

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL** (11) **236467**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **425566**

(22) Data zgłoszenia: **16.05.2018**

(51) Int. Cl.

B22D 27/04 (2006.01)

B22C 9/00 (2006.01)

(54)

Sposób wytwarzania odlewów zwłaszcza z nadstopów niklu

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

18.11.2019 BUP 24/19

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

25.01.2021 WUP 02/21

(73) Uprawniony z patentu:

**POLITECHNIKA RZESZOWSKA
IM. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA, Rzeszów, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

DARIUSZ SZELIGA, Trzeboś, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Henryk Pisiński

PL 236467 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób wytwarzania odlewów zwłaszcza z nadstopów niklu mający zastosowanie przede wszystkim w wytwarzaniu precyzyjnych odlewów na potrzeby przemysłu lotniczego.

Nadstopy niklu stosowane są w konstrukcji podzespołów części gorącej silników lotniczych i przemysłowych turbin gazowych. Charakteryzują się dużą odpornością na pękanie oraz korozję wysokotemperaturową w wysokiej temperaturze. Elementy konstrukcyjne turbin wytwarzane są najczęściej jako odlewy precyzyjne metodą wytapianych modeli z zastosowaniem wielowarstwowych form ceramicznych. Umożliwia to produkcję złożonych cienkościennych odlewów polikrystalicznych o małej chropowatości powierzchni. Wytwarzane są głównie odlewy łopatek oraz aparatów kierujących. Ciekły metal jest wprowadzany do formy ceramicznej nagrzanej do określonej temperatury i w kontakcie z tą formą stopniowo obniża swoją temperaturę – krystalizuje w wyniku ciągłego chłodzenia formy. Tworzą się ziarna równoosiowe oraz dendryty, a także wady odlewnicze w objętości odlewu lub na jego powierzchni. Łopatki i aparaty kierujące stosowane w silnikach lotniczych podlegają rygorystycznej ocenie mikro- i makrostruktury. Rozmiary oraz morfologię ziarn określa się na powierzchni odlewu natomiast porowatość gazową i skurczową w ich objętości. Prawidłowe rozmiary i kształt ziarn uzyskuje się głównie przez kontrolę przepływu ciepła oraz stosowanie modyfikatora, zwiększającego liczbę zarodków kryształów, w wewnętrznej warstwie wierzchniej formy ceramicznej. Porowatość skurczowa odlewów stanowi główny problem procesu odlewania łopatek turbiny. Rozmiary i obszary tworzenia porowatości skurczowej oraz morfologię porów podlegają kontroli najczęściej nieniszczącą metodą rentgenowską. Porowatość skurczowa powstaje przede wszystkim przez nieprawidłowe zasilanie ciekłym metalem przestrzeni międzydendrytycznych podczas krystalizacji stopu, gdy objętość względna fazy stałej jest mniejsza od krytycznej.

Kontrola przepływu ciepła w odlewie polikrystalicznym uniemożliwia lub znacznie ogranicza tendencje do tworzenia się węzłów cieplnych i tym samym porów oraz jam skurczowych. Zasilanie ciekłym metalem kolejnych objętości pomiędzy ramionami dendrytów odbywa się przez kierunkowy przepływ ciepła i kierunkową krystalizację odlewu. W procesie odlewania najczęściej prowadzi się kontrolę parametrów krystalizacji między innymi prędkości chłodzenia v i gradientu temperatury G w poszczególnych strefach objętości odlewu z użyciem różnych technik zapewnienia ciągłości zasilania.

Układ wlewowy może pełnić funkcję nadlewu. Stąd też na przykład w doborze układu wlewowego uwzględnia się konieczność stopniowego zmniejszenia prędkości chłodzenia w kierunku zamka łopatki. Krystalizację kierunkową odlewów łopatek zapewnia także zwiększenie prędkości chłodzenia wybranych ich obszarów przy jednoczesnym zachowaniu dużej wartości gradientu temperatury. W tym celu stosuje się ochładzalniki z SiC lub grafitu w objętości tworzenia się porów skurczowych, co jest znane z publikacji D. Szeliga, K. Kubiak, W. Ziaja, R. Cygan: *Influence of silicon carbide chills on solidification process and shrinkage porosity of castings made of nickel based superalloys. International Journal of Cast Metal Research*, 27 (2014) 3, s. 146–160.

