

## Metody zwiększania efektywności przepłukiwania katalizatorów samochodowych ciekłym metalem

**Streszczenie.** Artykuł dotyczy analizy procesu wypłukiwania metali szlachetnych z wkładów katalizatorów umieszczonych w pierścieniowym kanale przy pomocy ciekłego metalu wprawianego w ruch przez wirujące pole elektromagnetyczne. Wykorzystany w pracy model obliczeniowy obejmował sprzężenie pola elektromagnetycznego i hydrodynamicznego z uwzględnieniem przepływu metalu przez kapilarną strukturę katalizatora. W ramach badań przeprowadzono analizę wpływu lokalizacji wzbudnika na efektywność przepłukiwania wsadu katalizatora.

**Abstract.** The paper concerns of precious metals washing out from auto catalytic converters placed in the channel. In this device liquid metal is forced to motion by the rotating magnetic field. The model used in research included the coupling of the electromagnetic and hydrodynamic field taking into account the metal flow through anisotropic porous structure of the catalyst. The study analyzes the influence of inductor location on the efficiency of flushing the catalyst. (**Methods of increasing the flushing efficiency of automobile catalytic converters by liquid metal**).

**Słowa kluczowe:** magneto hydrodynamika, odzyskiwanie metali, katalizatory samochodowe.

**Keywords:** magneto hydrodynamics, metal recovery, automotive catalyst.

doi:10.12915/pe.2014.02.16

### Wprowadzenie

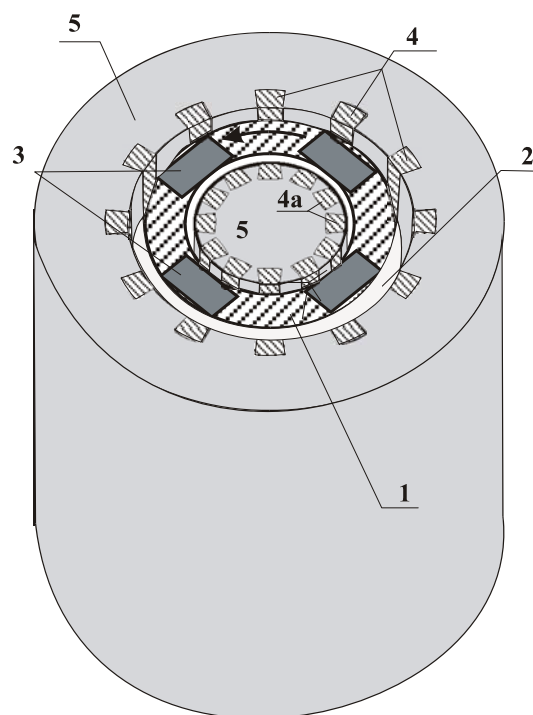
Zużyte katalizatory zawierające w swoim wnętrzu metale szlachetne stanowią bardzo atrakcyjny przedmiot recyklingu [1]. Jednakże proces odzysku tych atrakcyjnych surowców napotyka znaczące trudności. Pojedynczy katalizator zawiera co najwyższej kilka gramów platynowców oraz są one uwięzione w kapilarnej strukturze jego zwykle ceramicznego nośnika. Z tego powodu, warunkiem ekonomicznej opłacalności takiego procesu jest maksymalne obniżenie kosztów obróbki pojedynczego katalizatora. Autorzy zaproponowali i opatentowali technologię opartą o wypłukiwanie platynowców ze struktury katalizatora przy pomocy ciekłych metali. Technika ta nie wymaga mielenia ceramicznych nośników, co pozwala zredukować koszty. Ponieważ mechaniczne wymuszenie przepływu bardzo agresywnego medium, jakim jest stopiony metal, w warunkach wielkoseryjnego procesu recyklingu katalizatorów jest praktycznie niemożliwe, autorzy zaproponowali metodę bezkontaktową opartą na działaniu wirowego pola elektromagnetycznego oraz zjawisk magneto hydrodynamicznych. Niestety taka metoda wprawiania w ruch metalu komplikuje dodatkowo zagadnienie, ponieważ pole elektromagnetyczne oddziałuje na metal tylko poza obszarem katalizatora, czyli poza strefą, w której chcielibyśmy uzyskać przepływ. Warunkiem powodzenia jest wytworzenie, wystarczającej do pokonania oporu kapilarnej struktury nośnika, różnicy ciśnień po obu stronach katalizatora.

