

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10) **PL 246719 B1**

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **436589**

(22) Data zgłoszenia: **2021.01.06**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2022.07.11 BUP 28/2022**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2025.03.03 WUP 09/2025**

(51) MKP:

B22F 9/08 (2006.01)

B22D 27/08 (2006.01)

B01J 19/10 (2006.01)

B06B 3/00 (2006.01)

B06B 1/06 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

**AMAZEMET SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ
ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ, Warszawa, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:

ŁUKASZ ŹRADOWSKI, Warszawa, PL

BARTŁOMIEJ BRODOWSKI, Ostrołęka, PL

KACPER OBŁUSKI, Legionowo, PL

TOMASZ CHOMA, Dynów, PL

MATEUSZ OSTRYSZ, Wiązowna, PL

WOJCIECH ŁACISZ, Warszawa, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Marek Bury, Warszawa, PL

(54) Tytuł:

Układ ultradźwiękowy przeznaczony do pracy w wysokiej temperaturze

PL 246719 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest układ ultradźwiękowy przeznaczony do pracy w wysokiej temperaturze, szczególnie do pracy z ciekłymi metalami.

W stanie techniki wykorzystuje się drgania o częstotliwości ultradźwiękowej do obróbki ciekłych metali. Do typowych zastosowań zalicza się atomizację, stopowanie i tworzenie pseudostopów (układów dyspersyjnych), odgazowanie ciekłego aluminium oraz jego filtracja. Typowo układ ultradźwiękowy pobudzany jest przez przetwornik piezoelektryczny lub magnetostrykcyjny. Ze względu na to, że górna temperatura pracy tych przetworników jest dużo niższa niż temperatura topnienia większości metali, układ ultradźwiękowy wymaga zastosowania chłodzenia o wysokiej wydajności np. przez przepływającą lub rozpyloną ciecz lub przez nadmuch gazu.

Aby ultradźwiękowa obróbka ciekłych metali zachodziła w sposób stabilny, wymagane jest jednoczesne zachowanie odpowiedniej amplitudy drgań i zapewnienie dobrej zwilżalności sonotrody przez ciekły metal oraz utrzymanie temperatury powierzchni sonotrody powyżej temperatury topnienia stopu. Ze względu na ograniczoną temperaturę pracy przetwornika piezoelektrycznego, generuje to wysoki gradient temperatury. Jednocześnie, ze względu na ograniczenia materiałowe i wysokie obciążenie zmęczeniowe, limituje to maksymalną temperaturę pracy niechłodzonej sonotrody do ok. 700°C.

Jednym z zastosowań drgań o częstotliwości ultradźwiękowej jest atomizacja ciekłych metali. Z chińskiego dokumentu patentowego CN1422718A znany jest atomizer ultradźwiękowy i system chłodzenia układu wibracyjnego – sonotrody. Ciekły metal styka się bezpośrednio z sonotrodą, która wibrując rozpyla ciekły stop, a jego krople zastygają w postaci proszku. Część układu zawierająca piezoceramikę jest chłodzona powietrzem a sonotroda chłodzona jest niezależnie wodą lub powietrzem, przez co aktywne są dwa stopnie chłodzenia. Wadą rozwiązania jest niska odporność na wysokie temperatury tj. powyżej 700°C i wysoka zmiana częstotliwości rezonansowej wskutek nagrzania w kontakcie z płynnym metalem. Sonotroda jest chłodzona dopiero w odległości $\frac{1}{4} \lambda$ (długości fali stojącej w danym materiale) od końcówki roboczej.

Innym sposobem utrzymania stabilności temperaturowej elementów wibrujących, wykorzystywanych do atomizacji ultradźwiękowej, jest ich chłodzenie węzownicą, tak jak opisano w amerykańskim dokumencie patentowym US2889580A. Wadą tego rozwiązania są wysokie straty mechaniczne na granicy element wibrujący – węzownica spowodowane tarciem mechanicznym.

Inną aplikacją wykorzystującą ultradźwiękowe wzbudzenie metali jest lutowanie wspomagane ultradźwiękowo. Amerykański dokument patentowy US3833163A opisuje sposób wzbudzenia ciekłego metalu przez zastosowanie układu ultradźwiękowego, składającego się z metali o wysokiej i niskiej przewodności cieplnej. Materiał bezpośrednio stykający się z elementami gorącymi wykonany jest z tytanu o niskiej przewodności cieplnej. Następnie połączony jest z radiatorem wykonanym z aluminium o wysokiej przewodności cieplnej. Połączenie tych dwóch materiałów pozwala ograniczyć efektywny przepływ ciepła od ciekłego metalu do przetwornika i przyspieszyć dyssypację ciepła. Rozwiązanie to jednak nie może być zastosowane, kiedy temperatura medium przekracza temperaturę pracy sonotrody.

Brytyjski dokument patentowy GB1594977A opisuje system chłodzenia sonotrody służącej do homogenizacji ciekłego metalu. Falowód pośredni chłodzony jest przez płaszcz wodny znajdujący się w pobliżu węzła fali stojącej. Podobne rozwiązanie zostało ujawnione w amerykańskim dokumencie patentowym US376236A, który opisuje wykorzystanie systemu chłodzonego wodą do zachowania stabilności temperaturowej sonotrody pracującej w ciekłym lutowiu. Elementy wibrujące otoczone są płaszczem wodnym, a ich uszczelnienie znajdują się w węzłach fali stojącej. W obydwu przypadkach chłodzenie sonotrody znajduje się co najmniej w odległości $\frac{1}{4} \lambda$ od czoła sonotrody i rozwiązanie nie może być wykorzystane do pracy z materiałami o temperaturze wyższej niż 700°C.

Generalnie wadą rozwiązań chłodzonych cieczą, znanych ze stanu techniki, jest podatność na uszkodzenia mechaniczne (pęknięcia) sonotrody ze względu na obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej materiału w wysokich temperaturach, oraz znaczną wrażliwość uszczelnienia obiegu cieczy chłodzącej na drgania przenoszone przez sonotrodę. Drugi problem został częściowo rozwiązany w wynalazku będącym przedmiotem zgłoszenia patentowego nr PL423408A1. Wynalazek dotyczy układu ultradźwiękowego przeznaczonego do pracy w podwyższonych temperaturach. Sonotrodę wykonano z materiału o przewodności cieplnej powyżej 100 W/mK, korzystnie ze stopu miedzi CuCrZr, CuBe lub spieków wolframu. Do sonotrody dołączono dodatkowy falowód i zastosowano uszczelnienie w bezpośrednim sąsiedztwie węzłów fali stojącej pobudzonej w sonotrodzie, w jej warunkach pracy. Dzięki temu

wyeliminowano wpływ drgań w kierunku podłużnym na uszczelnienie i zapewniono możliwość zastosowania niezawodnego systemu uszczelnień nieruchomego względem sonotrody. Wadą sonotrody według zgłoszenia PL423408A1 jest jej podatność na uszkodzenia mechaniczne, zwłaszcza przy długotrwałym używaniu ze względu na niską wytrzymałość zmęczeniową materiałów spełniających warunek określony w wynalazku tj. stopów miedzi i wolframu. Uniemożliwia to zastosowanie wysokiego wzmocnienia amplitudy i ogranicza temperaturę pracy sonotrody. Sonotroda ta wymaga zastosowania materiałów o wysokiej przewodności cieplnej i niższych właściwościach mechanicznych niż materiały stosowane tradycyjnie na elementy ultradźwiękowe. Dodatkowo, ze względu na wysoką przewodność cieplną sonotrody odbiera ona wysoką moc cieplną od układu, co wymusza stosowanie wyższych prądów łuku w przypadku obróbki plazmowej i wyższej mocy układu grzejjego w przypadku obróbki ciekłych stopów w tyglach.

W amerykańskim dokumencie patentowym US5772100 opisano mocowanie sonotrody za pomocą dwóch elementów mocujących. Pierwszy element mocujący znajduje się w strzałce fali (w punkcie styku z przetwornikiem), a drugi w węźle fali (połowa długości sonotrody). Końcówka robocza jest oddalona od korpusu o $\frac{1}{4}$ długości fali.