Z polskiego opisu patentowego PL 216825 B1 znany jest sposób wytwarzania odlewów precyzyjnych, zwłaszcza w formach ceramicznych, ze stopów na osnowie Al., Mg, Cu, Zn i Fe, który polega na tym, że wygrzewa się formę ceramiczną w temperaturze z zakresu 800–1000°C w czasie 2–4 godzin, następnie formę chłodzi się do temperatury z przedziału 20–950°C i przetrzymuje się w tej temperaturze przez 10–40 minut, po czym zalewa się ciekłym stopem przegrzanym od 50°C do 200°C ponad punkt początkowy topienia i po 10–100 s, ze stałą lub zmienną prędkością wprowadza się do ciekłego medium chłodzącego, którym jest 1–99 procentowy obj. wodny roztwór ciekłego polimeru o temperaturze z przedziału od 15°C do 85°C. Korzystnie ciekłym polimerem jest polimer typu PAG lub PVP lub ACR lub PEO. Korzystne jest stosowanie form ceramicznych z materiałów ogniotrwałych glinokrzemianowych lub wysokoglinowych, a zwłaszcza form wykonanych na bazie piasku syntetycznego, na przykład Molochite.

Z publikacji S. Zhang, Z. Xu, Z. Wang: *Numerical modeling and simulation of water cooling-controlled solidification for aluminum alloy investment casting. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91 (2017) 1–4, 763–770 znane jest uzyskanie kierunkowej krystalizacji stopu aluminium poprzez stopniowe chłodzenie powierzchni formy ceramicznej czynnikiem chłodzącym. Zalaną formę umieszczano w wannie stopniowo wypełnianej wodą, a następnie powodowano przemieszczenie się frontu krystalizacji wzdłuż odlewu.

Z publikacji P. D. Ferro, S. B. Shendye: *A thermal analysis from thermally controlled solidification (TCS) trials on investment castings*. The Minerals, Metals and Materials Society, Superalloys, 1996, s. 531–535 znana jest metoda cieplnej kontroli procesu krystalizacji (ang. thermally-controlled solidification method) stosowana do wytwarzania polikrystalicznych odlewów z nadstopu niklu o dużych rozmiarach i złożonym kształcie. Podstawą tej metody jest rozwinięty proces kierunkowej krystalizacji i monokrystalizacji. Cechuje się ciągłą kontrolą wartości parametru G/R – to jest gradient temperatury/prędkość krystalizacji – wzdłuż odlewu podczas wyciągania zalanej formy z określoną prędkością od strefy grzewczej chłodzącej pieca. Prędkość chłodzenia odlewu zwiększono przez wprowadzenie dodatkowego chłodzenia powierzchni formy strumieniem gazu.

Z publikacji L. Zheng, G. Zhang, Ch. Xiao, T.L.Lee B. Han, Z. Li, D. Daisenberger: *The interdendritic-melt solidification control (IMSC) and its effects on the porosity and phase change of a Ni-based superalloy*. *Scripta Materialia*, 74 (2014) s. 84–87 oraz Z. Jie, J. Zhang, T. Huang, H. Su, Y. Li, L. Liu, W. Yang, H. Fu: *Enhanced grain refinement and porosity control of the polycrystalline superalloy by a modified thermally controlled solidification*. *Advanced Engineering Materials*, 18 (2016) s. 1785–1791 znana jest modyfikacja opisanej wyżej cieplnej metody kontroli procesu krystalizacji. Formę ceramiczną nagrzewa się do zakresu wartości temperatury pomiędzy likwidus i solidus stosowanego stopu i następnie wypełnia ciekłym metalem. Zalaną formę wygrzewa się w tej temperaturze w ustalonym czasie i następnie przemieszcza z określoną prędkością od strefy grzewczej do obszaru chłodzącego pieca. Stwierdzono, że połączenie kontroli przepływu ciepła i jednoczesna modyfikacja stopu oddziałuje korzystnie na rozdrobnienie ziarn i porów skurczowych oraz zwiększa właściwości mechaniczne odlewu.

Wciąż rozwijane są procesy wytwarzania odlewów precyzyjnych z nadstopów niklu metodą wytapianych modeli. Modyfikowane są przede wszystkim metody kontroli tworzenia się wad oraz kształtowania mikro i makrostruktury przy założeniu jak na najniższych kosztach ich produkcji.

Tylko część przedstawionych wyżej metod można wprowadzić do produkcji odlewów łopatek z nadstopów niklu. Wprowadzenie m.in. nadlewów zwiększa zużycie nadstopów i podwyższa koszt ich wytwarzania. Ciecze chłodzące cechują się natomiast zbyt niską temperaturą wrzenia dla chłodzenia form wypełnionych ciekłym nadstopem niklu, którego temperatura krystalizacji wynosi ok. 1350°C. Czas wygrzewania formy w piecu po jej zalaniu jest jednak znacznie dłuższy w porównaniu do procesu z użyciem izolacji cieplnej w postaci mat.

