

## MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA TECHNIK KSZTAŁTOWANIA IMPULSEM ELEKTROMAGNETYCZNYM W PRZEMYSŁE MOTORYZACYJNYM

*Postęp w wielu dziedzinach przemysłu i związane z tym zapotrzebowanie na elementy o złożonych kształtach, których wytworzenie za pomocą klasycznych metod jest ograniczone lub wręcz niemożliwe, sprawiło, że wzrosło zainteresowanie metodami kształtowania z dużymi prędkościami. W artykule przedstawiono charakterystykę technologii kształtowania elementów za pomocą impulsu elektromagnetycznego oraz wybrane przykłady jej zastosowania w przemyśle motoryzacyjnym.*

### WSTĘP

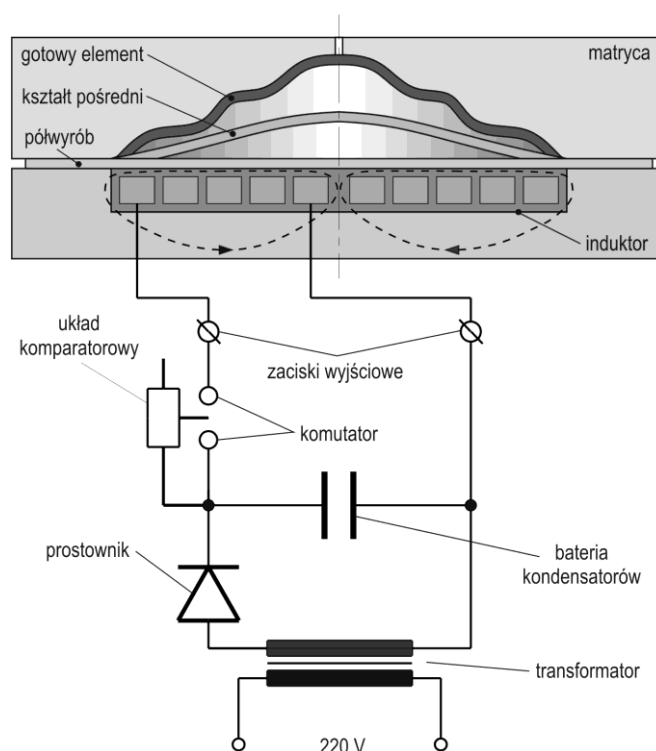
Wśród metod formowania z dużymi prędkościami m.in. wybuchowych, elektrohydraulicznych oraz elektromagnetycznych na szczególne zainteresowanie zasługują tłoczenie impulsem elektromagnetycznym. Pozostałe metody są kłopotliwe do realizacji i nie znajdują szerszego zastosowania przemysłowego. Podczas tłoczenia elektrohydraulicznego do odkształcenia plastycznego materiału wykorzystuje się falę uderzeniową, która powstaje podczas wyładowania elektrohydraulicznego elektrod w cieczy. Podczas tłoczenia wybuchowego czynnikiem wymuszającym odkształcenie materiału jest rozchodząca się w cieczy fala uderzeniowa powstała po wyzwoleniu energii chemicznej ładunku wybuchowego. Ciśnienie działające na powierzchnię odkształcanego elementu może osiągać wartości rzędu kilkuset do kilkudziesięciu tysięcy MPa.

Tłoczenie impulsem elektromagnetycznym (EMPF, ang. ElectroMagnetic Pulse Forming) jest metodą obróbki plastycznej charakteryzującą się wysokimi prędkościami kształtowania wykorzystującą siłę Lorentza powstającą w impulsowym polu magnetycznym wytworzonym przez dwa obwody przewodzące szybkozmienny prąd elektryczny [1, 2].

### 1. CHARAKTERYSTYKA KSZTAŁTOWANIA IMPULSEM ELEKTROMAGNETYCZNYM

Schemat urządzenia do obróbki metali w polu magnetycznym przedstawia rys. 1. Można tu wyróżnić dwa zespoły: energetyczny i technologiczny [3]. W skład zespołu energetycznego wchodzi transformator, wysokonapięciowy prostownik, bateria kondensatorów, komutator oraz układ komparatorowy sterujący jego pracą i zaciski wyjściowe. Zespół technologiczny tworzą induktor (cewka elektryczna), odkształcany materiał oraz matryce kształtowe. Bateria kondensatorów jest ładowana stałym napięciem do chwili osiągnięcia wartości krytycznej, po której impuls z układu komparatorowego wywołuje zamknięcie obwodu komutatora i wyładowanie kondensatorów prądem w obwodzie induktora. Indukowany w formowanym wsadzie prąd wirowy powoduje powstanie siły Lorentza, wywierającej ciśnienie na materiał. Wartość powstającej siły Lorentza zależy od geometrii układu induktor-półwyrob [4].