Dotychczasowe badania opierały się o zastosowanie trójfazowego wzbudnika umieszczonego na zewnątrz kanału [2-4]. Ponieważ w przypadku wzbudnika zasilanego częstotliwością sieciową pole elektromagnetyczne wnikało jedynie do połowy szerokości kanału, powstała niejednorodność rozkładu sił wytwarzała wiry pomiędzy katalizatorami umieszczonymi w kanale w miejsce wywołania przepływu przez ich strukturę. W efekcie tylko zewnętrzna część wkładu katalizatora była przepłukiwana przez ciekły metal.

Zmiany natężenia prądu wzbudnika oraz częstotliwości zasilania nie poprawiały znacząco efektywności przepłukiwania wsadów katalizatora. Jedynie zwiększenie odstępów pomiędzy katalizatorami poprawiało intensywność przepływu przez strukturę kosztem znaczącego spadku sprawności elektrycznej urządzenia [4].

W artykule przedstawiono serię eksperymentów numerycznych mających na celu ocenę wpływu lokalizacji

wzbudnika względem kanału na rozkład prędkości ciekłego metalu. Przeanalizowano wariant z wzbudnikiem na zewnątrz kanału, w jego wnętrzu i oraz dwoma wzbudnikami na zewnątrz i wewnątrz kanału (rys.1). Obliczenia były prowadzone na przykładzie ciekłego ołowiu, jako medium wypłukującego metale szlachetne z katalizatora.



Rys.1. Geometria modelu obliczeniowego 1 – kanał z ciekłym metalem, 2 – powietrze, 3- katalizator, 4- uzwojenie zewnętrzne, 4a – uzwojenie wewnętrzne, 5 – rdzeń magnetyczny

### Model procesu

Model procesu wymaga uwzględnienia sprzężenia pomiędzy polem elektromagnetycznym i polem hydrodynamicznym. Z powodu niskiej wartości magnetycznej liczby Reynoldsa w analizowanym procesie możliwe było zastosowanie słabego, jednokierunkowego sprzężenia pomiędzy polem elektromagnetycznym i

hydrodynamicznym. Pozwoliło to przeprowadzić obliczenia w dwóch niezależnych etapach. Na pierwszym etapie wyznaczono rozkład pola gęstości sił elektromagnetycznych działających na ciekły metal, w drugim obliczono pole prędkości tego metalu przepływającego przez kanał i strukturę kapilarną katalizatorów.

Obliczenia były prowadzone dla geometrii 2D z uwzględnieniem periodyczności obrotowej układu. Rys. 1 przedstawia zastosowaną geometrię modelu.

Analiza pola elektromagnetycznego była prowadzona w oparciu o równania Maxwella uzupełnione przez uogólnione prawo Ohma. Obliczenia zostały uproszczone poprzez przejście z analizy w dziedzinie czasu do analizy symbolicznej. Analiza pola elektromagnetycznego była oparta o zależność (1) wykorzystującą wektorowy potencjał magnetyczny  $A$  standardowo wykorzystywane w quasi-statycznych zagadnieniach elektrostatycznych [5,6]:

$$(1) \quad \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + j\omega \sigma \mathbf{A} = \mathbf{J}_s$$

gdzie:  $\mu$ ,  $\sigma$  – przenikalność magnetyczna i przewodność ciekłego metalu,  $\omega$  – częstość kątowna,  $J_s$  – gęstość prądu źródłowego

Indukcja elektromagnetyczna  $B$  i gęstość prądów wirowych  $J$  zostały wyznaczona z równania (1) po uwzględnieniu zależności:

$$(2) \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$(3) \quad \mathbf{J} = j\omega \sigma \mathbf{A}$$

Wylczenie z powyższych równań indukcji magnetycznej i gęstości prądów wirowych pozwala wyznaczyć rozkład uśrednionej w czasie gęstości sił elektromagnetycznych  $f_e$  oddziałujących na ciekły metal.

$$(4) \quad f_e = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{J} \times \mathbf{B}^*)$$

gdzie:  $f_e$  – gęstość objętościowa sił,  $B^*$  wartość sprzężona do  $B$ .

