

RZECZPOSPOLITA  
POLSKA



Urząd Patentowy  
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **237649**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **429692**

(22) Data zgłoszenia: **23.04.2019**

(51) Int.Cl.

**G01N 29/00 (2006.01)**

**G01N 29/24 (2006.01)**

**G01N 33/205 (2019.01)**

**B06B 3/00 (2006.01)**

(54)

**Sposób wytwarzania sonotrod zwilżalnych przez ciekłe metale**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

**02.11.2020 BUP 23/20**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

**04.05.2021 WUP 09/21**

(73) Uprawniony z patentu:

**ŹRODOWSKI ŁUKASZ, Warszawa, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**ŁUKASZ ŹRODOWSKI, Warszawa, PL**

**PL 237649 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób wytwarzania sonotrod w którym wykorzystuje się skupioną wiązkę energii do otrzymania warstwy dyfuzyjnej na powierzchni sonotrody.

Wzbudzenie ciekłego stopu za pomocą ultradźwięków jest elementem wielu nowoczesnych procesów metalurgicznych. Wśród nich należy szczególnie wymienić lutowanie i spawanie wspomagane ultradźwiękowo, atomizację ciekłych metali oraz obróbkę stopów podczas odlewania. Typowo, układy służące do generacji ultradźwięków składają się z przetwornika, falowodu oraz sonotrody.

Przetwornik piezoelektryczny pełni funkcję konwertera energii elektrycznej na mechaniczną, typowo wykonywany jest z warstwowo ułożonej ceramiki piezoelektrycznej, ułożonej naprzemiennie z okładzinami metalowymi.

Falowód jest elementem układu akustycznego, służącym do prowadzenia w przestrzeni fal mechanicznych, przekazywania ich energii od czoła przetwornika do sonotrody oraz zwiększania amplitudy drgań.

Sonotroda jest elementem wykonawczym układu, który przekazuje energię mechaniczną do medium, w którym zachodzi sonikacja. Jest to element wysoko obciążony mechanicznie, a w przypadkach, których dotyczy rozwiązanie według wynalazku – również termicznie przez nagrzewanie materiału sonotrody od ciekłego stopu. Wymagania stawiane materiałowi na sonotrodę w temperaturze pracy to niska stratność akustyczna i wysoka wytrzymałość mechaniczna.

W przypadku obróbki cieczy, szczególnie ciekłych metali, warunkiem koniecznym do efektywnego przenoszenia energii mechanicznej jest dobra zwilżalność sonotrody przez obrabiany ciekły metal lub stop. Ponieważ zwilżalność sonotrody przez ciekłe metale jest pozytywnie skorelowana z temperaturą, a wytrzymałość negatywnie skorelowana z temperaturą, to powstaje przestrzeń rozwiązań kompromisowych w których właściwości powierzchni są kluczowe dla jednoczesnego zachowania dobrej zwilżalności i wytrzymałości sonotrody. Rozwiązania znane w stanie techniki zostały podsumowane poniżej:

**JP2011051007** opisuje układ do lutowania ultradźwiękowego. Końcówka sonotrody jest wykonana z miedzi lub stopu miedzi, np. brązu berylowego, i pokryta jest warstwą zapewniającą dobrą zwilżalność do lutowia i odporność na wysoką temperaturę, np. warstwą żelaza. Pozostała część układu jest wykonana z materiału o niskiej przewodności cieplnej, np. stopu tytanu. Pozwala to na pracę układu w temperaturze do ok. 600 K, przy jednoczesnej dobrej zwilżalności. Rozwiązanie to zawodzi w wyższych temperaturach, w których brąz berylowy traci wytrzymałość, oraz przy wyższych amplitudach ze względu na delaminację powłoki.

**CH707125** opisuje sonotrodę, składającą się z dwóch metali, służącą do lutowania ultradźwiękowego. Pierwszy metal przenosi drgania, drugi zapewnia dobrą zwilżalność z lutowiem. W korzystnej wersji wynalazku materiał zwilżalny jest wkręcany w korpus sonotrody, który przenosi drgania. Materiał zwilżany jest w tym rozwiązaniu elementem monolitycznym zespolonym z korpusem sonotrody – z tego względu musi cechować się wytrzymałością wystarczającą do utworzenia takiego połączenia. Wyklucza to zastosowanie materiałów kruchych oraz materiałów o wysokiej plastyczności. Rozwiązanie to zawodzi również w wyższych temperaturach ze względu na brak chłodzenia, ponieważ korpus sonotrody traci zdolność do przenoszenia drgań mechanicznych.