Należy również wspomnieć o szeregu rozwiązań w zakresie odlewania ciągłego wspomaganego ultradźwiękami, przywołując takie dokumenty jak JPS5762842A, US4460034A, WO2020023751A1, US9481031B2, US3193889A i US4662427A. We wszystkich ww. powołanych dokumentach oraz pozostałych dokumentach składających się na stan techniki opisane jest chłodzenie formy i jej jednoczesne wzbudzenie ultradźwiękami, albo chłodzenie formy i bezpośrednie wzbudzenie ultradźwiękami odlewane go materiału. Istotnym problemem technologicznym uniemożliwiającym zastosowanie bezpośredniego chłodzenia odlewu przy jego wzbudzeniu ultradźwiękowym jest jakość powierzchni odlewu, która uniemożliwia bezpośrednie uszczelnienie na odlewanym elemencie, oraz ryzyko zniszczenia elementów formy przez ultradźwięki wysokiej mocy podczas wycofywania odlewane go elementu z formy.

W poprzednim zgłoszeniu twórcy PL429907A1 ujawniono częściowe rozwiązanie ww. przedstawionych problemów przez wprowadzenie sprężynującej uszczelki w miejscu strzałki fali stojącej, co pozwoliło zbliżyć chłodzenie do czoła sonotrody o ok. $\frac{1}{4}$ długości fali. Wadą tego rozwiązania jest konieczność wykorzystania skomplikowanych elementów w postaci diafragm z metali wysokotopliwych lub zintegrowanych uszczelki metalowo-polimerowych, a także konieczność stosowania wysokości chłodzenia co najmniej o długości odpowiadającej $\frac{1}{4}$ długości fali. Według doświadczeń twórcy wysokość płaszcza chłodzenia o wymiarze $\frac{1}{4}$ długości fali (tj. ok. 60 mm dla falowodu z Ti6Al4V przy częstotliwości 20 kHz) nie przynosi żadnego korzystnego efektu powyżej 10 mm wysokości chłodzenia, a jedynie powoduje poważne obciążenie układu ultradźwiękowego przez rozproszenie jego mocy na kawitację cieczy chłodzącej. Jest to efekt praktycznie wykluczający zastosowanie układów o wysokiej częstotliwości powyżej 40 kHz, gdyż ich dopuszczalna moc maksymalna zmniejsza się z trzecią potęgą częstotliwości.

Jednocześnie zbliżenie uszczelnienia do źródła ciepła powoduje wysokie ryzyko wycieku cieczy chłodzącej i eksplozywnej reakcji z ciekłym metalem, a opisany w dokumencie PL429907A1 pasywny ekran nie zapewnia bezpieczeństwa pracy z łukiem plazmowym, gdyż może być łatwo przepalony. Ponadto, nawet w przypadku zastosowania pasywnego ekranu z metali wysokotopliwych, po ich nagraniu następuje niekorzystne przyspawanie materiału sonotrody do ekranu przez materiał obrabiany, co prowadzi w konsekwencji do przeniesienia drgań na ekran i jego zniszczenie.

Celem wynalazku jest zapewnienie niezawodnego układu ultradźwiękowego do obróbki płynnych metali pracującego przy minimalnych stratach na kawitację chłodziwa, oraz zapewnienie sposobu atomizacji metali i ich stopów wykorzystującego układ ultradźwiękowy według wynalazku.

Układ ultradźwiękowy przeznaczony do pracy w wysokiej temperaturze, zawierający przetwornik ultradźwiękowy, połączony z nim falowód pośredni z kołnierzem mocującym i połączoną z falowodem pośrednim sonotrodę, zgodnie z wynalazkiem charakteryzuje się tym, że zawiera ponadto chłodzoną podstawę z otworem, w którym znajduje się sonotroda, oraz korpus układu chłodzenia z pierwszą uszczelką i drugą uszczelką, które to uszczelki rozmieszczone są na sonotrodzie, przy czym sonotroda ma płaszcz chłodzący do prowadzenia cieczy chłodzącej znajdujący się pomiędzy korpusem układu chłodzenia, pierwszą uszczelką, drugą uszczelką i powierzchnią boczną sonotrody, i przy czym korpus układu chłodzenia jest zamocowany do kołnierza mocującego falowodu pośredniego. Korzystnie, układ ultradźwiękowy ma komorę bezpieczeństwa znajdującą się pomiędzy drugą częścią układu chłodzenia a powierzchnią sonotrody, zaopatrzoną w dodatkową uszczelkę i przyłącznie sprężonego gazu. Korzystnie, sonotroda jest wykonana ze stopu miedzi i ma centralny otwór przelotowy oraz krzyżujący się z nim

otwór prostopadły do osi sonotrody, umiejscowiony poniżej płaszcza chłodzącego, a także ma stoper umieszczony w otworze przelotowym sonotrody od strony bliższej falowodu pośredniego. Korzystnie, w szczelinie pomiędzy sonotrodą a chłodzoną podstawką z miedzi, lub stopu miedzi, umieszczona jest folia grafitowa lub wykonana z innego materiału ceramicznego.

Zastosowanie chłodzonej cieczą podstawy zwłaszcza wykonanej z materiałów o wysokiej przewodności cieplnej i wysokiej zdolności odbierania ciepła, jakimi są miedź, wolfram i ich stopy, efektywnie eliminuje ryzyko przepalenia elementów systemu chłodzenia sonotrody. Obecność podstawy chłodzącej w bezpośrednim otoczeniu sonotrody uniemożliwia połączenie tych dwóch elementów przez działanie łuku plazmowego lub ciekłego metalu, gdyż nawet w przypadku „rozlania” materiału na czole sonotrody ten nie może zwilżyć chłodzonej cieczą podstawy pracującej jako radiator. Przez efektywny odbiór ciepła również wpłynięcie ciekłego metalu do szczeliny pomiędzy chłodzoną podstawą a sonotrodą jest utrudnione, gdyż ciekły metal ulega wcześniej krystalizacji. Chłodzona podstawa jest również niezbędna w przypadku prowadzenia procesów metalurgicznych w oparciu o topienie plazmowe, szczególnie w przypadku prowadzenia atomizacji ultradźwiękowej. Chłodzona podstawa wykonana z materiału o wysokiej przewodności elektrycznej stanowi punkt, na którym będzie się koncentrował łuk plazmowy, dzięki czemu po zatamowaniu części sonotrody i utworzeniu krytycznego ubytku dalszy proces zostanie zatrzymany. Jest to efekt korzystny, gdyż w przeciwnym wypadku doszłoby do trwałego zniszczenia sonotrody. Chłodzona podstawa otaczając sonotrodę pozwala na kontrolowanie jej kształtu w przypadku napawania materiału łukiem plazmowym.

Przedstawione we wcześniejszej publikacji twórcy PL423410A1 rozwiązanie wykorzystujące do atomizacji sonotrodę z topliwą końcówką wyniesioną ponad dno komory roboczej jest niestabilne przy większej ilości napawanego materiału, gdyż ten na skutek akumulacji ciepła zaczyna z niej spływać i prowadzi do znacznego spadku impedancji układu. Rozwiązanie według przedmiotowego wynalazku pozwala ograniczyć rozpyływanie się materiału, przez co umożliwia prowadzenie procesu atomizacji z wykorzystaniem dowolnej formy materiału wsadowego.

Chłodzona podstawa może być wykonana w formie płyty lub pierścienia okalającego sonotrodę. W samej chłodzonej podstawie może znajdować się szereg funkcjonalnych wyżłobień, podobnie jak w urządzeniach do topienia plazmą lub wiązką elektronów. Pozwalają one przygotować wsad materiału lub przyłączyć mechanizm dozujący materiał.

Zastosowanie elastycznych uszczelnień, korzystnie uszczelnień typu X-ring, eliminuje nakreślone w stanie techniki ograniczenie, które wymuszało zastosowanie uszczelnień w ściśle określonych miejscach falowodu, gdyż uszczelka podatna w kierunku osiowym i promieniowym sonotrody nie ulega zgrzaniu pod wpływem działania ultradźwięków. Układ ultradźwiękowy wg. wynalazku umożliwia uszczelnienie w dowolnym miejscu osiowosymetrycznej sonotrody, przez co możliwe jest stworzenie układu chłodzenia o zredukowanej wysokości. Przekłada się to na zredukowanie mocy biernej (traconej na kawitację chłodziwa) układu ultradźwiękowego. Zastosowanie uszczelnień typu X-ring, w przeciwieństwie do ściskanych uszczelnień płaskich, wymaga stosowania wysokich tolerancji wymiarowych, co w przedmiotowym wynalazku realizowane jest przez centrowanie układu chłodzenia na pierścieniu falowodu pośredniego. Zastosowanie uszczelnień typu X-ring pozwala uzyskać korzystny efekt w stosunku do uszczelnień płaskich, które muszą być montowane w węźle fali stojącej lub w pobliżu.

