

Sonotroda chłodzona cieczą

Przedmiotem wynalazku jest sonotroda chłodzona cieczą, składająca się z korpusu sonotrody i końcówki roboczej wkręcanej w czoło korpusu sonotrody. Korpus sonotrody zawiera kanały transportujące ciecz chłodzącą, korpus sonotrody lub końcówka robocza zawierają rowek, który po złączeniu korpusu sonotrody z końcówką roboczą tworzy zamknięty kanał, którym ciecz chłodząca opływa końcówkę roboczą.

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. Wymagania stawiane materiałowi na sonotrodę to niska stratność akustyczna i wysoka wytrzymałość mechaniczna.

Zachowanie stabilności termicznej układu jest krytyczne dla każdej aplikacji wykorzystującej ultradźwięki w wysokiej temperaturze. Nieodłącznym problemem związanym z prowadzeniem procesów technologicznych wykorzystujących ultradźwięki w warunkach podwyższonej temperatury jest jej negatywny wpływ na elementy układu. Ze względu na bezpośredni kontakt z medium o wysokiej temperaturze, sonotroda jest elementem szczególnie narażonym na zniszczenie z powodu zmian fizykochemicznych w materiale, naprężeń cieplnych oraz obniżenia wytrzymałości materiału. Z tego powodu, wiele znanych w technice układów wyposażonych jest w układ chłodzenia wodnego lub gazowego. Rozwiązania takie zostały przedstawione poniżej.

US2010147466 opisuje sonotrodę chłodzoną powietrzem z pojedynczym kanałem koaksjalnym, przez który tłoczony jest gaz chłodzący. Rozwiązanie pozwala schłodzić końcówkę sonotrody podczas zgrzewania ultradźwiękowego, natomiast ze względu na niską zdolność do odbierania ciepła jest niewystarczające do ciągłej pracy w wysokiej temperaturze. Dodatkowo ze względu wylot gazu z czoła sonotrody, rozwiązanie to jest niemożliwe do zastosowania w układach zamkniętych.

GB952042 i **DE102008029769** opisują inne rozwiązanie problemu nagrzewania sonotrody, tj. zastosowanie wewnętrznych kanałów chłodzących wewnątrz wibrującej sonotrody. **DE102008029769** przedstawia na rysunkach sonotrodę z trzema kanałami, z czego dwa doprowadzają ciecz chłodzącą, a jeden formuje zbiornik przy czole sonotrody. Wszystkie znane

w technice rozwiązania wykorzystujące obieg zamknięty cieczy chłodzącej zakładają, że sonotroda jest monolityczna, a powierzchnią roboczą jest sama powierzchnia czołowa sonotrody. Oznacza to, że zniszczenie powierzchni czołowej wyklucza całą sonotrodę z pracy. Dodatkową wadą tych rozwiązań jest niska żywotność w warunkach wysokiej temperatury oraz wysoki koszt wykonania. Typowo materiałem na ekonomiczne sonotrody są stopy aluminium, niezdolne do pracy powyżej ok. 100 °C. Alternatywne wykorzystanie stopów tytanu dodatkowo zwiększa koszt wykonania takiego elementu, szczególnie przy drążeniu kanałów kątowych.

US2889580 opisuje wykorzystanie węzownicy z chłodziwem do utrzymania stabilności elementów ultradźwiękowych pracujących w wysokiej temperaturze. Wadą tego rozwiązania są wysokie straty mechaniczne na granicy element wibrujący – węzownica przez tarcie mechaniczne.

GB1594977 opisuje system chłodzenia sonotrody zanurzonej w ciekłym metalu. Falowód pośredni chłodzony jest przez płaszcz wodny znajdujący się w pobliżu węzła fali stojącej. Rozwiązanie to oddala chłodzenie od czoła sonotrody, przez co jest niepraktyczne do wykorzystania w przypadku sonotrod wykonanych z materiałów o niskiej przewodności cieplnej, np. stopów tytanu.

CN102554195 opisuje wykorzystanie tantalu jako powłoki elementu wibrującego 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.

JPH02121830 opisuje kompozytową sonotrodę z końcówką wykonaną z ceramiki o niskiej przewodności cieplnej, np. ZrO₂. Ma to ograniczyć przepływ ciepła od elementu zgrzewanego do przetwornika i układu ultradźwiękowego. Rozwiązanie to pozwala efektywnie zmniejszyć nagrzewanie sonotrody podczas zgrzewania ultradźwiękowego, natomiast jest niewystarczające do zachowania stabilności układu w wysokiej temperaturze.