W analizowanym modelu nieliniowość dla pola elektromagnetycznego występuje tylko w obszarze rdzeni magnetycznych, ale jak wykazano w pracy [7], jeżeli rdzeń jest zaprojektowany prawidłowo, nie powinna ona mieć znaczącego wpływu na wyniki. Z tego powodu obliczenia elektromagnetyczne przeprowadzono dla modelu liniowego. Wykorzystano komercyjne oprogramowanie Cedrad Flux2D.

Pole przepływu było modelowane w oparciu o rozwiązanie równania Navier-Stokesa i równania ciągłości dla płynów nieściśliwych. Z powodu przestrzennej orientacji obszaru w równaniu nie uwzględniono siły grawitacji. Obliczenia były prowadzone metodą objętości skończonych w przestrzeni dwuwymiarowej przy pomocy oprogramowania Ansys Fluent.

W obszarach kanału nie zajętych przez wsady kolektorów, równanie Naviera Stokes przyjmowało postać (5). W obszarze tym przyjęto standardowy model turbulencji k-epsilon.

$$(5) \quad \rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta_e \nabla^2 \mathbf{v} + f_e$$

gdzie:  $\mathbf{v}$  – prędkość metalu,  $p$  - ciśnienie,  $\eta_e$  - lepkość efektywna wyznaczona z modelu turbulencji k- $\epsilon$ ,  $\rho$  - gęstość,  $f_e$  – gęstość siły elektrodynamicznej.

Obszary zajmowane przez wsady katalizatorów były modelowane jako anizotropowe medium porowate, w którym występuje przepływ laminarny i spadek ciśnienia zgodny z równaniem Hagen-Poiseuille'a:

$$(6) \quad \frac{\Delta p}{L} = \frac{28.5}{d^2} \eta v$$

gdzie:  $\Delta p$  – spadek ciśnienia na długości  $L$  kapilary,  $d$  – zastępcza średnica hydrauliczna kapilary,  $\eta$  – lepkość dynamiczna płynu

W obszarze katalizatora równanie Naviera-Stokesa pojawia się moduł reprezentujący opór ośrodka porowatego, a znika moduł oddziaływania pola sił elektromagnetycznych, ponieważ makroskopowa konduktywność tego obszaru w kierunku przepływu prądu jest zerowa.

$$(7) \quad \rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} - \frac{28.5}{d^2} \eta (\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) \mathbf{n} - \infty (\mathbf{m} \cdot \mathbf{v}) \mathbf{m}$$

gdzie:  $\eta$  – lepkość dynamiczna metalu,  $\mathbf{n}$  – wektor równoległy do kierunku kapilar,  $\mathbf{m}$  – wektor prostopadły do kierunku kapilar.