Cechą charakterystyczną technologii kształtowania impulsowym polem magnetycznym jest uzyskiwanie przez elementy formowanych półwyrobów chwilowych prędkości rzędu setek m/s w czasie ułamków sekundy [4].

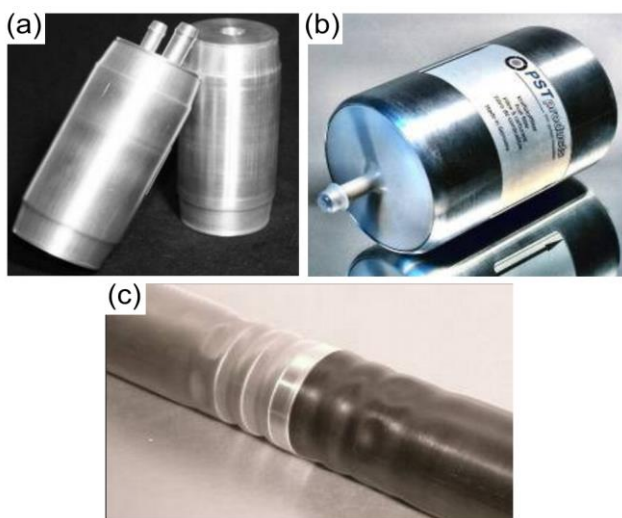


**Rys. 1.** Schemat urządzenia do kształtowania blach za pomocą impulsu elektromagnetycznego

Podczas procesu elektromagnetycznego kształtowania blach krótkotrwały impuls prądu przepływającego przez induktor wytwarza impuls pola elektromagnetycznego o dużym natężeniu, co powoduje powstanie w materiale kształtowanym prądów wirowych. Skumulowana energia w bateriach kondensatorów (zwykle 1-100 kJ) pod wysokim napięciem (zazwyczaj 2-20 kV) jest rozładowywana w postaci pola magnetycznego w pobliżu przedmiotu obrabianego. Ciśnienie magnetyczne zwykle w czasie nacisku 10-30 ms osiąga wartość przekraczającą 250-300 MPa..

Technika EMPF jest szczególnie pożądana w przemyśle samochodowym, gdzie od wielu lat występuje tendencja do zmniejszania ciężaru pojazdów przez stosowanie np. blach ze stopów aluminium oraz stopów magnezu [5, 6]. Przykładami wyrobów kształtowanych elektromagnetycznie są m.in. zbiorniki ciśnieniowe w systemach klimatyzacyjnych samochodów osobowych (rys. 2a), zaciskane elektromagnetycznie filtry paliwa, w których łączy się elementy z aluminium oraz tworzywa sztucznego (rys. 2b). Techno-

logię EMPT można również wykorzystać do formowania połączeń zaciskowych. Przykładem jest element wyposażenia samochodu powstały przez połączenie rur ze stali i aluminium (rys. 2c) oraz połączenie elementów wału napędowego (rys. 3). Czynnikiem, który predestynuje dany materiał do obróbki metodą elektromagnetyczną jest wysoka przewodność elektryczna [7-9]. Materiały o dobrych właściwościach plastycznych ułatwiają proces obróbki, jednak nie jest to głównym kryterium możliwości aplikacji techniki EMPF. W tabeli 1 przedstawiono wartości przewodności elektrycznej wybranych materiałów. Za granicę poniżej której nie jest możliwa bezpośrednia elektromagnetyczna obróbka plastyczna uważa się wartość przewodności elektrycznej stali niestopowej [10]. Występujący wysoki opór właściwy materiałów wykazujących niską wartość przewodności elektrycznej prowadzi do nadmiernego nagrzewania się blachy oraz do zmniejszenia siły oddziaływania magnetycznego.