**Pohlman** i inni w artykule „Powdering aluminium and aluminium alloys by ultrasound”, opublikowany w czasopiśmie Ultrasonics w 1974 r. przedstawia dobór materiałów na wysokotemperaturowy atomizer ultradźwiękowy. Porównane są materiały z zakresu ceramiki metali wysokotopliwej i innych materiałów inżynierskich. Materiałem wybranym jako najlepszy jest stop wolframu o zawartości tego pierwiastka ponad 90%. Wykorzystanie go jako materiału na sonotrodę pozwoliło na stabilną atomizację stopów aluminium i ołowiu oraz homogenizację kompozytu opartego na aluminium i tlenku aluminium. Powierzchnia sonotrody opisanej w pracy nie jest zwilżalna przez ciekły stop, a wywołuje w nim jedynie kawitację.

**CN102554195** opisuje wykorzystanie tantalu jako powłoki elementu do pracy z ciekłym metalem. **US8844897** opisuje wykorzystanie niobu jako powłoki do elementów stykających się z ciekłymi metalami. Obydwa przykłady przedstawiają metale o wysokiej temperaturze topnienia i stabilności termicznej jako dobre pokrycie sonotrod do pracy z ciekłymi metalami. Nie uwzględniają jednak kwestii zwilżalności przez ciekłe metale ani samego chłodzenia sonotrody.

**US2017299555** opisuje metodę wytwarzania warstwy zwilżalnej na powierzchni ceramicznej sonotrody. Sposób według wynalazku zakłada pracę ceramicznej sonotrody w ciekłym aluminium, do utworzenia warstwy zwilżalnej, następnie ostudzenie ciekłego stopu z wytworzeniem trwałego połączenia z sonotrodą i następnie obróbkę skrawaniem osadzonego stopu. Rozwiązanie to pozwala wytworzyć warstwę zwilżalną przez aluminium, jednak wytworzenie warstw zwilżalnych przez metale o wyższej temperaturze topnienia jest niemożliwe ze względu na temperaturę pracy sonotrod i utratę spójności materiału.

**WO8100768** opisuje sposób wytwarzania sonotrody zwilżalnej przez aluminium znamieny tym, że sonotrodą jest pokrywana w próżni warstwą aluminium. Powłoka aluminium na tytanie w tym przypadku nie zawiera warstwy dyfuzyjnej, wobec czego jest podatna na delaminację pod wpływem wysokiej temperatury i działania ultradźwięków.

Podsumowując, rozwiązania znane w technice opisują zazwyczaj sonotrody zwilżalne przez luty miękkie lub stopy aluminium. Zwilżanie metalami i stopami o wyższej temperaturze topnienia (przykładowo stałą lub stopami tytanu) jest zazwyczaj niemożliwe.

Praca sonotrody z ciekłymi metalami o wysokiej temperaturze topnienia (tj. powyżej 1273 K) wymaga spełnienia dwóch warunków. Po pierwsze, ze względu na temperaturę obrabianej cieczy sam materiał sonotrody musi cechować się dużo wyższą temperaturą topnienia, inaczej ulegnie systematycznemu rozтворzeniu. W związku z tym materiałami predestynowanymi na sonotrody do pracy z ciekłymi metalami w wysokiej temperaturze są metale i stopy metali wysokotopliwych, tj. typowo tantal, wolfram, molibden i niob.

Po drugie, sama sonotroda musi posiadać układ chłodzenia cieczą. Mimo wysokiej temperatury topnienia wymienionych wyżej metali, nie istnieją takie materiały, które w sposób ciągły są w stanie przenosić drgania ultradźwiękowe o wysokiej intensywności w temperaturze powyżej 1273 K. Wynika to ze znaczącego spadku wytrzymałości zmęczeniowej. W związku z tym sonotroda musi pracować w warunkach ustalonego przepływu ciepła, gdzie warstwa wierzchnia sonotrody jest poddawana działaniu wysokiej temperatury, a jej rdzeń jest chłodzony. Jedynym efektywnym sposobem na wychłodzenie sonotrody jest zastosowanie chłodzenia cieczą.

