

doi:10.15199/48.2019.11.11

## Realizacja ultradźwiękowej metody echa do pomiarów wybranych parametrów przepływu ciekły metal-gaz

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono impulsową-ultradźwiękową metodę echa do wyznaczania parametrów przepływów dwufazowych ciekły metal-gaz. Opisano zasadę pomiaru, przedstawiono zrealizowany układ pomiarowy oraz przeanalizowano dokładność metody. W pracy zaprezentowano również przykładowe wyniki z przeprowadzonych badań.

**Abstract.** The article presents a ultrasonic echo pulse method for determining the parameters of diphase liquid metal-gas flows. The principle of measurement is described, the realized measurement system is presented and the accuracy of the method is analysed. The paper also presents exemplary results from the research. (**Implementation of ultrasonic echo method for measurements of selected parameters of diphase liquid metal-gas flows**).

**Słowa kluczowe:** przepływ dwufazowy, metoda ultradźwiękowa, system pomiarowy, dokładność metody

**Keywords:** diphase flow, ultrasonic method, measuring system, method accuracy

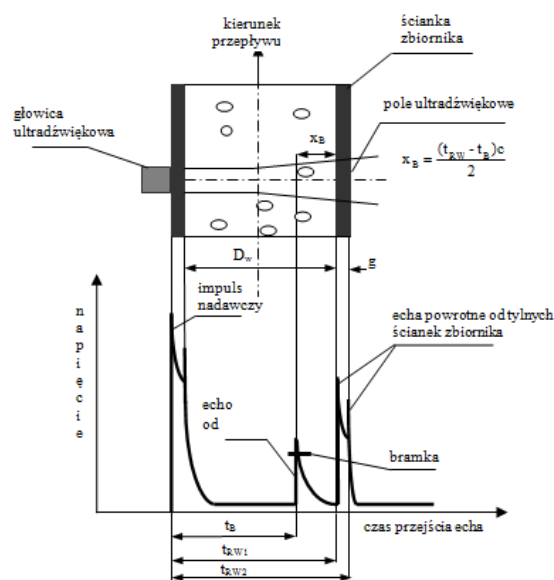
### Wstęp

Przepływy dwufazowe ciekły metal-gaz spotyka się w wielu procesach technologicznych. Przykładami mogą być metalurgiczne procesy pozapiecowej rafinacji stali. Procesy odgazowywania, oczyszczania, czy uszlachetniania ciekłego metalu związane są bezpośrednio z jego przedmuchiwaniem argonem. Efektywność rafinacji zależy m. in. od wymiarów wznoszących się pęcherzy, czasu przebywania w metalu, obszaru ich wznoszenia oraz strumienia przepływu pęcherzy. Znajomość tych wielkości może pozwolić na optymalizację i kontrolę procesów metalurgicznych. W celu uzyskania pełnego banku danych o wznoszących się pęcherzach gazowych niezbędne stają się badania modelowe przepływów dwufazowych ciekły metal-gaz. Wśród wielu metod wykorzystywanych do badań takich przepływów, w ostatnich latach, coraz większe znaczenie znajdują metody ultradźwiękowe. Należą do nich: metoda dopplerowska (UDV) oraz impulsowa metoda echa. Pierwsza z nich rozwijana w Forschungszentrum Dresden-Rossendorf pozwala na wyznaczenie zarówno prędkości pęcherzy jak i prędkości cieczy. Z opublikowanych prac wykorzystujących metodę UDV należy prace prowadzone przez Eckerta, Gerbeta i Zhanga, z których wyniki przedstawiono w artykułach [1,2]. Druga z metod- impulsowa ultradźwiękowa metoda echa rozwijana była w TU Dresden, w ramach projektu SFB 609 „Elektromagnetische Strömungsbeeinflussung in Metallurgie, Kristallzüchtung und Elektrochemie”. Oprócz wyznaczenia prędkości pęcherzy umożliwia ona określenie położenia, rozmiaru czy o obszarze przepływu fazy gazowej [3,4].

Celem pracy jest przedstawienie zrealizowanej ultradźwiękowej impulsowej metody echa, przy zastosowaniu defektoskopu USIP 40, do badań przepływów dwufazowych ciekły metal-gaz. Opracowano ją dla reaktora modelowego, w którym ciekłym metalem była eutektyka GaInSn, a faza gazowa- argon została włączana za pomocą dyszy. W pracy przedstawiono przykładowe wyniki badań, oraz opisano dokładność metody.