**Rys. 2.** (a) zbiornik ciśnieniowy (Ø50 mm) stosowany w systemach klimatyzacyjnych samochodów osobowych, (b) filtr paliwa, (c) element wyposażenia samochodu powstały przez połączenie rur ze stali i aluminium, opracowano na podstawie [11]



**Rys. 3.** Połączenie zaciskowe elementów wału napędowego [11]

**Tab. 1.** Przewodność elektryczna wybranych materiałów

Materiał	Przewodność elektryczna (MS/m)
Srebro	62,87
Miedź Cu99,9	60,09
Złoto	40,60
Aluminium Np.99,99	37,67
Magnez Mg99,9	22,39
Stal niestopowa	9,3
Stal wysokostopowa	1,67
Stal nierdzewna 316	1,33
Tytan Ti99,9	0,58

Ograniczenie dotyczące wartości przewodności elektrycznej można wyeliminować przez zastosowanie tzw. moderatora wykonanego z materiału o wysokiej przewodności magnetycznej. Zastosowanie moderatora umożliwia obróbkę stali wysokostopowych, tytanu oraz materiałów nieprzewodzących prądu elektrycznego.

Odształcanie blach w technologii EMPF odbywa się bezkontaktowo, eliminując tarcie, które jest jednym z podstawowych zjawisk ograniczających stopień odształcenia materiału oraz uzyskanie określonej chropowatości powierzchni wyrobu. Tarcie występujące przy dużych wartościach nacisków istotnie różni się od zjawisk występujących przy małych obciążeniach oraz w węzłach kinematycznych maszyn z uwagi na duży wpływ odształceń plastycznych mogących intensyfikować wiele zjawisk w strefie kontaktu. Tarcie wywiera istotny wpływ na przebieg procesu płynięcia materiału, rozkład temperatury w strefie kontaktu blachy z narzędziami, wielkość odształcenia kształtowanego metalu, jakość powierzchni gotowego wyrobu a także na stopień zużycia narzędzi

Brak kontaktu mechanicznego pomiędzy odształcanym materiałem a cewką oraz duża wartość nacisków wywieranych na powierzchnię blachy korzystnie wpływa na stan i jakość powłok naniesionych na blachę. Proces EMPF jest przyjazny dla środowiska – nie wymaga stosowania smaru oraz w wielu przypadkach nie zachodzi konieczność mycia wyrobu.

W procesach tłoczenia, zarówno metodą konwencjonalną jak i za pomocą metody elektromagnetycznej, wielkość odształcenia, jakiego może doznać blacha jest ograniczona. Parametrem, który decyduje o wartości odształceń blachy jest prędkość odształcenia. Podczas elektromagnetycznego wywierania naprężeń rozciągających w materiale granica plastyczności może zostać przekroczona nawet o 60% bez ryzyka zniszczenia materiału. Wymuszenie dużych odształceń plastycznych blach powoduje niebezpieczeństwo utraty stateczności materiału czego wyrazem jest powstanie bruzd, pęknięcie materiału oraz jego faldowanie. Tłoczenie impulsem elektromagnetycznym, ze względu na dużą szybkość formowania, zwiększa podatność blachy do dużych odształceń. Stosowanie wysokich prędkości obróbki związane jest z możliwością uzyskania wyższej tłoczności granicznej blachy w porównaniu do metod klasycznych przeróbki plastycznej. Jednocześnie zmniejszeniu ulega skłonność kształtowanej blachy do faldowania oraz następuje ograniczenie zjawisko sprężynowania powrotnego formowanego elementu. Wielu autorów wskazuje na wysoką powtarzalność kształtu wyrobu bez konieczności czasowej regulacji parametrów technologicznych procesu. Jednocześnie należy podkreślić wysoką elastyczność technologiczną procesu, ponieważ ta sama cewka może być stosowana do wytworzenia przedmiotów o różnych kształtach. W Politechnice Wrocławskiej opracowano także nową metodę tłoczenia elektromagnetycznego wykorzystującą wielokrotne ciągłe rozładowywanie kondensatorów ze ściśle określoną częstotliwością. Zaproponowana metoda wytłaczania elektromagnetycznego pozwala na uzyskanie większej o 32% głębokości wytłoczek w porównaniu do technologii tradycyjnej.