Podsumowując, żeby przenieść drgania ultradźwiękowe o wysokiej intensywności do ciekłego metalu o wysokiej temperaturze, sonotroda musi być wykonana z materiału o wyższej temperaturze topnienia niż materiał obrabiany, żeby zachować czystość chemiczną materiału obrabianego, i jednocześnie musi być chłodzona cieczą, żeby zachować właściwości mechaniczne materiału sonotrody. Są to warunki wysoce niekorzystne z punktu uzyskania dobrej zwilżalności przez ciekły metal.

Sposób według wynalazku pozwala ominąć opisane wyżej ograniczenia przez wytworzenie, przy użyciu skupionego źródła energii, warstwy dyfuzyjnej, która jest zwilżalna przez obrabiany ciekły stop, na chłodzonej cieczą sonotrodzie wykonanej z materiału o temperaturze topnienia powyżej 2200 K.

Sposób według wynalazku przewiduje następujące etapy: nałożenie materiału tworzącego warstwę dyfuzyjną, przetapianie materiału tworzącego warstwę dyfuzyjną skupionym źródłem energii i kalibrację sonotrody. W korzystnej wersji wynalazku materiał jest jednocześnie nakładany na sonotrodę i przetapiany np. podczas procesu plazmowego napawania proszków.

W pierwszym etapie na sonotrodę nanosi się materiał tworzący warstwę dyfuzyjną. Materiał naniesiony na sonotrodę jest korzystnie materiałem, w którym sonotrodą będzie pracować. Alternatywnie jest to inny materiał, przykładowo pierwiastek stanowiący główny składnik ciekłego stopu, w którym będzie pracować sonotroda.

W innej korzystnej wersji wynalazku materiał tworzący warstwę dyfuzyjną jest innym pierwiastkiem niż główny składnik stopu obrabianego i różnica w temperaturze topnienia obrabianego stopu i materiału tworzącego warstwę dyfuzyjną jest nie większa niż 400 K.

Materiał nanosi się na sonotrodę w taki sposób, żeby nie ulegał delaminacji podczas procesu przetapiania. W przypadku wykonywania obróbki na płaszczyźnie czołowej sonotrody materiał może swobodnie na niej spoczywać. W innym przypadku materiał jest наносzony w postaci powłoki galwanicznej, natryskiwanej cieplnie, osadzany z fazy gazowej lub nakładany w postaci pasty. Grubość materiału tworzącego warstwę dyfuzyjną powinna być nie większa niż 1 mm, niezależnie od wykorzystanej metody.

W drugim etapie materiał tworzący warstwę dyfuzyjną jest przetapiany skupionym źródłem energii. Rodzaj źródła, gęstość mocy, strategia przetapiania oraz prędkość ruchu skupionego źródła

energii jest uzależniona od konkretnego materiału sonotrody i warstwy dyfuzyjnej. Warunki obróbki są dobrane w taki sposób, że umożliwiają przetopienie materiału tworzącego warstwę dyfuzyjną, ale materiał sonotrody pozostającego w stanie stałym. Jest to konieczne ze względu na tworzenie się kruchych faz międzymetalicznych w przypadku wymieszania wielu materiałów. Jest to typowe negatywne zjawisko podczas stopowania laserowego czy plazmowego. Ruch ciekłego metalu w jeziorce, powodowany konwekcją, powoduje powstanie niejednorodności składu chemicznego, co zwiększa prawdopodobieństwo kontaminacji stopu obrabianego przez materiał sonotrody. Temperatura obróbki mieści się pomiędzy temperaturą topnienia materiału tworzącego warstwę dyfuzyjną, a temperaturą topnienia materiału sonotrody. Korzystnie obróbkę przeprowadza się w temperaturze nie niższej niż temperatura topnienia materiału sonotrody pomniejszona o dwieście kelwinów i nie wyższej niż temperatura wrzenia materiału tworzącego warstwę dyfuzyjną. Materiał tworzący warstwę dyfuzyjną przechodząc w stan ciekły zostaje przegrzany wiązką energii, dzięki czemu łatwiej dyfunduje wewnątrz materiału sonotrody.

W korzystnej wersji wynalazku sonotroda podczas obróbki skupioną wiązką energii jest chłodzona cieczą. Pozwala to wyeliminować niekorzystne zmiany mikrostrukturalne w przegrzewanym materiale.