Zastosowanie elastycznych uszczelnień o wysokiej tolerancji na położenie względem strzałki i węzła fali stojącej pozwala akomodować zmianę częstotliwość rezonansowej i długości sonotrody. Podczas wysokotemperaturowej obróbki metali i ich stopów z wykorzystaniem układu według wynalazku dochodzi do zmiany prędkości fali mechanicznej w materiale sonotrody. Prowadzi to do zmiany częstotliwości rezonansowej oraz zmiany położenia węzłów i strzałek fali w układzie. W przypadku klasycznych, znanych w technice układów ultradźwiękowych przekłada się to negatywnie na ich żywotność. Podobny efekt występuje podczas atomizacji ultradźwiękowej, jeśli sonotroda jest sama w sobie elementem atomizowanym, przez co dotychczasowe próby stworzenia stabilnego układu do atomizacji w oparciu o zużywalne sonotrody były niesatysfakcjonujące.

Przetwornik ultradźwiękowy wykonany jest w układzie Langevin-a i może pracować z częstotliwością od 17 kHz do 200 kHz. Moc maksymalna przetwornika zbudowanego na ceramice PZT 8 lub PZT 4 wynosi od 10 kW dla 20 kHz do ok. 200 W dla 200 kHz. Przetwornik ultradźwiękowy może być chłodzony gazem lub cieczą w celu uzyskania dłuższych cykli pracy. Przetwornik według wynalazku pracuje w modzie podłużnym, gdyż pozwala to osiągnąć najwyższe moce efektywne przetworników.

Falowód pośredni ma długość odpowiadającą połowie długości fali stojącej w danym materiale (lub jej wielokrotności) i wykonany jest z materiałów o wysokiej zdolności akustycznej np. dwufazowych

stopów tytanu lub utwardzanych wydzieleniowo stopów aluminium. Falowód pośredni zawiera się w połowie długości fali stojącej w danym materiale i wyposażony jest w kołnierz znajdujący się w węźle fali stojącej. Kołnierz korzystnie ma kształt osiowosymetrycznej sprężyny. Falowód pośredni może być zintegrowany z przetwornikiem ultradźwiękowym w taki sposób, że ceramika piezoelektryczna jest zamontowana na wspólnym elemencie mechanicznym.

Sonotroda wykonana jest z dowolnego materiału metalicznego, a jej długość jest dobrana w taki sposób, żeby odpowiadała wielokrotności połowy długości fali stojącej w danym materiale i częstotliwości pracy przetwornika. Dobór materiału sonotrody zależy bezpośrednio od procesu i rodzaju obrabianego materiału. W przypadku prowadzenia atomizacji metali i ich stopów należy użyć na sonotrodę materiału o składzie chemicznym identycznym lub zbliżonym jak w przypadku materiału rozpalanego. Tak przykładowo do procesu atomizacji stali szybko tnącej można posłużyć się sonotrodą z identycznego materiału lub użyć stali austenitycznych z napawaną końcówką z obrabianego stopu. W przypadku prowadzenia procesu stopowania ultradźwiękowego i odlewania ultradźwiękowego sonotroda jest wykonana z takich samych materiałów jak chłodzona podstawa. Powierzchnia sonotrody w miejscu uszczelnienia obrabiana jest tak, żeby osiągnąć tolerancję wymiarową poniżej 0,01 mm, co jest warunkiem koniecznym uszczelnienia komory chłodzenia. Kalibracja sonotrody możliwa jest też w wąskim zakresie częstotliwości przetwornika z uwzględnieniem spadku częstotliwości podczas pracy układu. Tak przykładowo sonotroda ze stopu Ti6Al4V o długości 114 mm kalibrowana na zimno na 21000 Hz, osiąga 20200 Hz w temperaturze czoła sonotrody 500°C. Znacząca z łatwością zaproponuje różne materiały sonotrod i dokona ich kalibracji, nie odchodząc od istoty wynalazku.

Maksimum naprężenia pracującej sonotrody przypada w jej środku na wysokości odpowiadającej $\lambda/4$ ($1/4$ długości fali stojącej w danym materiale – węzeł fali). Sonotroda jest w tym miejscu obciążana zmęczeniowo z częstotliwością odpowiadającą pracy układu ultradźwiękowego. Naprężenie w sonotrodzie wraz z oddalaniem się od węzła fali maleje zgodnie z funkcją sinus. Oznacza to, że sonotroda w kierunku $\lambda/2$ ma dużo mniejsze wymagania względem wytrzymałości zmęczeniowej. Zastosowanie uszczelnień niezależnych od położenia na wysokości sonotrody pozwala na wprowadzenie chłodzenia powyżej miejsca najbardziej obciążonego.

Chłodzona cieczą podstawa z miedzi, wolframu lub ich stopów wyposażona jest w przyłącza cieczy chłodzącej, stanowiącej wspólny lub osobny obieg do systemu chłodzenia sonotrody. Szczelina pomiędzy sonotrodą a chłodzoną podstawą jest nie większa niż 2 mm, co utrudnia wpływanie ciekłego stopu pomiędzy elementy. Dodatkowo ściany otworu w podstawie chłodzonej są fazowane w taki sposób, że szerokość szczeliny jest większa w kierunku przetwornika ultradźwiękowego, co ułatwia usuwanie sonotrody i zapobiega jej klinowaniu. Ponadto w szczelinie korzystnie znajduje się folia grafitowa lub wykonana z innego materiału ceramicznego, która zapobiega napływowi ciekłego metalu wewnątrz układu. Korzystnie na otwór w chłodzonej cieczą podstawie z miedzi lub stopów miedzi wbija się pierścień z wolframu lub jego stopów, co pozwala zachować większą żywotność podstawy w przypadku topienia materiału łukiem plazmowym i ogranicza koszty wykonania elementu.

Korpus systemu chłodzenia składa się co najmniej z dwóch części zawierających rowki pod elastyczne uszczelnienia, przyłącza do cieczy chłodzącej oraz element centrujący na kołnierzu falowodu pośredniego. Części systemu chłodzenia skręcane są śrubami lub łączone obejmami w taki sposób, że każdy kolejny element centruje się na kołnierzu falowodu pośredniego. Materiałem korpusu systemu chłodzenia jest stal nierdzewna lub inne stopy odporne na korozję w środowisku danego medium chłodzącego. Wewnętrzna część korpusu chłodzenia może być powleczona materiałem polimerowym w celu wyciszenia układu i ograniczenia zniszczenia kawitacyjnego.

Elastyczne uszczelki wykonane są z wysokotemperaturowych elastomerów np. Vitonu. Warunkiem działania uszczelki jest zapewnienie odkształcenia sprężystego większego od poprzecznej i podłużnej amplitudy osiowosymetrycznej sonotrody, a jednocześnie docisku mniejszego niż powodujący zgrzewanie się materiału uszczelki. Takie warunki łatwo osiągnąć używając uszczelnień typu X-ring lub innych uszczelnień elastomerowych o co najmniej dwóch powierzchniach kontaktu z sonotrodą, i budowie pozwalającej na wzajemnie przemieszczenie powierzchni kontaktu z sonotrodą. Znacząca jest w stanie zaproponować również inne analogiczne rozwiązania np. uszczelnienia typu Variseal, Duoseal lub uszczelki wargowe.

Korzystnym jest, jeśli pierwsza lub druga elastyczna uszczelka znajduje się na pierścieniu centrującym zamontowanym w korpusie systemu chłodzącego, przy czym pierścień centrujący posiada dodatkowe zewnętrzne uszczelnienie do korpusu systemu chłodzącego. Zastosowanie dodatkowego

pierścienia centrującego pozwala na przystosowanie układu chłodzenia pod zmienną geometrię (średnicę, wzmocnienie) sonotrody. Dzięki temu otrzymuje się uniwersalny system mocowania przydatny podczas ultradźwiękowej atomizacji lub odlewania różnych stopów.

