

## **Sonotroda do urządzenia do atomizacji ultradźwiękowej metali i ich stopów**

Wynalazek dotyczy sonotrody przeznaczonej do urządzenia do atomizacji ultradźwiękowej stopionych metali i ich stopów o temperaturze topnienia większej niż 600°C.

Jedną z metod wytwarzania wysokiej jakości proszków metalicznych jest metoda atomizacji ultradźwiękowej. Proszki takie znajdują zastosowanie jako surowiec do druku 3D w technologiach przyrostowych, metalurgii proszków (spiekanie) i pokryć metalicznych o przeznaczeniu specjalnym.

W metodzie atomizacji ultradźwiękowej do rozpylenia materiału dochodzi na skutek niestabilności fali stojącej w cieczy przy jej wysokiej amplitudzie. Po pokonaniu sił lepkości następuje emisja pojedynczej kropli w każdej strzałce fali, a następnie proces powtarza się po ponownym uzyskaniu niestabilności. Technika ta jest powszechnie wykorzystywana w niskich temperaturach, tj. przy atomizacji roztworów na bazie wody lub rozpuszczalników organicznych, albo przy atomizacji metali niskotopliwych, szczególnie lutów cynowych. Atomizacja stopów w wyższej temperaturze, tzn. powyżej temperatury topnienia aluminium jest w typowych układach utrudniona ze względu na rozkalibrowanie sonotrody i zniszczenia kawitacyjne.

Aby zwiększyć trwałość sonotrody w warunkach temperatury atomizacji metalu w zakresie 600°C – 3000°C niniejszy wynalazek wykorzystuje kombinację różnych materiałów, aby efektywnie wykorzystać ich odmienne właściwości w różnych temperaturach, takie jak rozszerzalność termiczna, wytrzymałość, temperatura topnienia i przewodność cieplna.

Przedmiotem wynalazku jest sonotroda do urządzenia do atomizacji ultradźwiękowej metali i ich stopów, obejmująca korpus z materiału o przewodności cieplnej większej niż 150 W/m\*K oraz rdzeń stanowiący końcówkę wysokotemperaturową sonotrody, z materiału o temperaturze topnienia lub rozkładu termicznego wynoszącej co najmniej

1200°C, przy czym korpus i rdzeń połączone są mechanicznie albo dyfuzyjnie albo za pomocą obu metod łącznie.

Korzystnie połączenie korpusu i rdzenia obejmuje: połączenie przez wcisk lub za pomocą gwintu lub stożka Morse'a lub pasowanie termo-kurczliwe lub za pomocą lutowania.

Korzystnie część lub całość powierzchni bocznej korpusu ma pokrycie o twardości większej niż 250 HV i grubości do 3 mm.

Korzystnie korpus sonotrody jest wyposażony w system do chłodzenia go z zewnątrz, korzystnie na co najmniej 30% części powierzchni bocznej, za pomocą cieczy chłodzącej o właściwościach: ciepło właściwe  $> 1200 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  i prężność par nie większej niż 70 kPa w temperaturze 90°C przy ciśnieniu 1 barA.

Korzystnie ciecz chłodząca jest pod ciśnieniem.

Korzystnie powierzchnia gorącego końca sonotrody, co najmniej w obszarze rdzenia, jest teksturowana, w szczególności profilowana, żłobiona, nacinana lub nawiercana na głębokość do 3 mm.

Sonotroda według wynalazku spełnia łącznie następujące funkcje:

- Atomizacja stopionego materiału odbywa się na rdzeniu; materiał może być topiony na rdzeniu za pomocą np. łuku elektrycznego, plazmy, wiązki elektronów lub nad nią za pomocą dowolnego źródła ciepła wykorzystującego energię elektryczną (m.in. grzanie indukcyjne).
- Sonotroda atomizuje stopiony materiał na swoim gorącym końcu pod wpływem drgań o częstotliwości rezonansowej  $>10 \text{ kHz}$ . Drgania w sonotrodzie są wzbudzone przez przetwornik ultradźwiękowy i przenoszone do sonotrody od strony końca zimnego za pośrednictwem falowodu. Z uwagi na ograniczenia w systemie sterowania przetwornika i ryzyko jego uszkodzenia bądź przegrzania, system przetwornik-falowód-sonotroda może pracować w częstotliwościach odbiegających od częstotliwości na jaką został zaprojektowany nie więcej niż  $\pm 5\%$ . Jeśli któryś element układu się odstroi (np. w wyniku wytopienia czy erozji materiału) poza ten zakres, to musi zostać wymieniony.

- Wysoka temperatura powoduje w większości materiałów spadek modułu Younga (sprężystości), co pociąga za sobą spadek częstotliwości drgań własnych systemu. To naturalne zjawisko zmniejsza tę częstotliwość dla nowych sonotrod o 3 do 9 % przy topieniu metali w temperaturze  $>600^{\circ}\text{C}$ . Dlatego sonotrody do zastosowania jak wyżej wymagają chłodzenia, aby zminimalizować ten efekt za pomocą kąpieli wodnej lub innego medium chłodzącego.
- Korpus sonotrody, dzięki przewodności  $> 150 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  pełni funkcję radiatora, przekazując strumień ciepła od rdzenia do cieczy chłodzącej, którą chłodzona jest sonotroda na swojej powierzchni.
- Większa część energii sprężystej w drgającej sonotrodzie, która jest dostarczana przez przetwornik ultradźwiękowy, jest dysypowana (tracona) do cieczy chłodzącej. Suma tej energii oraz strumień ciepła pochodzący od gorącego końca sonotrody (przenoszony przez przewodzenie w sonotrodzie) powoduje, że powierzchnia sonotrody w kąpieli wodnej pracuje w warunkach kawitacji, co powoduje jej szybkie zniszczenie a następnie odstrojenie sonotrody od dopuszczalnego zakresu częstotliwości pracy przetwornika.
- Aby drgania były wydajnie przenoszone z sonotrody do atomizowanego materiału, rdzeń z materiału o wysokiej odporności termicznej powinien być stabilnie zamocowany w korpusie sonotrody. Metoda łączenia elementów jest istotna, ponieważ korpus jako wykonany z materiału o wysokiej przewodności ciepłej (np.  $17\text{E-}6 \text{ 1/K}$  dla stopów miedzi) ma też dużą rozszerzalność termiczną a rdzeń z materiału o wysokiej temperaturze topnienia (np.  $5\text{E-}6 \text{ 1/K}$  dla wolframu czy molibdenu) mają bardzo małą rozszerzalność termiczną. Dlatego złącze korpusu i rdzenia ma tendencję do otwierania się w wysokiej temperaturze.