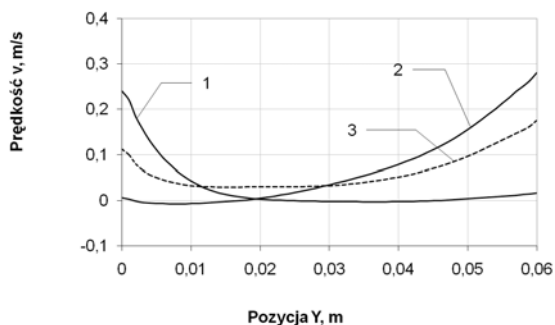
### **Eksperymenty numeryczne**

Jak wspomniano na wstępie, badania prowadzono dla trzech lokalizacji wzbudnika. Obliczenia wykonano dla kanału wypełnionego ciekłym ołowiem o promieniu wewnętrznym 62 mm i zewnętrznym 139 mm. Przyjęte rozmiary pojedynczego wsadu katalizatora to 60x40 mm. Przypadkiem wyjściowym był układ z ośmioma katalizatorami umieszczonymi w kanale, ze wzbudnikiem wewnętrznym i zewnętrznym zasilanym synchronicznie prądem o częstotliwości 50 Hz. W celu uzyskania symetrycznego rozkładu sił przy zewnętrznej i wewnętrznej ścianie kanału, wzbudnik zewnętrzny był zasilany prądem 40A a wewnętrzny 27 A. Moc pobierana przez tak skonfigurowane urządzenie wynosiła 12 kW. W celach porównawczych dla pozostałych dwóch przypadków (tylko ze wzbudnikiem zewnętrznym i tylko wewnętrznym) zmieniono prąd zasilania na odpowiednio 53,3 A i 42,4 A w celu uzyskania takiej samej mocy pobieranej przez układ. Pozwoliło to porównać efektywność przepłukiwania katalizatorów dla poszczególnych rozwiązań w warunkach identycznego poboru energii.

Rysunek 2 przedstawia rozkład prędkości przepływu na przekroju nośnika katalizatora. W przypadku zastosowania pojedynczego wzbudnika na zewnątrz lub wewnątrz kanału już w połowie długości katalizatora prędkość przepływu jest bliska zeru. Oznacza to stratę połowy metali szlachetnych możliwych do odzyskania z tego nośnika. Średnia prędkość przepływu dla wzbudnika zewnętrznego i wewnętrznego wynosi odpowiednio 0,052 m/s i 0,016 m/s. Zastosowanie podwójnego wzbudnika obniża nieznacznie średnią prędkość przepływu w porównaniu do wzbudnika wewnętrznego (do 0,045 m/s) jednak pozwala uzyskać w całym przekroju wsadu katalizatora przepływ przynajmniej na poziomie 0.006 m/s.

W kolejnym etapie zmniejszono o połowę liczbę wkładów katalizatorów w kanale, co dało lepsze warunki przyspieszenia metalu w przestrzeniach pomiędzy katalizatorami, ale jednocześnie o połowę zmniejszyło efektywność układu. Aby umożliwić porównanie wyników z układem ośmiu katalizatorów zmieniono prądy zasilania dla trzech wariantów lokalizacji wzbudnika tak, aby moc przypadająca na jeden z czterech katalizatorów była równa

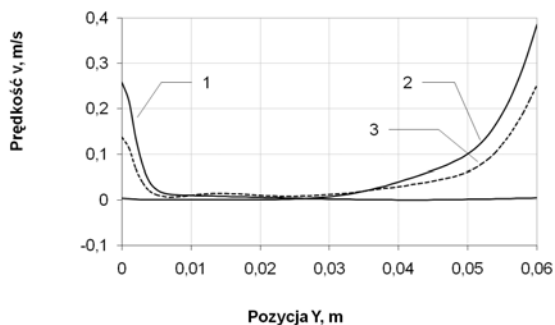
mocy przypadającej na jeden z ośmiu katalizatorów, tzn. 1,5 kW.



Rys.2. Rozkład prędkości na przekroju nośnika dla 8 katalizatorów w kanale: 1- wzbudnik wewnętrzny, 2 – wzbudnik zewnętrzny, 3 – dwa wzbudniki

W kolejnym etapie zmniejszono o połowę liczbę wkładów katalizatorów w kanale, co dało lepsze warunki przyspieszenia metalu w przestrzeniach pomiędzy katalizatorami, ale jednocześnie o połowę zmniejszyło efektywność układu. Aby umożliwić porównanie wyników z układem ośmiu katalizatorów zmieniono prądy zasilania dla trzech wariantów lokalizacji wzbudnika tak, aby moc przypadająca na jeden z czterech katalizatorów była równa mocy przypadającej na jeden z ośmiu katalizatorów, tzn. 1,5 kW.