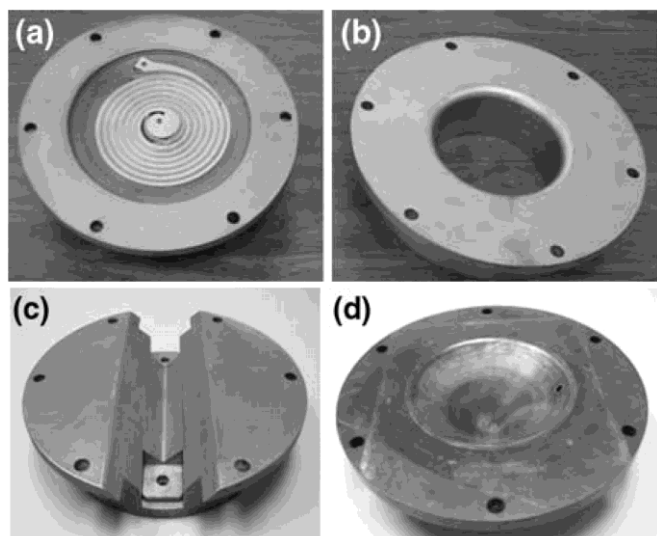
## 2. ODSZTAŁCALNOŚĆ GRANICZNA BLACH

Najczęściej do określenia tłoczności blachy stosuje się wykresy odształceń granicznych, które mogą być wyznaczone analitycznie lub eksperymentalnie. Miarą osiągnięcia odształceń granicznych w wytłoczce jest pojawienie się utraty stateczności w postaci lokalizacji bruzdy, bezpośrednio poprzedzającej pęknięcie materiału. Wartość granicznego odształcenia zależy od stosunku odształceń głównych  $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ . Znajomość wykresu odształceń granicznych  $\varepsilon_2(\varepsilon_1)$  dla określonego gatunku blachy pozwala ocenić niebezpieczeństwo powstania np. bruzdy lub faldowania.

W metodzie kształtowania EMPF, podobnie do procesu tradycyjnego kształtowania blach do wyznaczenia wykresu odkształceń granicznych (WOG) wykorzystuje się np. metodę realizacji złożonych stanów odkształcenia przez odkształcanie próbek o różnej szerokości (rys. 3) na specjalnym przyrządzie składającym się z cewki (rys. 4a) oraz zestawu alternatywnych matryc: z otworem przelotowym (rys. 4b), z wycięciem w kształcie litery V (rys. 4c) oraz matrycy pełnej stożkowej (rys. 4d). Wykonując pomiary odkształceń głównych na powierzchniach próbnych (np. metodą siatek koordynacyjnych) można określić wartości odkształceń przy których występuje niebezpieczeństwo utraty stateczności lub naruszenia spójności.



Rys. 3. Kształty próbek po wyznaczeniu WOG w matrycy z wycięciem w kształcie litery V (1) oraz w matrycy z otworem przelotowym (2), opracowano na podstawie [12]



Rys. 4. Cewka (a) oraz kształty matryc do wyznaczenia WOG podczas kształtowania elektromagnetycznego blach: matryca z otworem przelotowym (b), matryca z wycięciem w kształcie litery V (c) oraz matryca pełna stożkowa (d), opracowano na podstawie [12]

### 3. ZALETY TECHNOLOGII EMPF

Metoda kształtowania impulsem elektromagnetycznym wykazuje wiele zalet, spośród których najważniejsze to [13, 14]:

- osiąga się dużą dokładność wymiarowo-kształtową wyrobów i wydajność,
- istnieje możliwość podwyższenia własności plastycznych blachy poprzez zastosowanie kilka impulsów prądu, przy czym pierwsze z nich są używane do podgrzania materiału,
- brak kontaktu metalicznego blacha-narzędzie (oddziaływanie pola magnetycznego),

- brak konieczności stosowania smaru,
- istnieją możliwości automatyzacji procesu,
- krótki czas obróbki.