### Zasada Pomiaru

Zasadę pomiaru wykorzystującą impulsową metodę echa przedstawia rysunek 1. Krótkie impulsy nadawcze z głowicy ultradźwiękowej po przejściu przez warstwę sprężającą i przednią ściankę zbiornika ulegają odbiciu od pęcherzy gazowych ( $t_B$ ) poruszających się w ciekłym metalu i znajdujących się w polu ultradźwiękowym.



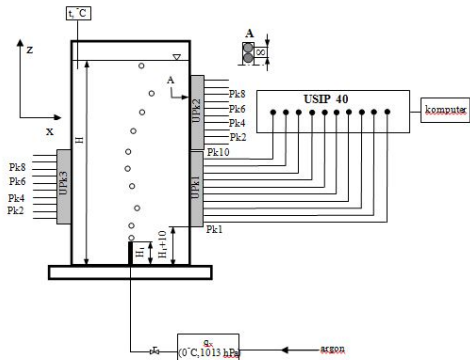
Rys. 1. Zasada pomiaru przy wykorzystaniu impulsowej metody echa

Odbite impulsy ultradźwiękowe jako echo powracają z powrotem do głowicy, która pracuje w układzie nadawczo-odbiorczym. Część impulsów dociera do tylnych ścianek zbiornika ( $t_{RW1}$ ,  $t_{RW2}$ ) i odbijając się od nich wracają również do głowicy ultradźwiękowej. Wykorzystując różnicę czasów przejścia do głowicy ultradźwiękowej impulsów odbitych od pęcherzyków gazowych i tylnej ścianki zbiornika, przebieg ich można przedstawić, w postaci napięć, na ekranie defektoskopu ultradźwiękowego. Jest to tzw. zobrazowanie typu A i pokazane zostało na rysunku dolnym rysunku 1. Głowica ultradźwiękowa współpracuje bezpośrednio z defektoskopem ultradźwiękowym. Defektoskop zbudowany został tak, że rejestruje tylko te sygnały, których amplituda przekracza wartość nastawioną, wynoszącą przeciętnie 20% wartości maksymalnej skali ekranu monitora. Przy tej wartości układ obliczający podaje czas przebiegu fali od nadajnika do reflektora i z powrotem. Znając wartość prędkości fali w ściance zbiornika i badanym ośrodku można obliczyć odległość od reflektora. W górnej części rysunku 1 przedstawiono odległość  $x_B$  pęcherza od tylnej ścianki zbiornika, gdyż wyznaczenie jej wymaga tylko znajomości prędkości fali ultradźwiękowej ( $c$ ) w ośrodku. Minimalną wartość amplitudy rejestrowanych sygnałów

ustawia się zmieniając wysokość położenia bramki pokazanej na rysunku 1. Jednocześnie zmieniając długość tej bramki lub jej położenie ustala się miejsce w którym rejestrowane są sygnały (echa). Mogą nimi być zarówno amplitudy i czasy przelotu echa od pęcherzy jak i tylnej ścianki zbiornika. Częstotliwość powtarzania impulsów ultradźwiękowych (IFF) powinna zostać tak dobrana, aby echo odbite od tylnej ścianki wróciło szybciej, niż został wysłany następny impuls.

### Realizacja metody

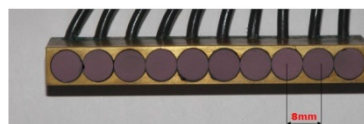
Zrealizowany układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 2.