Rysunek 3 pokazuje radykalną poprawę efektywności przepłukiwania nośnika w przypadku 4 katalizatorów w kanale i podwójnego wzbudnika. Minimalna prędkość przepływu (przy stałym zużyciu mocy 1,5 kW) wyniosła aż 0.03 m/s. Także w przypadku wzbudnika zewnętrznego słabo przepłukiwany obszar katalizatora zmalał do 1/3. Natomiast w przypadku wzbudnika wewnętrznego efektywność spada.



Rys.3. Rozkład prędkości na przekroju nośnika dla 4 katalizatorów w kanale: 1- wzbudnik wewnętrzny, 2 – wzbudnik zewnętrzny, 3 – dwa wzbudniki

## Podsumowanie

Zastosowanie dwustronnego wzbudnika znacząco polepsza warunki przepływu przez obrabiany nośnik katalizatora. W przeciwieństwie do dotychczas rozważanego urządzenia ze wzbudnikiem zewnętrznym zapewnia niezzerową prędkość przepływu w całej objętości katalizatora, co zwiększa efektywność wypłukiwania platynowców. Zwiększenie odstępów pomiędzy katalizatorami poprzez ograniczenie ich liczby w kanale przy zachowaniu stałego wydatku mocy elektrycznej przypadającej na jeden katalizator dodatkowo poprawia efektywność procesu pod względem zużycia energii. Oczywiście odbywa się do kosztów zwiększenia ilości ciekłego metalu zużywanego do przepłukiwania pojedynczego nośnika, ale ponieważ w analizowanym procesie kąpiel metalowa jest wykorzystywana wielokrotnie, w kolejnych cyklach procesu (aż do nasycenia), nie ma to wpływu na efektywność ekonomiczną procesu.

## LITERATURA

- [1] Fornalczyk A., Saternus M., Platinum recovery from used auto catalytic converters in electrorefining process *Metalurgija*, v.52 (2013) pp.219-223
- [2] Fornalczyk A., Golak S., Przyłucki R., Analysis of electromagnetic and flow fields in the channel of a device used for precious metals leaching from auto catalytic converters, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 3a, pp. 57-60
- [3] Fornalczyk A., Przyłucki R., Saternus M., Golak S., Analysis of using magneto-hydro-dynamic pump for the platinum recovery from spent auto catalytic converters, *Archives of Materials Science and Engineering*, 58 (2012), no. 2, pp. 199-204
- [4] Fornalczyk A., Golak S., Przyłucki R., Barglik J. Modeling a flow through a capillary structure of a automotive catalysts forced by an electromagnetic field, *International Conference on Heating by Electromagnetic Sources*, Padua 2013
- [5] Golak S., Zagorski R., Model and optimization of electromagnetic filtration of metals, *Metalurgija*, v. 52 (2013), nr 2, s. 215-218
- [6] Golak S., Wpływ parametrów zasilania na rozkład zbrojenia w kompozycie gradientowym odlewany w polu elektromagnetycznym, *Zeszyty Naukowe. Elektryka*, v. 124 (2012) s. 57-65
- [7] Przyłucki R. Sajdak Cz., Obliczenia parametrów indukcyjnych urządzeń grzejnych do wsadów płaskich, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice 2000

**Autorzy:** dr inż. Agnieszka Fornalczyk, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Instytut Technologii Metali, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, E-mail: [Agnieszka.Fornalczyk@polsl.pl](mailto:Agnieszka.Fornalczyk@polsl.pl); dr inż. Sławomir Golak, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Informatyki przemysłowej, 40-019 Katowice, E-mail: [Sławomir.Golak@polsl.pl](mailto:Sławomir.Golak@polsl.pl); dr inż. Roman Przyłucki, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Informatyki przemysłowej, 40-019 Katowice, E-mail: [Roman.Przyłucki@polsl.pl](mailto:Roman.Przyłucki@polsl.pl).