of distance l change

zwoje induktora prądu, będącego źródłem siły Lorentza oraz określano czasowe przebiegi przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia blachy poddanej działaniu tej siły. Badania dotyczyły blach wykonanych z różnych metali. Półwyroby przygotowano w formie krążków różniących się średnicą i grubością. Pomiaru dokonywane były dla energii generatora nie przekraczających wartości 1 kJ. Czasowe przebiegi przemieszczenia uzyskiwano na podstawie zarejestrowanych w czasie t przebiegów napięcia wyjściowego $U(t)$ z detektora przy uwzględnieniu wyznaczonych uprzednio charakterystyk statycznych. Czasowe przebiegi prędkości i przyspieszenia wyznaczano programowo poprzez jednokrotne i dwukrotne różniczkowanie przebiegu przemieszczenia.

Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi przemieszczenia $l(t)$, prędkości $v(t)$ i przyspieszenia $a(t)$ krążka blachy podczas jego ruchu na stanowisku badawczym. Ruch krążka w stronę matrycy, (narastający odcinek przebiegu) jest wywołany działaniem siły Lorentza. Odcinek opadający przebiegu przemieszczenia odpowiada swobodnemu spadaniu blachy na powierzchnię induktora. W eksperymentach pomiarowych, których wyniki są prezentowane w artykule analizowano wyłącznie ruch blachy wywołany działaniem siły Lorentza. Oscylogramy zamieszczone na rysunku 9 obrazują przykładowy zestaw czasowych przebiegów wielkości l , v , a , uzyskanych dla jednej z blach przy różnych energiach generatora. Przebiegi te zostały zsynchronizowane z przebiegiem rejestrowanego równocześnie prądu płynącego w uzwojeniach induktora.

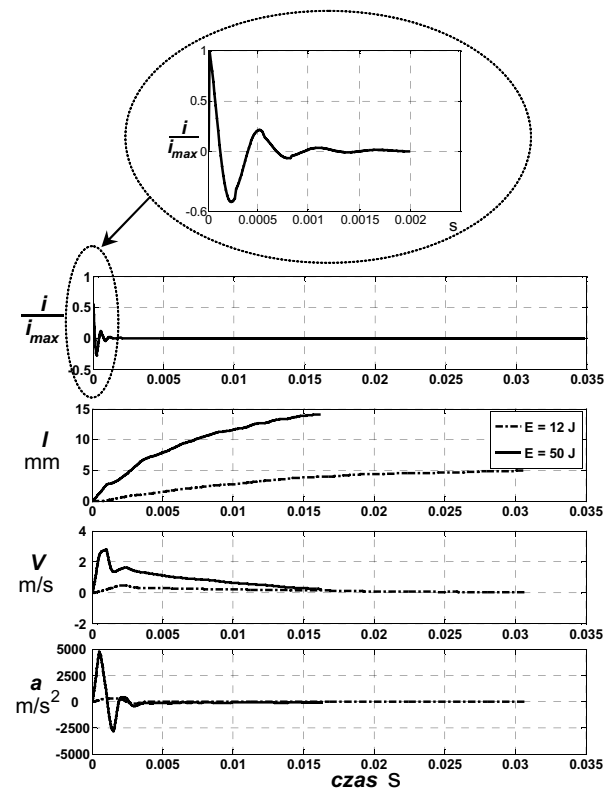
Należy podkreślić, że przedstawione w niniejszym materiale informacje dotyczą początkowego etapu realizowanych w KAP prac w zakresie konstrukcji światłowodowego przetwornika odbiciowego. Przeprowadzone eksperymenty miały charakter pilotowy i wykazały dużą użyteczność przetwornika dla celów pełniejszego poznania specyfiki elektrodynamicznej obróbki. Uzyskiwane na drodze pomiarowej czasowe przebiegi przemieszczenia powierzchni obrabianej blachy mogą być wykorzystywane w procesach swobodnego formowania do wyznaczania możliwego stopnia odkształcenia półwyrobu; rozkłady prędkości ruchu blachy są wielce przydatne w operacjach kształtowania z użyciem matryc o czym wspomniano na wstępie, wreszcie znajomość przyspieszenia pozwala wyznaczyć maksymalne wartości sił, co jest istotne na przykład przy ocenie wytrzymałości induktorów używanych jako narzędzia obróbcze. Pokazane na rysunkach przebiegi zostały zaprezentowane synchronicznie w czasie obrazując charakter zmian wszystkich mierzonych wielkości podczas ruchu blachy w stronę matrycy. Oczywiście dla celów poznawczych dotyczących określonego rodzaju operacji obróbczej można wybrać interesującą wielkość, np. prędkość ekspozując jej przebieg w określonym przedziale czasu, co zostało zobrazowane na rysunku 10. Ważne jest również aby projektując określoną wersję czujnika odbiciowego stosować rozwiązania konstrukcyjne

pozwalające uzyskać pełną informację pomiarową; przy pomiarze przemieszczenia przydatny jest przetwornik o dużym zakresie pomiarowym, natomiast do pomiarów prędkości czy