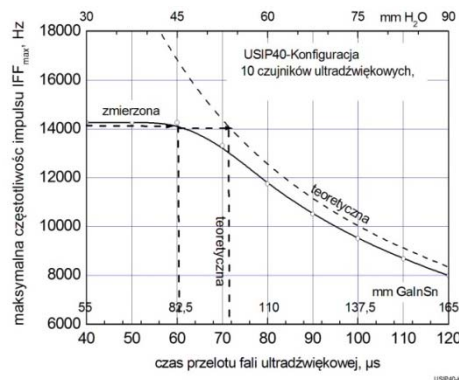
Rys. 2. Układ pomiarowy

Zbiornik o średnicy wewnętrznej  $D_w = 80$  mm, napełniony został do wysokości  $H = 210$  mm ciekłym metalem GaInSn. Argon w postaci pęcherzy gazowych włączany był do zbiornika przez dyszę, której wysokość wynosiła  $H_1 = 20$  mm, a średnice dysz  $d_0$  w zależności od przeprowadzanego pomiaru: 0,5 mm, 0,7 mm, 0,9 mm, 1,0 i 1,2 mm. Strumień objętości argonu  $q_v$  mierzono przepływomierzem z czujnikiem cieplnym (Mass-Flo, MKS Instruments) klasy 1 o zakresach: dla wznoszących się pojedynczych pęcherzy 10 sccm, dla łańcucha pęcherzy 100 sccm. Pierwsza głowica ultradźwiękowa (UPk1) zamocowana została 10 mm nad dyszą wlotową argonu. Rejestracje sygnałów od wznoszących się pęcherzy wykonywano za pomocą dwóch głowic (UPk1, UPk2) zainstalowanych jedna nad drugą, tak że możliwe było uzyskanie informacji o prędkościach pęcherzy i ich zmianach na drodze wznoszenia ok 160 mm. Głowica UPk3 wraz z głowicą UPk1 wykorzystywane były do pomiarów średnicy wznoszących się pęcherzy. Wszystkie głowice składały się z 10 czujników ultradźwiękowych o częstotliwości  $f = 15$  MHz, średnicy  $D = 5$  mm umieszczonych w odległościach 8 mm od siebie. Głowice ultradźwiękowe podłączone były na przemian do 10 kanałowego defektoskopu ultradźwiękowego USIP 40 Box podłączonego i sterowanego z komputerem za pomocą programu. UltraPROOF (firma Krautkramer). W badaniach wykorzystywano tylko metodę pomiaru czasu przelotu echa od wznoszących się pęcherzy, gdyż pozwala ona również na precyzyjne wyznaczenie położenia pęcherza, a tym samym określenie obszaru ich wznoszenia. Za częstotliwość powtarzania impulsów wybrano wartości 14286 Hz, a wzmocnienie sygnału ustalono takie aby amplituda sygnałów przekraczała 20% tj. wysokość belki na rysunku 1. Rysunek 3 przedstawia widok głowicy pomiarowej, zaś rysunek 4 objaśnia w jaki sposób dokonano wyboru częstotliwości powtarzania impulsów równą 14286 Hz. Częstotliwość ta jest maksymalną jaką praktycznie można było uzyskać dla jednego czujnika ultradźwiękowego przy drodze fali wynoszącej 82,5 mm, a więc minimalnie większej niż średnica wewnętrzna

zbiornika. Warto również zauważyć, różnice między krzywą rzeczywistą, a teoretyczną na rysunku 4 podaną przez producenta defektoskopu.



Rys. 3. Głowica ultradźwiękowa

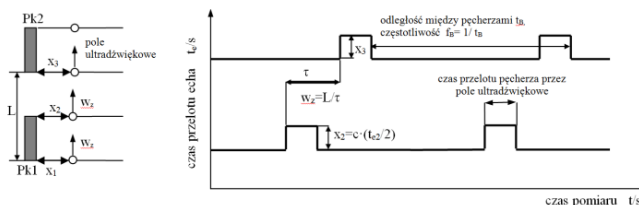


Rys. 4. Zależność maksymalnej częstotliwości impulsu ultradźwiękowego od czasu przelotu fali ultradźwiękowej

Częstotliwość 14286 Hz odpowiada okresowi równemu 0,07 ms, co przy 10 czujnikach ultradźwiękowych powoduje, że po czasie równym 0,7ms pierwszy czujniki z głowicy wysłał powtórnie impuls. Oznacza to że okres próbkowania sygnałów wynosi właśnie 0,7 ms.

### Przykładowe wyniki pomiarów

Rysunek 5 przedstawia interpretację rejestrowanych sygnałów od wznoszących się pęcherzy gazowych w przypadku ich ruchu tylko w kierunku pionowym.