W standardowym procesie produkcji odlewów z nadstopów niklu stosuje się formy ceramiczne – takie jak pokazana na pos. III – wytwarzane metodą wytapianych modeli woskowych. W procesie wytwarzania form tą metodą, jedną lub kilka warstw izolacji w postaci mat, nakłada się w określonych strefach formy ceramicznej jak pokazano na pos. I, II oraz IV. Celem jest uzyskanie dokładnej kontroli prędkości chłodzenia i zapewnienie warunków kierunkowej krystalizacji ciekłego nadstopu w formie. Montaż izolacji na powierzchni formy jest jednak czasochłonny i złożony, a ponadto nie jest zapewniona powtarzalność warunków krystalizacji pomimo stosowania jednakowych parametrów odlewania takich jak temperatura nagrzewania formy i temperatura zalewania. Często jest to spowodowane nierównomiernym zagęszczeniem materiału izolacji cieplnej powstającym podczas nakładania warstw maty na powierzchnię formy. Stąd zmiany jej grubości i jednocześnie zmienne właściwości cieplne i fizyczne szczególnie w strefach zagęszczonego materiału izolacji. Maty często nakłada się warstwowo na formę o dużych rozmiarach. Stopniowo zmniejsza się także wysokość maty izolacyjnej, aby kontrolować odprowadzanie ciepła oraz uzyskania warunków do kierunkowej krystalizacji odlewów. Kolejne warstwy są wówczas łączone z użyciem kleju wysokotemperaturowego. Etap ten jest czasochłonny i wymaga stosowania warstwy kleju o zbliżonej grubości i powierzchni. Należy również uwzględnić negatywne oddziaływanie izolacji cieplnej na środowisko naturalne. Forma oddzielona od odlewu wraz z izolacją cieplną wymaga kosztownej utylizacji ponieważ nie może być ponownie zastosowana. Dodatkowo zastosowanie izolacji w postaci mat uniemożliwia dobór materiałów innych niż dedykowane do ich wykonania. Jest to spowodowane metodą wytwarzania mat oraz wysoką temperaturą ich pracy wynoszącą do 1300°C.

Sposób wytwarzania odlewów zwłaszcza z nadstopów niklu, według wynalazku charakteryzuje się tym, że na formę odlewniczą nakłada się izolację cieplną w postaci ceramicznego modułu, a następnie formę z nałożonym modułem wkłada się do odlewniczego pieca próżniowego, po czym wlewa się ciekły metal do wnętrza formy a po krystalizacji fragmentów objętości odlewu o najmniejszej grubości ścianek zapowietrza się komorę pieca, a następnie formę wraz z nałożonym na nią modułem wyjmuje się z komory pieca, po czym chłodzi się ją do momentu zakończenia krystalizacji, a następnie zdejmuje się moduł z formy i wyjmuje się z niej odlew.

Korzystnie przed nałożeniem modułu na formę, moduł jak lub formę nagrzewa się.

Dalsze korzyści uzyskuje się, jeżeli przed nałożeniem modułu na formę, zarówno moduł jak i formę nagrzewa się.

W wariantach realizacji moduł oraz formę nagrzewa się do tej samej temperatury.

W wariacie realizacji moduł nagrzewa się do niższej temperatury niż formę.

W wariacie realizacji moduł nagrzewa się do wyższej temperatury niż formę.

W wariacie realizacji przed nałożeniem modułu na formę odlewniczą, nagrzewa się tą formę do określonej temperatury, a moduł pozostawia się w temperaturze pokojowej.

Korzyści w postaci mniejszego zużycia energii uzyskuje się, jeżeli moduł po zdjęciu z formy odlewniczej nagrzewa się, a następnie ten moduł zakłada się na kolejną formę.

W wariacie wykonania moduł po zdjęciu z formy odlewniczej chłodzi się do temperatury pokojowej, a następnie ten moduł zakłada się na kolejną formę.

Dalsze korzyści uzyskuje się, jeżeli nagrzewanie modułu lub formy odlewniczej realizuje się w piecu komorowym.

Kolejne korzyści uzyskiwane są, jeśli temperaturę, do której nagrzewa się moduł lub formę wybiera się z przedziału od 400 do 1350°C.