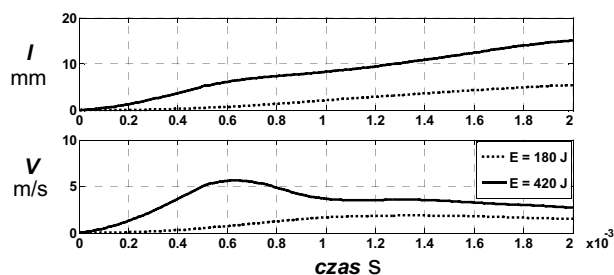
Rys. 8. Przykładowe przebiegi wielkości charakteryzujących ruch blachy w czasie elektrodynamycznego formowania: l – przemieszczenie v – prędkość, a – przyspieszenie

Fig. 8. Example function graphs for quantities that characterise sheet motion during electrodynamic forming: l – relocation, v – velocity, a – acceleration



Rys 9. Czasowe przebiegi prądu w induktorze oraz wielkości charakteryzujących ruch krążka aluminiowej blachy o wymiarach: grubość $g = 0,8$ mm, średnica $d = 150$ mm, przy różnych wartościach energii E generatora;

Fig. 9. Time function graphs of current in inductor and motion parameters for aluminium sheet disk sized: thickness $g = 0.8$ mm, diameter $d = 150$ mm at different energy E values for generator



Rys. 10. Przebiegi przemieszczenia i prędkości dla krążków blachy stalowej o grubości $g = 0,2$ mm oraz średnicy $d = 150$ mm, przy różnych wartościach energii E generatora

Fig. 10. Function graphs of relocation and velocity for steel sheet disks - thickness $g = 0.2$ mm and diameter $d = 150$ mm, at various generator energy E values

przyspieszenia celowe jest wykorzystanie światłowodów o zwiększonej czułości przy ograniczonym zakresie pomiarowym, np. wersja ze światłowodem pokazanym na rysunku 3a.

Na błąd pomiaru przetwornikiem składają się błędy cząstkowe spowodowane: sposobem przetwarzania mierzonej wielkości w obrębie samego przetwornika, obróbką sygnału pomiarowego oraz oddziaływaniem czynników zewnętrznych. W omawianych pomiarach sumaryczny błąd zależał w głównej mierze od niedokładności powstających przy wyznaczaniu charakterystyki statycznej i jej aproksymacji funkcją monotoniczną oraz błędów przetwarzania sygnału w operacyjnych członach różniczkujących. Istotne jest również zakłócające oddziaływanie zewnętrzne, ujawnione przy kalibracji, które pojawia się w wyniku trudnej do przewidzenia zmiany barwy blachy w procesie obróbczym. Podczas prowadzonych pomiarów utrzymywano niezmienną barwę powierzchni blachy. Największy błąd, nieprzekraczający wartości 6% oszacowano przy pomiarze przyspieszenia.

Głównym celem prac prowadzonych w pierwszym okresie było opracowanie i ocena użyteczności przetworników światłowodowych dla technologii ED, na tym etapie nie prowadzono pogłębionej analizy błędów ani nie podejmowano prób poprawienia dokładności pomiaru, przewidując takie działania w toku dalszych badań.

4. Zakończenie

W celu poznania specyfiki udarowej obróbki metali w impulsowym polu magnetycznym niezwykle przydatna jest znajomość parametrów ruchu elementów formowanych tą metodą. Wyznaczanie ich wartości analitycznie nie jest łatwe ze względu na złożoność występujących w trakcie obróbki zjawisk fizycznych o charakterze elektromechanicznym, które opisywane są z wykorzystaniem modeli matematycznych o różnym stopniu uproszczenia. W związku z tym szczególnego znaczenia nabiera możliwość wyznaczania wartości tych wielkości na drodze pomiarowej. W artykule przedstawiono zastosowanie fotoelektrycznego czujnika światłowodowego do pomiaru przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia blach, kształtowanych w impulsowym polu magnetycznym z wykorzystaniem płaskiego induktora. Dzięki użyciu w pomiarach wymienionego czujnika uniknięto zakłóceń wywołanych występowaniem zmiennych pól magnetycznych. Wykorzystano również możliwość łatwego montażu jego elementów w ograniczonej wymiarowo przestrzeni induktor-półwyrób-matryca.

5. Literatura

- [1] Bednarczyk J., Głuch G.: Realizacja operacji montażowych metodą elektrodynamyczną. Technologia i automatyzacja montażu nr 4, 1998, str. 39 - 43.
- [2] Bednarczyk J., Głuch G.: Experimental determination of motion parameters during pipe bulging in pulse magnetic field. Proceeding of ICCO, Ostrava-Beskydy, Czech Republic 2002, str. 323 - 328.
- [3] Bednarczyk J., Głuch G., Kot A.: Pomiary wielkości charakteryzujących elektrodynamyczną obróbkę metali. Pomiary Automatyka Kontrola nr 12, grudzień 2002, str.15 - 18.
- [4] Kaczmarek Z.: Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe. Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa grudzień 2006.
- [5] Kuszniar J., Dorosz J.: Światłowodowy czujnik odbiciowy. V Konferencja Światłowody i ich zastosowanie, Białowieża, 1995, str.: 83 - 85.
- [6] Plum M.: Electromagnetic forming. Metals Handbook, 9th edition, ASM, vol. 14, Metals Park, OH, 1988, str. 644 - 653.
- [7] Webster J. G.: The measurement instrumentation and sensors handbook. CRC Press LLC, Canada 1999.
- [8] Załuski T.: Parametry ruchu elementów blach formowanych elektrodynamicznie z wykorzystaniem czujników światłowodowych. Praca magisterska, AGH Kraków 2006.