Korzystnie układ ultradźwiękowy ma kierownicę przepływu cieczy chłodzącej w postaci naciętej tulei, umieszczonej pomiędzy pierwszą elastyczną uszczelką a drugą elastyczną uszczelką. Tuleja wymusza przepływ cieczy chłodzącej w osiowym kierunku sonotrody i zapobiega zapowietrzeniu układu. W przypadku wysokiej mocy cieplnej odbieranej od sonotrody, chłodziwo w pobliżu pierwszej elastycznej uszczelki może zostać doprowadzone do wrzenia, co znacznie ogranicza zdolność chłodzenia w tej części układu i może doprowadzić do degradacji materiału uszczelki. Zastosowanie kierownicy przepływu wymusza przepływ cieczy w tej części układu. W przypadku zastosowania dodatkowych pierścieni centrujących w miejscu pierwszej uszczelki, kierownica przepływu dodatkowo zapewnia stabilne mocowanie pierścienia.

Korzystnie układ ultradźwiękowy ma trzecią uszczelkę i przyłączy sprężonego gazu w korpusie systemu chłodzenia zamontowane w taki sposób, że korpus systemu chłodzenia, sonotroda, druga elastyczna uszczelka i trzecia uszczelka tworzą komorę bezpieczeństwa. W przypadku wycieku chłodziwa dodatkowy stopień układu chłodzenia uniemożliwia jego wyciek i zniszczenie (zalenie) przetwornika. Komora bezpieczeństwa może pełnić również rolę przyłącza gazów procesowych bezpośrednio do sonotrody np. w przypadku wykonania otworów przelotowych w sonotrodzie.

Korzystnie sonotroda wykonana jest z miedzi lub stopów na bazie miedzi, wyposażona jest w umiejscowiony centralnie otwór przelotowy i otwór prostopadły do osi sonotrody umiejscowiony poniżej drugiej uszczelki typu X-ring, oraz stoper umieszczony w otworze przelotowym sonotrody, który umieszczony jest od strony falowodu pośredniego. Stoper wykonany jest w taki sposób, żeby jego największa średnica była większa od średnicy otworu centralnego, ale mniejsza od średnicy łącznika sonotrody i falowodu przejściowego. Uniemożliwia to przemieszczenie stopera pod wpływem ultradźwięków na czoło sonotrody. Sonotroda z centralnym otworem stosowana jest do topienia lewitacyjnego metali wysokotopliwych, lub do odlewania podciśnieniowego metali wysokotopliwych. Odlewanie metali wysokotopliwych przeprowadza się przez topienie ich na czole sonotrody a następnie zasysanie do otworu centralnego. Stoper wykonany jest z grafitu lub innego materiału ceramicznego, tak że ciekły metal go nie zwilża. Jednocześnie szczelina między stoperem a otworem jest nie większa niż 200 μm , co uniemożliwia wplynięcie ciekłego metalu do otworów prostopadłych do osi sonotrody.

Układ ultradźwiękowy według wynalazku może stanowić część atomizera ultradźwiękowego wykorzystującego skupione źródło ciepła, czego przykładem jest opisany w chińskim dokumencie patentowym CN105855558A atomizer wykorzystujący drut jako materiał wsadowy. Może również stanowić część atomizera wykorzystującego wiązkę elektronów, jak przedstawiono w niemieckim dokumencie DE3032785A1.

Atomizację ultradźwiękową prowadzi się cyklicznie, topiąc materiał rozpylany łukiem plazmowym na sonotrodzie i chłodząc go, aż do uzyskania trwałego połączenia metalurgicznego, a następnie atomizując materiał rozpylany przez jednoczesne topienie łukiem plazmowym i działanie ultradźwięków, następnie uzupełnienie ubytku w sonotrodzie przez ponowne topienie na niej materiału rozpylanego i napawanie uprzednio usuniętej warstwy. Prowadzenie atomizacji w sposób cykliczny z zastosowaniem topienia łukowego pozwala kontrolować proces atomizacji i ograniczyć rozpylanie materiału sonotrody, a w konsekwencji kontaminację proszku. Zastosowanie chłodzonej cieczą podstawy umożliwia płynne sterowanie łukiem, gdyż po rozpyleniu wierzchniej warstwy materiału łuk plazmowy zamykać będzie obwód elektryczny układu zasilającego na elemencie najbardziej wystającym tj. na chłodzonej podstawie, a konsekwencji proces atomizacji będzie się wygaszał, osiągając stan samoregulacji.

Przedmiot wynalazku został ukazany w przykładach wykonania na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia układ ultradźwiękowy według wynalazku, fig. 2 przedstawia układ ultradźwiękowy według wynalazku z dodatkowymi pierścieniami centrującymi, fig. 3 przedstawia układ ultradźwiękowy według wynalazku z dodatkowymi pierścieniami centrującymi, tuleją kierującą przepływ cieczy chłodzącej i dodatkową komorą bezpieczeństwa, fig. 4 przedstawia układ ultradźwiękowy według wynalazku z dodatkowymi pierścieniami centrującymi, tuleją kierującą przepływ cieczy chłodzącej i dodatkową komorą bezpieczeństwa, który wyposażony jest w sonotrodę przeznaczoną do ultradźwiękowego odlewania metali wysokotopliwych, zaś fig. 5a–d przedstawiają sposób prowadzenia atomizacji ultradźwiękowej uwidaczniając kolejne jej kroki.

Układ ultradźwiękowy według przykładu pierwszego zawiera przetwornik ultradźwiękowy 101 o częstotliwości pracy 20 kHz i pojemności 13,4 nF oraz falowód pośredni 102 o średnicy 38 mm wykonany ze stopu aluminium serii 7075 z kołnierzem 102a. Falowód pośredni przyłączony jest do sonotrody 103 wykonanej ze stopu aluminium 7075 o długości 120 mm, która odpowiada połowie długości fali stojącej dla częstotliwości pracy przetwornika. Sonotroda 103 znajduje się w otworze w podstawie chłodzącej 104 wykonanej ze stopu CuCr1Zr0.2 o grubości 12 mm, przy czym w podstawie chłodzącej znajdują się otwory chłodzące o średnicy 5 mm. Chłodzona podstawa 104 opiera się o pierwszą część układu chłodzenia 105a wykonaną ze stali AISI 316. W szczelinie pomiędzy sonotrodą 103 a podstawą 104 znajduje się szczelina 104a o szerokości 2 mm wypełniona folią z miki o grubości 1,5 mm. Do pierwszej części układu chłodzenia 105a dołączona jest druga część układu chłodzenia 105b wykonana ze stopu AISI 316. Obydwie części mają powierzchnie stożkowe w miejscu łączenia i skręcane są śrubami. Do sztywnego kołnierza falowodu pośredniego 102a przyłączona jest druga część korpusu chłodzenia 105b. W pierwszej części układu chłodzenia 105a znajduje się rowek 106a pod pierwszy X-ring 107a o wymiarach 37,69 x 3,53 mm wykonany z Vitonu. W drugiej części układu chłodzenia 105b znajduje się rowek 106b pod drugi X-ring 107b o wymiarach 37,69 x 3,53 mm, również wykonany z Vitonu. W przestrzeń chłodzącą tłoczy się chłodziwo na bazie glikolu etylowego pod ciśnieniem 3 atm przez króćce zasilające 108. Przepływ chłodziwa zaznaczono strzałkami.

Układ ultradźwiękowy według przykładu drugiego ma przetwornik ultradźwiękowy 201 o częstotliwości pracy 40 kHz i pojemności 9,4 nF oraz falowód pośredni 202 o średnicy 21 mm wykonany ze stopu Ti6Al4V z kołnierzem 202a. Falowód pośredni przyłączony jest do sonotrody 203 wykonanej ze stali HSS M2 o długości 56 mm, która odpowiada połowie długości fali stojącej dla częstotliwości pracy przetwornika. Sonotroda 203 znajduje się w otworze w podstawie chłodzącej 204 wykonanej z miedzi o grubości 8 mm, przy czym w podstawie chłodzącej znajdują się otwory chłodzące o średnicy 3 mm. Pomiedzy chłodzoną podstawą 204 a sonotrodą 203 znajduje się szczelina z folią grafitową 204a o grubości 0,5 mm. Chłodzona podstawa 204 opiera się o pierwszą część układu chłodzenia 205a wykonaną ze stali AISI 316. Do pierwszej części układu chłodzenia dołączona jest druga część układu chłodzenia 205b wykonana ze stopu AISI 316. Obydwie części mają powierzchnie stożkowe w miejscu łączenia i skręcane są śrubami. Do sztywnego kołnierza falowodu pośredniego 202a przyłączona jest druga część korpusu chłodzenia 205b. W pierwszej części układu chłodzenia znajduje się pierścień z rowkiem 206a pod pierwszą uszczelkę 207a o średnicy nominalnej 20 mm wykonaną z Vitonu, przy czym pierwszy pierścień centrujący 206a zawiera O-ring 209a o wymiarach 32 x 3 mm, uszczelniający go do pierwszej części komory chłodzenia 205a. W drugiej części układu chłodzenia 205b znajduje się pierścień z rowkiem 206b pod drugą uszczelkę typu x-ring o wymiarach 19,69 x 3,2 mm, również wykonaną z Vitonu, przy czym drugi pierścień centrujący 206b zawiera o-ring 209b o wymiarach 32 x 3 mm, uszczelniający go do drugiej części układu chłodzenia 205b. W przestrzeń chłodzącą tłoczy się chłodziwo na bazie wody pod ciśnieniem 6 atm przez króćce zasilające 208. Przepływ chłodziwa zaznaczono strzałkami.