Dzięki zastosowaniu sposobu według wynalazku, w którym wykorzystywana jest izolacja formy odlewniczej w postaci modułu, uzyskuje się oszczędności związane z możliwością wielokrotnego użycia tej samej izolacji przy wytwarzaniu kolejnych odlewów. Sposób zapewnia również lepszą powtarzalność uzyskiwanych odlewów oraz skrócenie samego czasu ich wytwarzania. Wielokrotne wykorzystanie tej samej izolacji oprócz pozytywnych efektów ekonomicznych, pozwala również na znaczne ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko związanego z koniecznością utylizacji izolacji wraz z formą po wykonaniu odlewu. W przypadku wykorzystania modułu bezpośrednio po przeprowadzonym procesie odlewania łopatek, do wykonania kolejnego odlewu możliwe jest ograniczenie wykorzystania energii związanej z koniecznością ponownego podgrzewania tego modułu.

Sposób według wynalazku w przykładzie realizacji pokazano na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia formę odlewniczą z nałożonym modułem w przekroju wzdłużnym, fig. 2 – ten sam moduł w przekroju wzdłuż linii B-B pokazanej na fig. 1, fig. 3 i 4 moduł nałożony na formę odlewniczą pokazany na fotografii odpowiednio w widoku z boku i z dołu.

Sposób wytwarzania odlewów zwłaszcza z nadstopów niklu, według wynalazku w przykładzie wykonania realizowany jest z wykorzystaniem izolacji w postaci modułu 1 nakładanego na formę 2 odlewniczą, który ma kształt walca z ukształtowaną od dołu wnęką 3. W górnej części modułu 1 jest otwór 4 przelotowy prowadzący do tej wnęki 3. Gdy moduł 1 jest nałożony na formę 2 to wlew 5 formy 2 wystaje przez otwór 4 przelotowy tego modułu 1.

Wnęką 3 modułu 1 ma kształt walca zbliżony wymiarami do zewnętrznego obrysu formy 2 odlewniczej, przy czym odległość pomiędzy wewnętrzną powierzchnią wnęki 3 a zewnętrznymi ścianami formy 2 wynosi nie więcej niż 30 mm. Grubość ścian modułu 1 jest zmienna wzdłuż jego osi i zmniejsza się ku dołowi. Zmienna grubość ścian modułu oraz odstęp ρ pomiędzy wewnętrzną powierzchnią wnęki 3 a zewnętrznymi ścianami formy mają na celu zapewnienie odpowiedniej prędkości chłodzenia oraz kierunkowej krystalizacji ciekłego nadstopu w formie 2.

Moduł 1 wykonany jest z materiału ceramicznego odpornego na zmiany temperatury do 1400°C, współczynnikiem przenikania ciepła do $\lambda = 2,5$ W/mK oraz gęstością do ok. $d = 3000$ kg/m³.

W pierwszym przykładzie realizacji sposób wytwarzania odlewów według wynalazku prowadzi się z wykorzystaniem wyżej opisanej izolacji cieplnej w postaci modułu 1. Przed włożeniem modułu 1 oraz formy do pieca są one nagrzewane do temperatury z przedziału od 900 do 1350°C. Formę 2 odlewniczą z nałożonym modułem 1 wkłada się do odlewniczego pieca próżniowego, po czym ciekły nadstop niklu wlewa się do wnęki tej formy 2. Następnie zapowietrza się komorę pieca. Po krystalizacji fragmentów objętości odlewu o najmniejszej grubości ścianek, formę 2 wraz z nałożonym na nią modułem 1 wyjmuje się z komory pieca. Formę 2 chłodzi się do momentu zakończenia krystalizacji, po czym zdejmuje się z niej moduł 1 oraz wyjmuje się z niej odlew. Po zdjęciu modułu z formy 2 nagrzewa się go i zakłada na kolejną formę 2, a następnie wykonuje się kolejny odlew w opisany wyżej sposób.

W drugim przykładzie realizacji przed włożeniem modułu 1 oraz formy 2 do próżniowego pieca odlewniczego, formę 2 nagrzewa się do temperatury z przedziału od 1000 do 1250°C a moduł 1 pozostawia w temperaturze pokojowej. W pozostałym zakresie sposób realizowany jest jak w przykładzie pierwszym z tą różnicą, że po zdjęciu modułu z formy 2 chłodzi się go do temperatury pokojowej przed nałożeniem na kolejną formę 2.