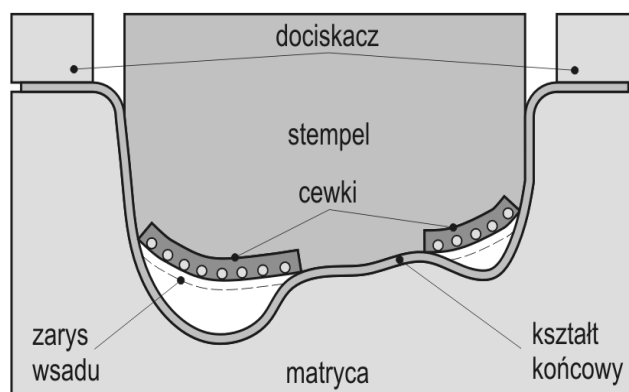
### 4. WADY I OGRANICZENIA TECHNIKI EMF

Technika EMPF nie jest pozbawiona wad i ograniczeń. Podstawowym ograniczeniem jest możliwość obróbki materiałów o wysokiej przewodności elektrycznej, jednakże zastosowanie dodatkowego elementu pośredniego o wysokiej przewodności zwanego moderatorem pozwala na obróbkę nawet materiałów nie przewodzących prądu. Formowanie dużych gabarytowo wytłoczek o skomplikowanej końcowej geometrii oraz blach o dużej grubości za pomocą metody EMPF jest ograniczone ze względu na konieczność zastosowania cewki o dużej mocy [14-16]. Podstawowym czynnikiem, który hamuje powszechne stosowanie EMF są nakłady finansowe związane z zakupem narzędzi i maszyn oraz przede wszystkim technologii kształtowania. W zależności od gatunku materiału obrabianego, grubości blachy, kształtu wyrobu końcowego i tolerancji wymiarowo-kształtowej należy w sposób indywidualny dobrać parametry procesu.

Stosowanie technologii EMPF wymaga spełnienia wysokich wymagań dotyczących aspektów bezpieczeństwa, ponieważ przepływ prądu o dużym natężeniu i wysokim napięciu wywołuje silne pole magnetyczne, mogące zakłócać działanie elementów sterujących oraz wykonawczych instalacji. Przewody elektroenergetyczne przesyłające impulsy muszą być ekranowane płaszczem amortyzującym ich cykliczne odkształcenia.

### 5. METODA HYBRYDOWA

Kształtowanie wytłoczek w metodzie hybrydowej łączącej zalety formowania elektromagnetycznego i kształtowania konwencjonalnego sztywnymi narzędziami (EMAS, ang. ElectroMagnetic-Assisted Stamping) odbywa się dwuetapowo [17, 18]. W pierwszym etapie tłoczenia przybliżony kształt uzyskiwany jest za pomocą stempla tradycyjnego przy niskiej prędkości odkształcania. W drugim etapie ostateczny kształt otrzymuje się za pomocą wbudowanych w narzędzia cewek (rys. 5). Cewki są umieszczane w miejscach o wysokim ryzyku utraty stateczności blachy podczas tłoczenia konwencjonalnego. Zastosowanie drugiego etapu obróbki blachy umożliwia otrzymanie wyrobu przy przekroczeniu o 25% wartości odkształceń granicznych materiału odpowiadających metodzie konwencjonalnej. Ważniejsza niż zmiana w wartości odkształceń granicznych blachy jest zdolność systemu hybrydowego do zmiany rozkładu odkształceń na taki, który nie może być uzyskany sposobem tradycyjnym [19].



Rys. 5. Schemat wytłaczania blachy wspomaganego elektromagnetycznie

## PODSUMOWANIE

Charakter metody EMPF będący połączeniem zjawisk elektromagnetyczno-mechanicznych sprawia, że przewidzenie przez technologa zachowania się blachy podczas odkształcenia jest bardzo trudne. Pomimo stosowania metody elementów skończonych do analizy kształtowania impulsem elektromagnetycznym wciąż jeszcze rozwijane są modele teoretyczne umożliwiające dobór parametrów procesu. O ile wykonanie odpowiednich narzędzi w wielu przypadkach jest możliwe to analiza ekonomiczna procesu elektromagnetycznego wciąż przemawia jednak za wykorzystaniem alternatywnych technologii wytwarzania. Należy mieć nadzieję, że zapotrzebowanie przemysłu samochodowego oraz lotniczego na innowacyjne technologie przełoży się na większe zainteresowanie technologią EMPF. Najbardziej obiecującą techniką zmniejszającą technologiczne ograniczenia kształtowania stopów aluminium jest tłoczenie hybrydowe będące połączeniem klasycznego wytlaczenia oraz kalibracji elektromagnetycznej.