Układ ultradźwiękowy według przykładu trzeciego ma przetwornik ultradźwiękowy o częstotliwości pracy 20 kHz i pojemności 13,4 nF oraz falowód pośredni 302 o średnicy 38 mm wykonany ze stopu Ti6Al4V z kołnierzem falowodu pośredniego. Falowód pośredni przyłączony jest do sonotrody 303 wykonanej ze stopu Ti6Al4V o długości 240 mm, która odpowiada długości fali stojącej dla częstotliwości pracy przetwornika. Sonotroda 303 znajduje się w otworze w podstawie chłodzonej 304 wykonanej ze stopu Ampcoloy 972 o grubości 12 mm, przy czym w podstawie chłodzącej znajdują się otwory chłodzące o średnicy 5 mm. Chłodzona podstawa 304 ma kształt dysku i opiera się o pierwszą część układu chłodzenia 305a wykonaną ze stali AISI 316. Do pierwszej części układu chłodzenia 305a dołączona jest druga część układu chłodzenia 305b wykonana ze stopu AISI 316. Do drugiej części układu chłodzenia 305b dołączona jest trzecia część układu chłodzenia 305c wykonana ze stopu AISI 316. Wszystkie części mają powierzchnie stożkowe w miejscu łączenia i skręcane są śrubami, a pomiędzy częścią drugą 305b a trzecią 305c układu chłodzenia znajduje się dodatkowy pierścień dystansowy 306c z uszczelką 307c. Wysokość pierścienia dystansowego 306c pozwala regulować zagłębienie sonotrody 303 w chłodzonej podstawie 304, oraz tworzy komorę bezpieczeństwa pomiędzy drugim uszczelnieniem typu X-ring 307b a trzecią uszczelką 307c, przy czym komora bezpieczeństwa podłączona jest do króćca, przez który tłoczy się powietrze o ciśnieniu 4 atm. Do sztywnego kołnierza falowodu pośredniego przyłączona jest trzecia część korpusu chłodzenia 305c. W pierwszej części układu chłodzenia znajduje się pierścień z rowkiem 306a pod pierwszy X-ring 307a o wymiarach 37,69 x 3,53 mm wykonany z Vitonu, przy czym pierwszy pierścień centrujący 306a zawiera x-ring 309a o wymiarach

50 x 3 mm, uszczelniający go do pierwszej części komory chłodzenia 305a. W drugiej części układu chłodzenia 305b znajduje się pierścień z rowkiem 306b pod drugi X-ring 307b o wymiarach 37,69 x 3,53 mm, również wykonany z Vitonu, przy czym drugi pierścień centrujący 306b zawiera x-ring 309b o wymiarach 52 x 3 mm, uszczelniający go do drugiej części układu chłodzenia 305b. Drugi pierścień centrujący 306b jest wykonany w taki sposób, że drugi X-ring 307b znajduje się powyżej x-ring 309b, patrząc od strony przetwornika, co pozwala zmniejszyć wysokość chłodzenia sonotrody i w konsekwencji zmniejszyć obciążenie układu ultradźwiękowego. Pomiędzy pierwszym pierścieniem centrującym 306a a drugą częścią układu chłodzenia 305b znajduje się tuleja z nacięciami 310, która wymusza przepływ cieczy chłodzącej pomiędzy króćcami 308 w pobliżu pierwszego pierścienia centrującego 306a (zgodnie z zaznaczonymi strzałkami). Tuleja z nacięciami 310 opiera się na pierścieniu 306a i drugiej części układu chłodzenia 305b. W przestrzeń chłodzącą tłoczy się chłodziwo na bazie glikolu etylowego pod ciśnieniem 3 atm przez króćce zasilające 308.

Układ ultradźwiękowy według przykładu czwartego ma przetwornik ultradźwiękowy o częstotliwości pracy 20 kHz i pojemności 13,4 nF oraz falowód pośredni o średnicy 38 mm wykonany ze stopu Ti6Al4V z kołnierzem falowodu pośredniego. Falowód pośredni przyłączony jest do sonotrody 403 wykonanej ze stopu Ampcoloy 972 o długości 180 mm, która odpowiada długości fali stojącej dla częstotliwości pracy przetwornika. Sonotroda 403 ma centralny otwór 403a o średnicy 8,5 mm sięgający łącznika 403b z falowodem pośrednim 402. Do otworu z gwintem M12, w którym znajduje się łącznik 403b, doprowadzony jest otwór prostopadły do osi sonotrody 403c, a nad łącznikiem 403b znajduje się stoper 403d z grafitu o średnicy większej 10 mm i średnicy mniejszej 8,3 mm. Zastosowanie chłodzonej sonotrody z otworem pozwala na odlewane prętów podczas działania ultradźwięków. Sonotroda 403 znajduje się w otworze w podstawie chłodzącej 404 wykonanej ze stopu Ampcoloy 972 o grubości 12 mm, przy czym w podstawie chłodzącej znajdują się otwory chłodzące o średnicy 5 mm. Chłodzona podstawa 404 opiera się o pierwszą część układu chłodzenia 405a wykonaną ze stali AISI 316. Do pierwszej części układu chłodzenia 405a dołączona jest druga część układu chłodzenia 405b wykonana ze stopu AISI 316. Do drugiej części układu chłodzenia 405b dołączona jest trzecia część układu chłodzenia 405c wykonana ze stopu AISI 316. Wszystkie części mają powierzchnie stożkowe w miejscu łączenia i skręcane są śrubami, a pomiędzy częścią drugą 405b a trzecią 405c znajduje się dodatkowy pierścień dystansowy 406c z uszczelką 407c, który pozwala regulować zagłębienie sonotrody 403 w chłodzonej podstawie 404, oraz tworzy komorę bezpieczeństwa pomiędzy drugim uszczelnieniem typu X-ring 407b a trzecim uszczelnieniem 407c, przy czym kolejna komora poniżej trzeciego uszczelnienia podłączona jest do króćca podłączonego przez zawór do pompy próżniowej. Do sztywnego kołnierza falowodu pośredniego przyłączona jest trzecia część korpusu chłodzenia 405c. W pierwszej części układu chłodzenia znajduje się pierścień z rowkiem 406a pod pierwszy X-ring 407a o wymiarach 37,69 x 3,53 mm wykonany z Vitonu, przy czym pierwszy pierścień centrujący 406a zawiera O-ring 409a o wymiarach 52 x 3 mm, uszczelniający go do pierwszej części komory chłodzenia 405a. W drugiej części układu chłodzenia 405b znajduje się pierścień z rowkiem 406b pod drugi X-ring 407b o wymiarach 38,69 x 3,53 mm, również wykonany z Vitonu, przy czym drugi pierścień centrujący 406b ma o-ring 409b o wymiarach 52 x 3 mm, uszczelniający go do drugiej części układu chłodzenia 405b. Drugi pierścień centrujący 406b jest wykonany w taki sposób, że drugi X-ring 407b znajduje się powyżej O-ring 409b, patrząc od strony przetwornika, co pozwala zmniejszyć wysokość chłodzenia sonotrody i w konsekwencji zmniejszyć obciążenie układu ultradźwiękowego. Pomiędzy pierwszym pierścieniem centrującym 406a a drugą częścią układu chłodzenia 405b znajduje się tuleja z nacięciami 410, która wymusza przepływ cieczy chłodzącej pomiędzy króćcami 408 w pobliżu pierwszego pierścienia centrującego 406a. Kierunek przepływu chłodziwa zaznaczono strzałkami. Tuleja z nacięciami 410 opiera się na pierścieniu 406a i drugiej części układu chłodzenia 405b. W przestrzeń chłodzącą tłoczy się chłodziwo na bazie glikolu etylowego pod ciśnieniem 3 atm przez króćce zasilające 408.