W innej korzystnej wersji wynalazku źródło ciepła przystosowane jest do jednoczesnego podawania materiału tworzącego warstwę dyfuzyjną. Przykładowo przez wtryskiwanie proszku do ogniska wiązki lasera.

W trzecim etapie sonotroda zostaje skalibrowana na częstotliwość nominalną. W związku z częściową nieprzewidywalnością procesu przetapiania oraz nierównomiernością przetapianej warstwy, po procesie konieczne jest dostrojenie sonotrody do częstotliwości przetwornika. Tradycyjnie odbywa się to przez obróbkę skrawaniem. Materiał tworzący warstwę dyfuzyjną zostaje usunięty przez obróbkę chemiczną w roztworach trawiących lub przez obróbkę skrawaniem.

Sonotroda lub jej część poddawana obróbce musi być wykonana z materiałów o temperaturze topnienia powyżej temperatury topnienia materiału warstwy dyfuzyjnej. W korzystnej wersji wynalazku sonotroda wykonana jest ze stopów wolframu. W korzystnej wersji sonotroda zawiera nie mniej niż 80% łącznie masy pierwiastków spośród wolframu tantalu, molibdenu i niobu.

W korzystnej wersji wynalazku sonotroda wykonana jest z dwóch części wykonanych z dwóch różnych stopów metalicznych z czego materiał o wyższej temperaturze topnienia styka się bezpośrednio z ciekłym stopem, a materiał o niższej temperaturze topnienia zawiera system chłodzenia cieczą.

**P r z y k ł a d** wykonania:

Walcowa sonotroda półfalowa o średnicy 30 mm, pracująca w częstotliwości 20 kHz i wykonana ze stopu W50Ta40Nb10 została pokryta pastą składającą się z proszku tytanu Grade 2 i izopropanolu. Po odparowaniu rozpuszczalnika powierzchnię czołową sonotrody poddano działaniu wiązki laserowej o mocy 400 W, długości fali 1064 nm i średnicy ogniska 3 mm. Wiązka wykonywała ruch skanujący z prędkości 20 mm/s nagrzewając wierzchnią warstwę sonotrody do 2400 K. Wytworzona w ten sposób warstwa miała grubość 200 mikrometrów z czego 180 mikrometrów stanowił przetopiony tytan, a 20 mikrometrów stanowiła strefa dyfuzyjna.

W innym przykładzie wykonania walcowa sonotroda wykonana z tytanu Grade 5 została wyposażona w końcówkę roboczą wykonaną z czystego niobu w postaci śruby M8. Końcówka została pokryta cyrkonem w procesie natryskiwania cieplnego następnie została poddana działaniu wyładowania łukowego o natężeniu 80 A.

W innym przykładzie wykonania sonotroda ze stopu aluminium PA7 została wyposażona w końcówkę roboczą wykonaną z czystego molibdenu, a następnie wytworzono na niej warstwę dyfuzyjną przez napawanie plazmowe proszku miedzi przy prądzie palnika 50 A, wydatku gazu plazmotwórczej 2 l/min i średnicy dyszy 2,4 mm.

## Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób wytwarzania sonotrody chłodzonej cieczą i wykonanej z materiałów o temperaturze topnienia powyżej 2200 K, przeznaczonej do pracy z ciekłymi materiałami metalicznymi **znamienny tym**, że w miejscu styku sonotrody z ciekłym materiałem metalicznym przeprowadza się obróbkę dyfuzyjną skupionym źródłem energii.

2. Sposób wytwarzania według zastrz. 1, **znamienny tym**, że sonotrodą składa się z dwóch materiałów metalicznych, materiał o wyższej temperaturze topnienia styka się z ciekłym materiałem metalicznym, a materiał o niższej temperaturze topnienia jest chłodzony cieczą.
3. Sposób wytwarzania według zastrz. 1, **znamienny tym**, że obróbkę dyfuzyjną prowadzi się przy jednoczesnym chłodzeniu sonotrody.
4. Sposób wytwarzania według zastrz. 1, **znamienny tym**, że obróbkę dyfuzyjną prowadzi się za pomocą źródła plazmy lub promieniowania laserowego.
5. Sposób wytwarzania według zastrz. 1, **znamienny tym**, że sonotroda posiada końcówkę roboczą wykonaną z materiału o temperaturze topnienia powyżej 2200 K.