CH707125 opisuje sonotrodę składającą się z dwóch metali. Pierwszy przenosi drgania ultradźwiękowe, drugi zapewnia dobrą zwilżalność powierzchni przez ciekły stop. W korzystnej wersji wynalazku materiał zwilżany jest wkręcany/wciskany w czoło sonotrody, która przenosi drgania. Rozwiązanie to nie przewiduje możliwości chłodzenia cieczą, co ogranicza temperaturę pracy.

Podsumowując, większość znanych w technice sonotrod przeznaczona jest do pracy jako element zgrzewarek ultradźwiękowych lub homogenizatorów ultradźwiękowych. Urządzenia te pracują zazwyczaj w temperaturze pokojowej, a ciepło wydziela się układzie tylko przez tarcie wewnętrzne. Wykorzystanie rozwiązań opracowanych dla takich warunków w wysokiej temperaturze jest zazwyczaj niemożliwe ze względu na dużo wyższe wymagania co do wydajności chłodzenia i wytrzymałości elementów poddawanych zmęczeniu.

Rozwiązanie według wynalazku pozwala na punktowe dostarczenie energii ultradźwiękowej do mediów o wysokiej temperaturze. Kontakt z medium o wysokiej temperaturze zachodzi jedynie na czole sonotrody, przez końcówkę roboczą wkręcaną w korpus sonotrody. Końcówka robocza jest w sposób ciągły chłodzona przez ciecz chłodzącą transportowaną kanałami wydrążonymi w korpusie sonotrody. Istotą wynalazku jest

End

zastosowanie bezpośredniego chłodzenia końcówki roboczej cieczą płynącą w kanale uformowanym między końcówką roboczą, a korpusem sonotrody.

Sonotroda według wynalazku składa się z korpusu, stanowiącego element przenoszący drgania mechaniczne i doprowadzający ciecz chłodzącą oraz końcówki, która stanowi element roboczy mający bezpośredni kontakt z obrabianym medium.

Korpus sonotrody wykonany jest z materiałów znanych w technice ultradźwiękowej, korzystnie stopów aluminium. Zastosowanie stopów aluminium względem popularnego tytanu pozwala na ograniczenie kosztów wykonania kanałów chłodzących. Korpus sonotrody posiada co najmniej dwa kanały transportujące ciecz chłodzącą między powierzchnią podstawy korpusu sonotrody tj. powierzchnią, która styka się z falowodem, albo przetwornikiem a powierzchnią czołową, tj. powierzchnią, która styka się z końcówką roboczą. W korzystnej wersji wynalazku korpus sonotrody posiada co najmniej dwa kanały transportujące ciecz chłodzącą między węzłem fali stojącej tj. nie dalej niż 10 mm od środka sonotrody półfalowej, a powierzchnią czołową sonotrody. Kanały transportujące ciecz chłodzącą mają korzystnie średnicę nie większą niż 3 mm. Pozwala to ograniczyć zaburzenia fali w sonotrodzie.

Wymiana cieczy chłodzącej realizowana jest przez ujścia kanałów znajdujące się na podstawie korpusu sonotrody lub przez ujścia znajdujące się w pobliżu węzła fali stojącej tj. nie dalej niż 10 mm od środka sonotrody półfalowej. Ujścia kanałów znajdujące się na podstawie sonotrody łączą układ chłodzenia z przetwornikiem albo falowodem, zawierającym kanały chłodzące. Tradycyjnie połączenie sonotrody i falowodu lub przetwornika realizuje się przez łącznik śrubowy. W celu ułatwienia montażu podstawa sonotrody może być wyposażona w półkoliste rowki, które zapewniają ciągłość przepływu cieczy niezależnie od wzajemnego położenia sonotrody i falowodu lub przetwornika.

Ciecz chłodząca wypływająca z pierwszego kanału chłodzącego, wypełnia rowek znajdujący się na korpusie sonotrody lub na końcówce roboczej i wpływa do wlotu drugiego kanału chłodzącego. Kluczowym elementem układu jest kanał tworzący się między korpusem sonotrody i końcówką roboczą. Niezależnie od tego, czy rowek znajduje się na powierzchni czołowej sonotrody czy na końcówce roboczej, ciecz chłodząca bezpośrednio opływa końcówkę roboczą. Bezpośrednie chłodzenie końcówki roboczej pozwala zachować korpus sonotrody w niskiej temperaturze. Jest to krytyczne dla działania układu, gdyż przegrzewanie korpusu sonotrody jest czynnikiem ograniczającym zastosowanie rozwiązań znanych w technice. Znane w technice rozwiązania bazują na przewodzeniu ciepła przez korpus sonotrody, podczas gdy rozwiązanie według wynalazku bazuje na bezpośrednim chłodzeniu elementu obciążonego termicznie tj. chłodzeniu końcówki roboczej.