Atomizacja ultradźwiękowa wykorzystująca układ wg. trzeciego przykładu została przedstawiona na fig. 5 a–d. Fig. 5a przedstawia sonotrodę 501 w chłodzonej podstawie 502, ponad sonotrodą znajduje się wolframowa elektroda 503, która utrzymuje wyładowanie łukowe 504 o natężeniu 300A, zaś pomiędzy sonotrodą 501 a elektrodą 503 znajduje się wsad 505 w postaci zniszczonych wydruków 3D ze stopu Ti6Al4V o wadze 25 g, który jest topiony przez 10 sekund w wyładowaniu łukowym. Na fig. 5b przedstawiono stan po stopieniu materiału, wyłączeniu łuku i 10-sekundowym chłodzeniu. Powstały nadlew materiału przeznaczonego do atomizacji 506 powstał przez wtopienie wsadu 505 w czoło sonotrody 501. Na fig. 5c przedstawiono układ podczas procesu atomizacji z proszkiem 507 ulatującym z jeziorka spawalniczego. Amplituda nominalna na czole sonotrody wynosi 30 μ m przy częstotliwości

20 kHz. Fig. 5d przedstawia układ po cyklu procesu z wyładowaniem łukowym zamykającym układ zasilania na chłodzonej podstawie 502. Ubytek materiału rozpylanego prowadzi do zatrzymania dalszego procesu atomizacji i po nałożeniu wsadu cykl może być powtarzany, gdyż możliwe jest zamknięcie układu zasilającego łuk na nowym wsadzie. Całość cyklu prowadzona jest w atmosferze argonu o czystości 5.0. Konstrukcja uszczelnień pozwala na wcześniejsze odpompowanie tlenu resztkowego za pomocą pompy próżniowej, a konstrukcja uszczelnień zapobiega przedostaniu się chłodziwa do komory roboczej podczas odsysania. Samoregulacja procesu wynika z właściwości łuku elektrycznego tj. dążenia do zamknięcia obwodu na najbliższym względem elektrody przewodnika, i korzysta z właściwości chłodzonej podstawy miedzianej, przy której materiał nie topi się pod wpływem łuku elektrycznego.

Znawca zapoznawszy się z powyższym opisem będzie w stanie zaproponować różne inne materiały oraz rozwiązania podstaw chłodzących i mechaniczne sposoby uszczelnienia sonotrody nie odchodząc od istoty wynalazku, który umożliwi rozpoczęcie studzenia sonotrody blisko końcówki roboczej i wykorzystanie chłodzonej podstawy do ograniczenia rozlewania się czoła sonotrody, a także wykorzystanie chłodzonej podstawy do samoregulacji procesu atomizacji.

Znawca bez trudu przeskaluje sonotrodę według przykładu wykonania na inną częstotliwość roboczą, jak również bez trudu zaproponuje źródła drgań mechanicznych, zwłaszcza ultradźwięków.

Zastrzeżenia patentowe

1. Układ ultradźwiękowy przeznaczony do pracy w wysokiej temperaturze, zawierający przetwornik ultradźwiękowy (101, 201), połączony z nim falowód pośredni (102, 202, 302, 402) z kołnierzem mocującym (102a, 202a) i połączoną z falowodem pośrednim sonotrodę (103, 203, 303, 403), **znamienny tym**, że zawiera ponadto chłodzoną podstawę (104, 204, 304, 404) z otworem, w którym znajduje się sonotroda (103, 203, 303, 403), oraz korpus układu chłodzenia (105a, 205a, 305a, 405a, 105b, 205b, 305b, 405b) z pierwszą uszczelką (107a, 207a, 307a, 407a) i drugą uszczelką (107b, 207b, 307b, 407b), które to uszczelki rozmieszczone są na sonotrodzie (103, 203, 303, 403), przy czym sonotroda (103, 203, 303, 403) ma płaszcz chłodzący do prowadzenia cieczy chłodzącej znajdujący się pomiędzy korpusem układu chłodzenia (105a, 205a, 305a, 405a, 105b, 205b, 305b, 405b), pierwszą uszczelką (107a, 207a, 307a, 407a), drugą uszczelką (107b, 207b, 307b, 407b) i powierzchnią boczną sonotrody (103, 203, 303, 403), i przy czym korpus układu chłodzenia (105a, 205a, 305a, 405a, 105b, 205b, 305b, 405b) jest zamocowany do kołnierza (102a, 202a) mocującego falowodu pośredniego (102, 202, 302, 402).
2. Układ ultradźwiękowy według zastrz. 1, **znamienny tym**, że ma komorę bezpieczeństwa znajdującą się pomiędzy drugą częścią układu chłodzenia (305b) a powierzchnią sonotrody (303, 403), zaopatrzoną w dodatkową uszczelkę (307c, 407c) i przyłączy sprężonego gazu.
3. Układ ultradźwiękowy według zastrz. 1 **znamienny tym**, że sonotroda (403) jest wykonana ze stopu miedzi i ma centralny otwór przelotowy (403a) oraz krzyżujący się z nim otwór prostopadły do osi sonotrody (403c), umiejscowiony poniżej płaszcz chłodzącego, a także ma stoper (403d) umieszczony w otworze przelotowym sonotrody (403a) od strony bliższej falowodu pośredniego (402).
4. Układ ultradźwiękowy według zastrz. 1, **znamienny tym**, że w szczelinie (104a, 204a) pomiędzy sonotrodą (103, 203) a chłodzoną podstawką (104, 204) z miedzi, lub stopu miedzi, umieszczona jest folia grafitowa lub wykonana z innego materiału ceramicznego.