## BIBLIOGRAFIA

1. Psyk V., Kurka P., Kimme S., Werner M., Landgrebe D., Ebert A., Schwarzendahl M., *Structuring by electromagnetic forming and by forming with an elastomer punch as a tool for component optimisation regarding mechanical stiffness and acoustic performance*, "Manufacturing Review" 2015, vol. 2.
2. Seth M., Vohnout V., Daehn G., *Formability of steel sheet in high velocity impact*, "Journal of Materials Processing Technology" 2005, vol. 168.
3. Bednarczyk J., *Obróbka metali w polu magnetycznym i możliwości jej automatyzacji*, "Pomiary, Automatyka, Kontrola" 2002, tom 48.
4. J. Bednarczyk, G. Głuch, E. Wojnar, T. Załuski, *Pomiary przemieszczenia blach formowanych elektrodynamicznie z wykorzystaniem czujnika światłowodowego*, "Pomiary, Automatyka, Kontrola" 2007, nr 9.
5. Kroll L., Blau P., Wabner M., Frieß U., Eulitz J., Klärner M., *Lightweight components for energy-efficient machine tools*, "CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology" 2011, vol. 4.
6. Carruth M.A., Allwood J.M., Moynihan M.C., *The technical potential for reducing metal requirements through lightweight product design*, "Resources, Conservation and Recycling" 2011, vol. 57.
7. El-Azab A., Garnich M., Kapoor A., *Modeling of the electromagnetic forming of sheet metals: state-of-the-art and future needs*, "Journal of Materials Processing Technology" 2003, vol. 142.
8. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M., *Electromagnetic forming - A review*, "Journal of Materials Processing Technology" 2011, vol. 211.
9. Senrhilnathan N., Venkatachalam G., Satonkar N.N., *A two stage finite element analysis of electromagnetic forming of perforated aluminium sheet metals*, "Procedia Engineering" 2014, vol. 97.
10. Schäfer R., Pasquale P.A., Kallee S., *The electromagnetic pulse technology (EMPT): forming, welding, crimping and cutting*, <http://www.pstproducts.com/> (dostęp: 20-02-2016).
11. <http://www.english.pstproducts.com/Automotive%20Applications%20of%20EMPT.pdf> (dostęp: 20-02-2016).
12. Golovashchenko S.F., *Material formability and coil design in electromagnetic forming*, "Journal of Materials Engineering and Performance" 2007, vol. 16.
13. Merich A., Feliachi M., Mohellebi H., *Electromagnetic forming of thin metal sheets - magnetics*, "IEEE Transactions" 2000, vol. 36.
14. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Kladas A.G., Koumoutsos A.K., Ovchinnikov S.G., *Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet using a grooved die: numerical modelling*, "Physics of Metals and Metallography" 2006, vol. 102.
15. Takatsu N., Kato M., Sato K., Tobe T., *High speed forming of metal sheets by electromagnetic force*, "Japan Society of Mechanical Engineers - International Journal" 1988, vol. 31.
16. Arumugam P., ShanmugaSundaram K., KamalaKannan N., *Experimental study of electromagnetic sheet metal forming process*, "Procedia Engineering" 2014, vol. 97.
17. Gayakwad D., Dargara M.K., Sharma P.K., Purohit R., Rana R.S., *A review on electromagnetic forming process*, "Procedia Materials Science" 2014, vol. 6.
18. Okoye C.N., Jiang J.H., Hu Z.D., *Application of electromagnetic-assisted stamping (EMAS) technique in incremental sheet metal forming*, "International Journal of Machine Tools and Manufacture" 2006, vol. 46.
19. Zimniak Z., Radkiewicz G., *Nowa metoda tłoczenia elektromagnetycznego*, "Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Mechanika" 2011, z. 238.

### The possibility of using techniques of shaping the electromagnetic pulse in automotive industry

*Progress in many areas of industry and demand for components with complex shapes, which production by using conventional methods is limited or impossible, has increased the interest in methods of high-speed forming. The article presents the characteristics of the technology of forming elements by using electromagnetic pulse, and some examples of its application.*

Autorzy:

Dr inż. **Irena Nowotyńska** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Zakład Informatyki w Zarządzaniu, e-mail: [i\\_nowot@prz.edu.pl](mailto:i_nowot@prz.edu.pl)

Dr hab. inż. **Tomasz Trzepieciński** – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Katedra Przeróbki Plastycznej, e-mail: [tomtrz@prz.edu.pl](mailto:tomtrz@prz.edu.pl)