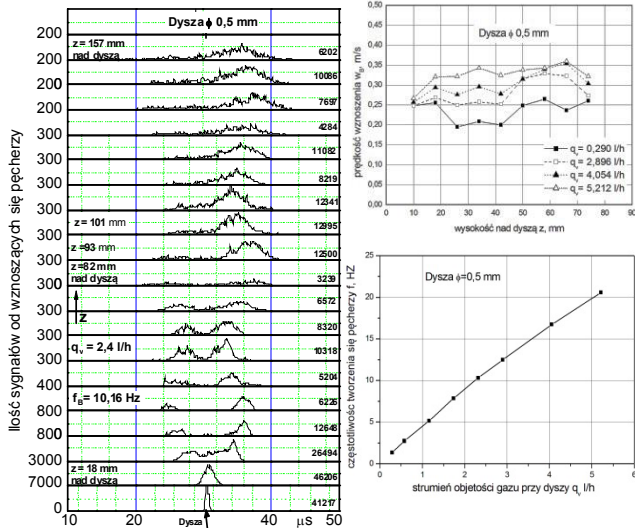
Rys. 5. Interpretacja sygnałów od wznoszących się pojedynczych pęcherzy gazowych dla dwóch czujników ultradźwiękowych (PK1, PK2)

Pokazano również na nim sposób wyznaczenia prędkości wznoszenia  $w_z$ , częstotliwości tworzenia  $f_B$  oraz odległości pęcherza od czujnika ultradźwiękowego np.  $x_2$ . Znając odległości np. kilkudziesięciu poruszających się pęcherzy od czujnika ultradźwiękowego można wyznaczyć obszar ich przepływu. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wyniki z uzyskanych pomiarów.

### Błędy metody

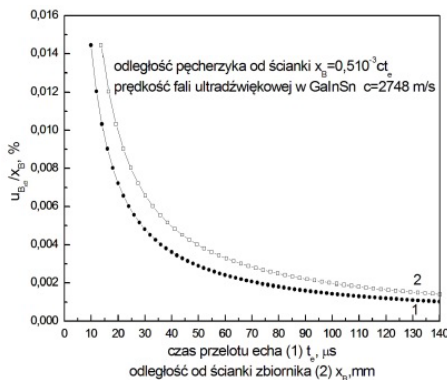
Podstawowe źródła błędów metody wynikają głównie z jej rozdzielczości oraz precyzyjności montażu pojedynczych czujników w głowicy ultradźwiękowej. W defektoskopie USIP 40 rozdzielczość czasu przelotu echa  $t_e$  wynosi  $\delta t_e = 2,5$  ns, co w przeliczeniu na odległości odpowiada rozdzielczości  $\delta x = 0,005$  mm w GaInSn. Oznacza to, że każda zmiana położenia pęcherza o 0,005 mm powinna zostać „wychwycona” przez układ pomiarowy. Według równania odległości pęcherza od czujnika ultradźwiękowego, przedstawionego na rysunku 5, względną niepewność standardowa odległości przedstawia równanie:

$$(1) \quad \frac{u_{x_B}}{x_B} = \sqrt{\left(\frac{u_{Bc}}{c}\right)^2 + \left(\frac{u_{Bt_e}}{t_e}\right)^2} \cong \frac{u_{Bt_e}}{t_e}$$



Rys. 6. Przykładowa zależność prędkości pęcherzy gazowych od odległości nad dyszą  $\phi=5\text{mm}$  wlotową gazu: rozkłady prędkości, częstotliwość tworzenia pęcherzy

Po pominięciu niepewności związanej z prędkością fali ultradźwiękowej na rysunku 7 przedstawiono zależność tej niepewności od czasu przelotu echa  $t_e$  oraz od położenia pęcherza  $x_B$ . Założono dalej, że rozdzielczość czasu przelotu echa  $\delta t_e$  jest błędem granicznym, a niepewność liczona jest metodą typu B i wynosi  $u_{Bt_e} = \frac{\delta t_e}{\sqrt{3}}$ .