Rysunki

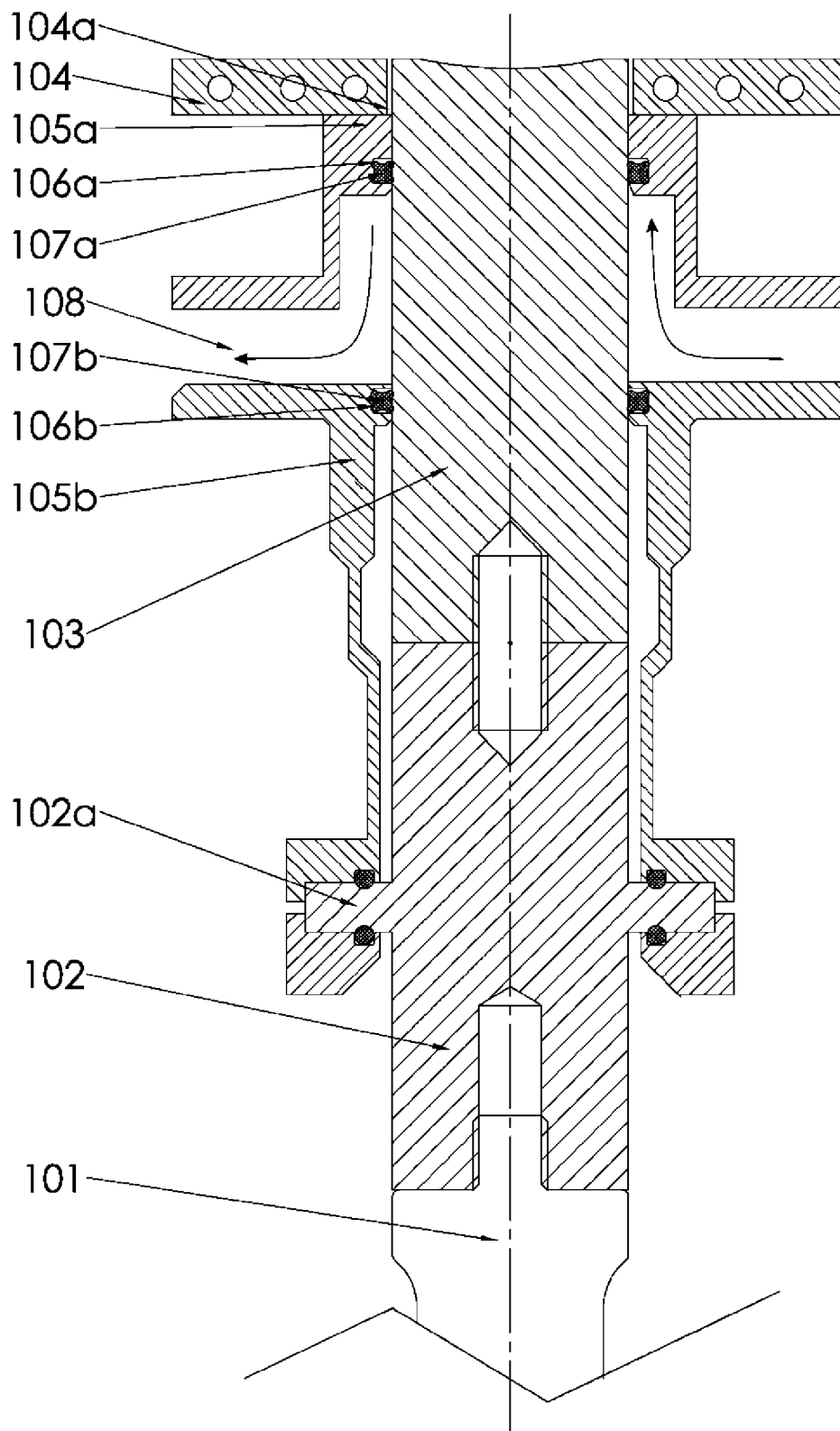


Fig. 1

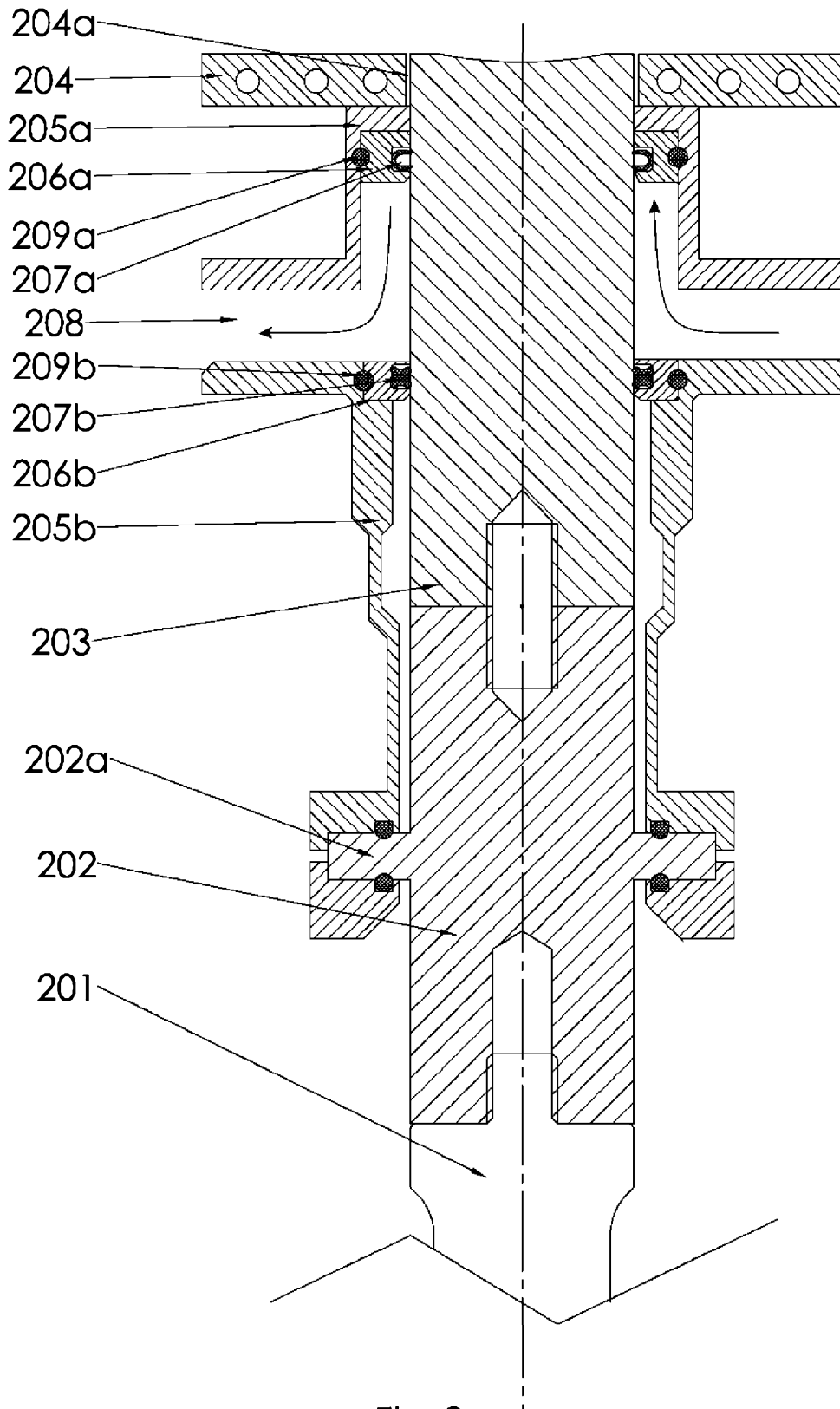


Fig. 2

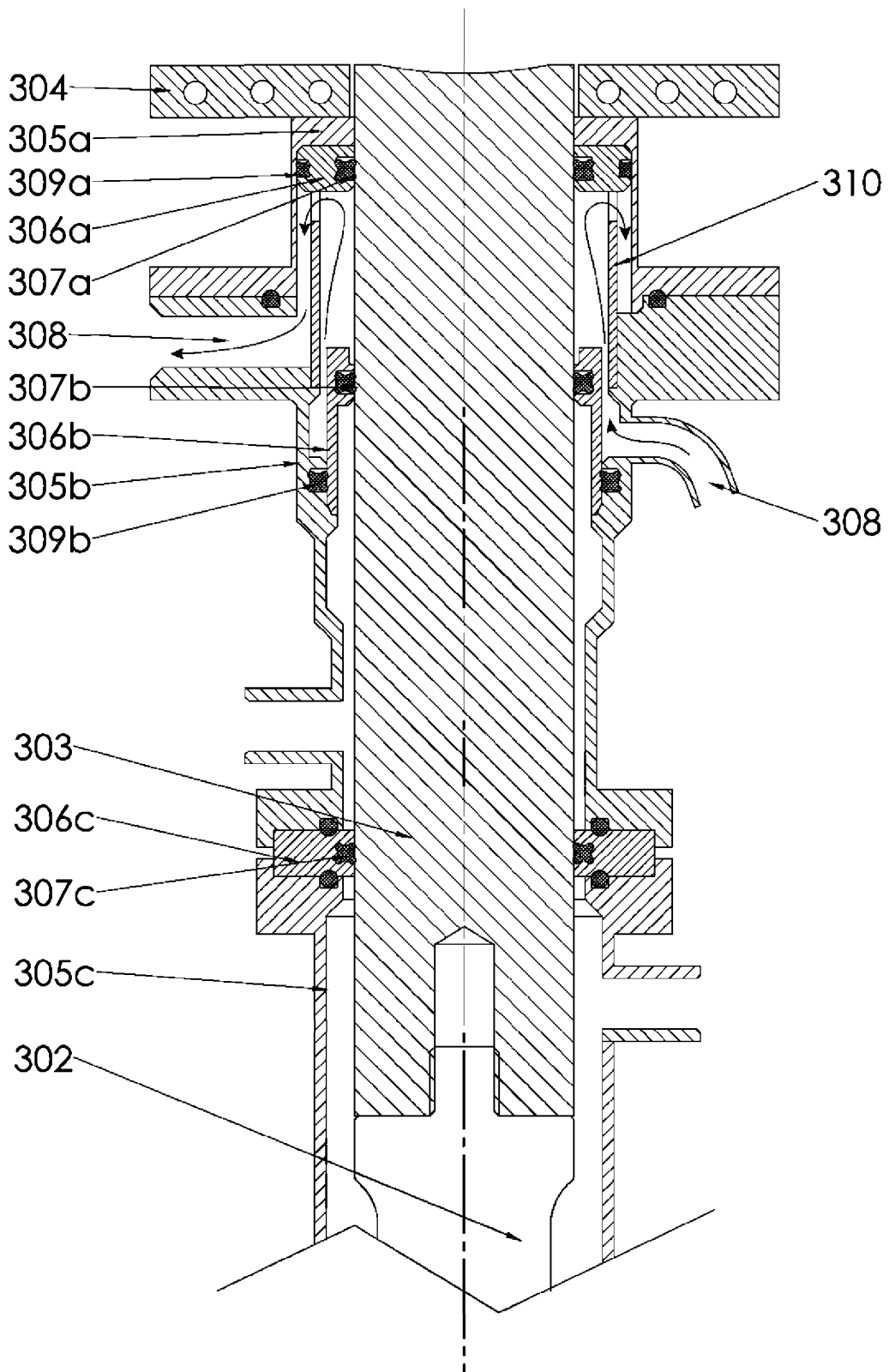


Fig. 3

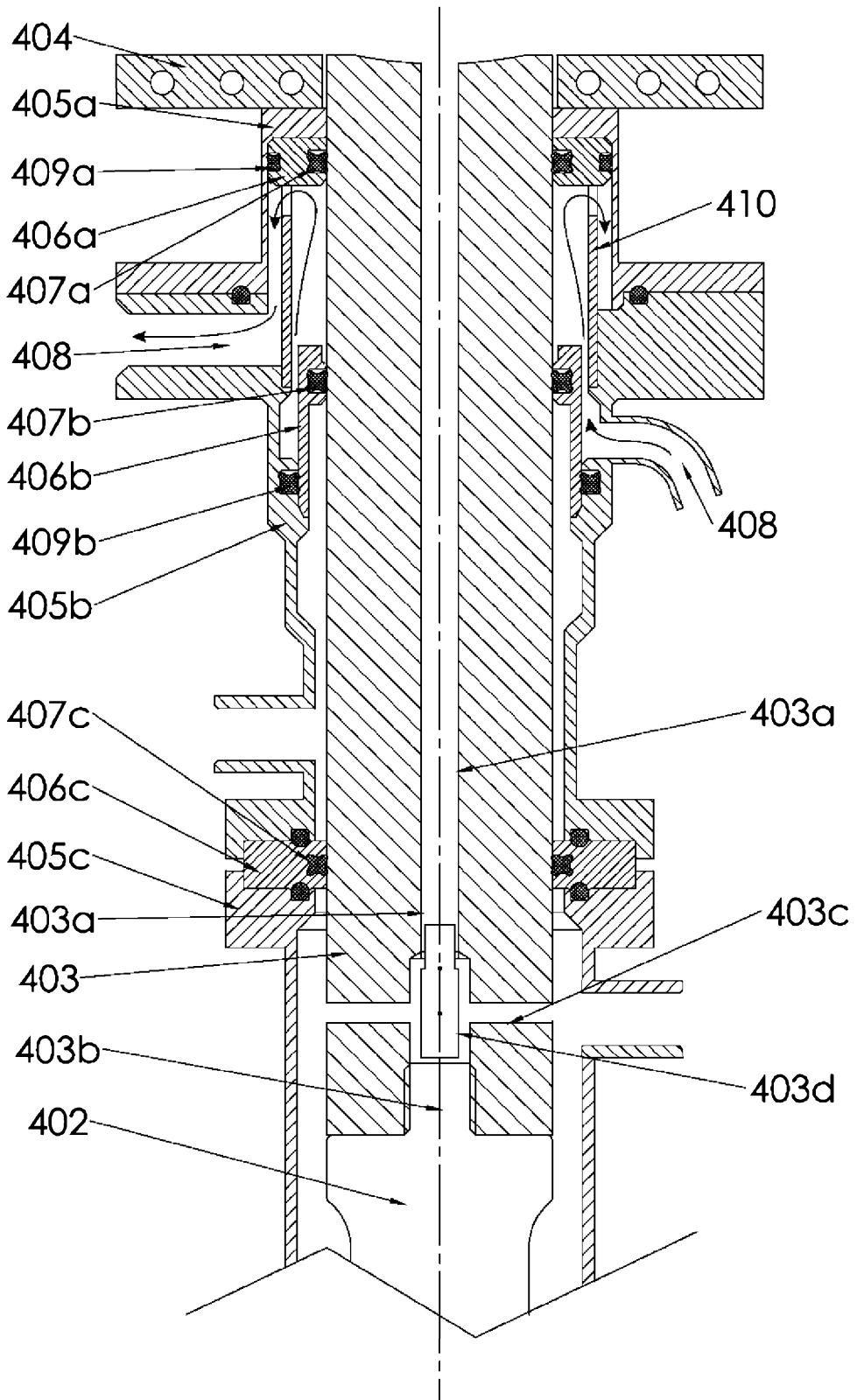


Fig. 4