W pierwszym przykładzie wykonania wynalazku rowek wydrążony jest na czole korpusu sonotrody. W drugim przykładzie wykonania wynalazku rowek stanowi wybranie w gwincie mocującym końcówkę roboczą do korpusu sonotrody. Uszczelnienie układu chłodzącego może zachodzić na trzy sposoby. W pierwszej wersji końcówka robocza jest lutowana do korpusu sonotrody, w tym przypadku połączenie śrubowe łączy układ mechanicznie, a spoina zapewnia szczelność kanału. W drugiej wersji kanał uszczelniany jest podczas skręcania sonotrody, tj. przez mikroodkształcenia plastyczne końcówki roboczej lub korpusu sonotrody, w trzeciej wersji pomiędzy końcówką roboczą a korpusem sonotrody znajduje się przekładka wykonana z materiału o niskiej twardości, który stanowi uszczelkę metalową.

ewit

W korzystnej wersji wynalazku końcówka robocza wykonana jest z materiału o temperaturze topnienia powyżej 2000 K, korzystnie stopów wolframu, tantalu, niobu lub molibdenu. Pozwala to ograniczyć zużycie termiczne końcówki roboczej.

W korzystnej wersji wynalazku między końcówką roboczą a korpusem sonotrody znajduje się podkładka wykonana z materiału o przewodności cieplnej powyżej 100 W/mK i twardości poniżej 20 HRC. Pozwala to jednocześnie poprawić transfer ciepła od końcówki jak i uszczelnić układ przez deformację podkładki.

Sonotroda pracuje w warunkach ustalonego przepływu ciepła, dzięki czemu temperatura sonotrody jest niższa niż temperatura obrabianego medium. Pozwala to zachować właściwości mechaniczne konieczne do przeniesienia fali mechanicznej do medium o wysokiej temperaturze.

Zaletą sonotrody według wynalazku jest bezpośrednie chłodzenie końcówki roboczej, która narażona jest na działanie wysokiej temperatury. Porównując rozwiązanie do innych znanych w stanie techniki wyróżnia się wysoką stabilnością termiczną. Jednocześnie regeneracja układu wymaga tylko wymiany końcówki roboczej, a nie całej sonotrody.

Przykład korzystnej realizacji sonotrody według wynalazku został przedstawiony schematycznie na rysunkach.

Na fig. 1 przedstawiono sonotrodę o czterokrotnym wzmocnieniu składającą się z korpusu (1) wykonanego ze stopu aluminium PA7 i końcówki roboczej (2) wykonanej z technicznie czystego niobu. Końcówka robocza wyposażona jest w gwint metryczny M8 i łączy się z korpusem sonotrody.

Na fig. 2 przedstawiono korpus sonotrody (1) z pierwszym kanałem doprowadzającym ciecz chłodzącą (3) i drugim kanałem odprowadzającym ciecz chłodzącą (4). Wylot pierwszego kanału chłodzącego (6) i wlot drugiego kanału chłodzącego (5) połączone są przez rowek (7), przez który płynie ciecz chłodząca. Kierunek przepływu cieczy chłodzącej został zaznaczony strzałkami. Korpus sonotrody wyposażony jest w gwint wewnętrzny (8), w który wkręcana jest końcówka robocza.

Na fig. 3 przedstawiono czoło korpusu sonotrody z wylotem pierwszego kanału chłodzącego (6) i wlotem drugiego kanału chłodzącego (5), oraz rowkiem (7) z zaznaczonym kierunkiem przepływu cieczy chłodzącej.

Na fig. 4 przedstawiono podstawę sonotrody z zaznaczonymi rowkami pod kanały chłodzące (9) o głębokości 3 mm, oraz wlot pierwszego kanału (10) i wylot drugiego kanału (11):

Na fig. 5 przedstawiono przekrój korpusu sonotrody, w którym doprowadzenie cieczy chłodzącej w postaci kanałów (3,4) zrealizowane jest w połowie długości sonotrody i rowek (7) znajduje się na czole korpusu sonotrody. Końcówka robocza jest wkręcana w gwint (8) znajdujący się na czole korpusu sonotrody.

Na fig. 6 przedstawiono przekrój korpusu sonotrody, w którym doprowadzenie cieczy chłodzącej w postaci kanałów (3,4) zrealizowane jest przy podstawie sonotrody i rowek (7) znajduje się na czole korpusu sonotrody. Końcówka robocza jest wkręcana w gwint (8) znajdujący się na czole korpusu sonotrody.

Na fig. 7 przedstawiono przekrój korpusu sonotrody, w którym doprowadzenie cieczy chłodzącej w postaci kanałów (3,4) zrealizowane jest przy podstawie sonotrody i rowek (7) znajduje się na gwincie (8) służącym do mocowania końcówki roboczej.

Engler