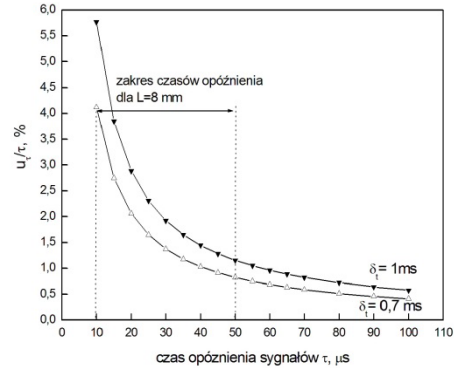
Rys. 7. Niepewności względne wynikające z rozdzielczości metody

Z przedstawionej zależności na rysunku 7 jednoznacznie wynika iż błędy pomiaru związane z rozdzielczością czasu przelotu można pominąć – ich wartości są bardzo małe, mniejsze od 0,014% dla odległości pęcherza od ścianki większych niż 10 mm. Błędy rozdzielczości związane są również z okresem próbkowania  $\delta t$  sygnałów. Jest on ściśle zależny od wybranych częstotliwości powtarzania impulsów ultradźwiękowych IFF (dla 10 czujników  $\delta t = \text{IFF}/10$ ). Dla okresów próbkowania niepewności typu B, wynikające z rozdzielczości, wyznacza się z równania:

$$(2) \quad u_{B\tau} = \frac{\left(\frac{\delta t}{\sqrt{3}}\right)}{\tau} 100\%$$

Zależność tej niepewności dla przykładowych okresów próbkowania  $\delta t = 0,7 \text{ ms}$  i  $\delta t = 1 \text{ ms}$  od czasu opóźnienia sygnałów przedstawia rysunek 8. Dla odległości między czujnikami  $L=8 \text{ mm}$  czasy opóźnienia sygnałów zmieniają się w granicach 10-50  $\mu\text{s}$ , stąd dla maksymalnych prędkości

fazy gazowej rzędu 0,5 m/s niepewności wynoszą do 4%. Przyjęcie odległości między czujnikami  $L=8 \text{ mm}$  związane jest przede wszystkim z tym, że mimo dość dużej niepewności wynikającej z okresu próbkowania sygnałów, wznoszące się pęcherze znajdują się w polu ultradźwiękowym każdego z czujników. Zatem rejestrowane sygnały pochodzą praktycznie od każdego poruszającego się pęcherza.



Rys. 8. Niepewności względne wynikające z okresu próbkowania sygnałów

Największy wpływ na dokładność pomiarów ma prawidłowe ustalenie odległości  $L$  między czujnikami ultradźwiękowymi. Związane jest to z dokładnością ich montażu w głowicy ultradźwiękowej. Nominalna odległość między czujnikami wynosi  $L=8 \text{ mm}$  przypadku nieprecyzyjnego ich zamontowania, występuje tzw. „zezowanie czujników”- promienie ultradźwiękowe emitowane z nich nie są równoległe, a odchyłki równoległości mogą sięgać nawet do 10%. Brak charakterystyk (kalibracji) przetworników ultradźwiękowych prowadzi zatem do istotnych błędów w wyznaczaniu prędkości wznoszących się pęcherzy.

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono zastosowanie ultradźwiękowej impulsowej metody echa do badania przepływów dwufazowych ciekły metal - gaz. Oprócz wykorzystania jej w defektoskopii, metodę echa można z powodzeniem zastosować w pomiarach ciekły metal- gaz do wyznaczania wielkości charakterystycznych dla tych przepływów. Może mieć ona zastosowanie np. w procesach metalurgicznych.

**Autorzy:** dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: artur.andruszkiewicz@pwr.edu.pl; prof.dr hab. Kerstin Eckert, Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, George-Bähr- Strasse 3c, 01069 Germany E-mail: Kerstin.Eckert@tu-dresden.de

### LITERATURA

- [1] Zhang Ch., Liquid metal flows driven by gas bubbles in a static magnetic field. Dissertation TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Dresden 2009.
- [2] Zhang Ch, Eckert S., Gerbeth G., Experimental study of single bubble motion in a liquid metal column exposed to a DC magnetic field, *International Journal of Multiphase Flow* 31(7), July 2005, 824-842.
- [3] Andruszkiewicz A., Eckert K., Ch., Experimental studies of two-phase liquid metal-gas chain flow with ultrasonic echo pulse method and in the magnetic field of permanent magnets, XI International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer (ICCHMT 2018) Cracow, Poland, May 21-24, 2018, art. 03003, s. 1-6.
- [4] Andruszkiewicz A., Eckert K., Measurements of gas phase velocity in liquid metal by means of ultrasonic pulse-echo method, *Lecture Notes in Electrical Engineering* vol. 548, s.1-12, Springer 2019.