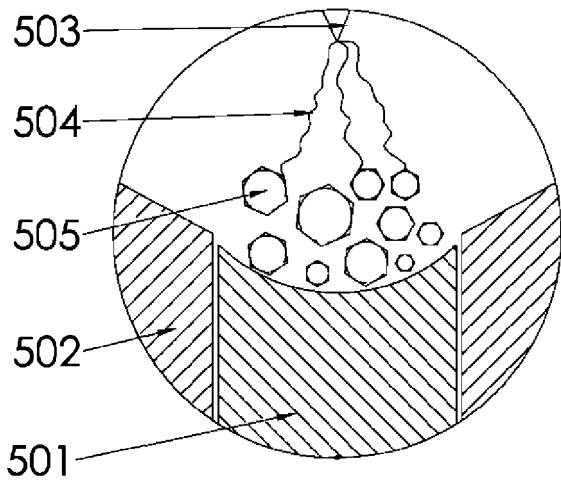


Fig. 5a

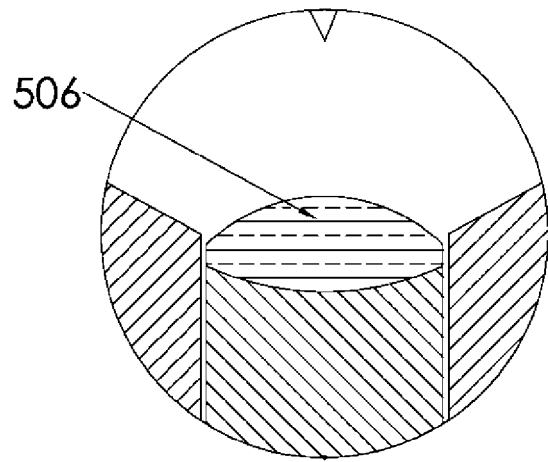


Fig. 5b

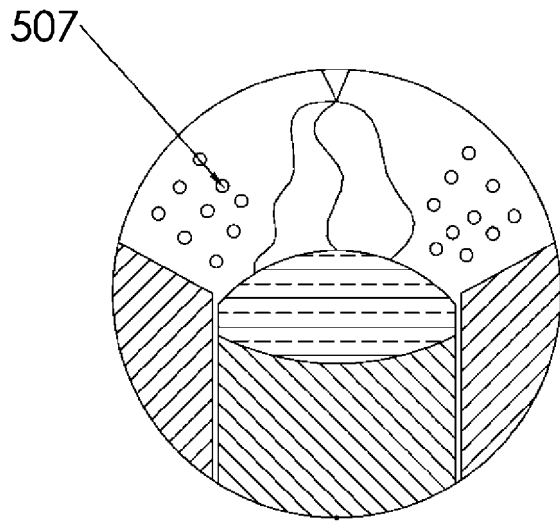


Fig. 5c

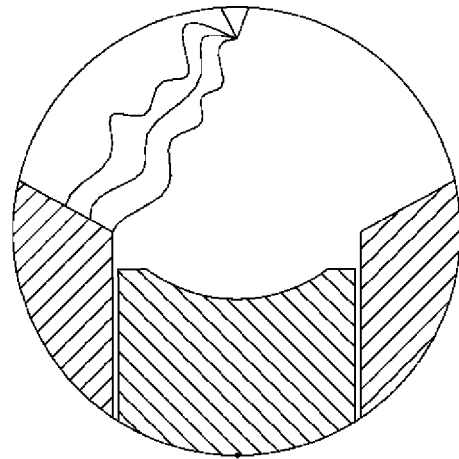


Fig. 5d