Wynalazek zostanie teraz przedstawiony w przykładzie wykonania z odniesieniem do rysunku, na którym:

Fig. 1 przedstawia schematycznie sonotrodę według wynalazku,

Fig. 2 przedstawia schematy sonotrody z przykładem chłodzenia cieczą,

Fig 3. Przedstawia schemat przykładowego teksturowania sonotrody.

Fig. 1 przedstawia schematycznie sonotrodę z rdzeniem (2) stanowiącym gorący koniec sonotrody (H) i korpusem (1). Po stronie zimnego końca (C) sonotroda połączona jest z falowodem (3), a przez falowód z przetwornikiem ultradźwiękowym (niepokazany). Część sonotrody znajduje się w komorze chłodzenia cieczą (6).

Korpus (obudowa) (1) sonotrody wykonany jest ze stopu lub spieku o przewodności większej niż  $150 \text{ W/m}^2\text{K}$ , np. stopu miedzi. Temperatura topnienia lub rozkładu termicznego takiego materiału może być nawet o 1000 K niższa niż materiału atomizowanego.

Rdzeń (2) stanowi końcówkę wysokotemperaturową (H) sonotrody, na której odbywa się atomizacja stopionego metalu. Rdzeń wykonany jest z materiału o wysokiej odporności termicznej (temperatura topnienia lub rozkładu termicznego co najmniej o 200 K większa niż materiału atomizowanego) np. ze stopu wolframu, molibdenu, niobu, węglików spiekach. Objętość rdzenia jest mniejsza niż 30% objętości sonotrody, którą stanowią korpus (1), rdzeń (2) i pokrycie (5). Korpus (1) i rdzeń (2) są zespolone mechanicznie np. na wcisk prasą hydrauliczną, gwint, wcisk stożkiem Morse'a, pasowanie termo-kurczliwe, na odcinku nie mniejszym niż połowa średnicy rdzenia na gorącym końcu sonotrody (H). ewentualnie styk pokryty jest lutem wysokotemperaturowym celem poprawy strefy kontaktu, zwiększenia kohezji i wymiany ciepła między elementami w warunkach obciążenia termicznego.

Falowód (3) wykonany jest z materiału o niskim tłumieniu materiałowym np. stop tytanu, aluminium, stal. Falowód (3) połączony jest z korpusem (1) sonotrody za pomocą łącznika mechanicznego falowodu z sonotrodą (4).

Na powierzchni korpusu (1) sonotrody, w części sonotrody przeznaczonej do umieszczania w komorze chłodzenia cieczą (6), wykonane jest pokrycie (5) sonotrody o mikrotwardości  $>250 \text{ HV}$ , np. takie jak niklowanie, chromowanie, stopy na bazie Fe, Ni, Co, Cr takie jak Stellite czy stale stopowe, węgliki chromu/wolframu nakładane

dowolną metodą np. łukowo-plazmową, galwanicznie, HVOF, napawanie. Pokrycie to pełni funkcję m.in. ochrony przed kawitacją.

W komorze chłodzenia cieczą (6) następuje chłodzenie przepływającą cieczą o właściwościach: ciepło właściwe  $> 1200 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  i prężność par nie większa niż 70 kPa w temperaturze  $90^\circ\text{C}$  przy ciśnieniu 1 barA. Przy czym cieczą chłodzącą jest np. woda, glikol etylenowy lub propylenowy, olej mineralny, płyny silikonowe lub ich mieszanki.

Komora chłodzenia cieczą (6) uszczelniona jest uszczelkami z materiału odpornego na temperaturę wyższą niż  $300^\circ\text{C}$  umieszczonymi w odległości nie bliższej niż 10 mm od końców sonotrody.

Sonotroda ma kształt obrotowo-symetryczny np. walcowy, stożkowy, w parasol, a jej gorący koniec (H) może być wyprofilowany np. w łódeczkę, krzyż, otworki celem zwiększenia wydajności atomizacji (powiększa obszar kontaktu ciecz – rdzeń i poprawia zwilżalność powierzchni).

Sonotroda wg niniejszego wynalazku może być zainstalowana w atomizerze ultradźwiękowym przystosowanym do produkcji proszków z materiałów takich jak stale różnych gatunków i stopy tytanu. Sposób instalacji pokazano na Fig. 2 . Korpus sonotrody jest wykonany ze stopu miedzi, a rdzeń z niobu i został osadzony w korpusie na wcisk za pomocą prasy hydraulicznej. Korpus sonotrody jest wyposażony w zewnętrzny system do chłodzenia cieczą niskiej prężności par, co ogranicza zjawisko kawitacji na powierzchniach chłodzonych.