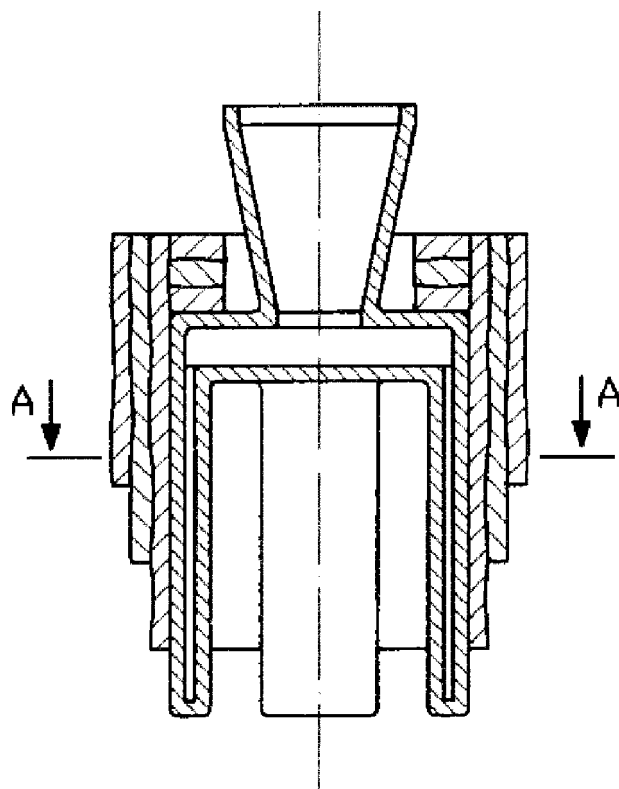
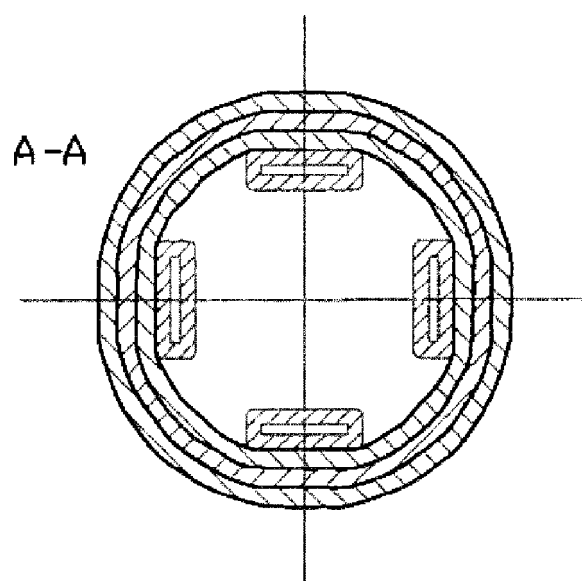
Zastrzeżenia patentowe

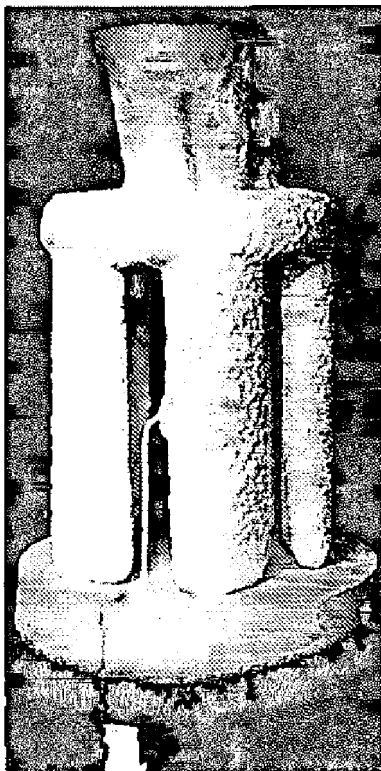
1. Sposób wytwarzania odlewów zwłaszcza z nadstopów niklu **znamienny tym**, że na formę (2) odlewniczą nakłada się izolację cieplną w postaci ceramicznego modułu (1), a następnie formę (2) z nałożonym modułem (1) wkłada się do odlewniczego pieca próżniowego, po czym wlewa się ciekły metal do wnęki formy (2) a po krystalizacji fragmentów objętości odlewu o najmniejszej grubości ścianek zapowietrza się komorę pieca, a następnie formę (2) wraz z nałożonym na nią modułem (1) wyjmuje się z komory pieca, po czym chłodzi się ją do momentu zakończenia krystalizacji, a następnie zdejmuje się moduł (1) z formy (2) i wyjmuje się z niej odlew.
2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że przed nałożeniem modułu (1) na formę (2), moduł (1) lub formę (2) nagrzewa się.
3. Sposób według zastrz. 2, **znamienny tym**, że moduł (1) oraz formę (2) nagrzewa się do tej samej temperatury.
4. Sposób według zastrz. 2, **znamienny tym**, że moduł (1) nagrzewa się do niższej temperatury niż formę (2).
5. Sposób według zastrz. 2, **znamienny tym**, że moduł (1) nagrzewa się do wyższej temperatury niż formę (2).
6. Sposób według zastrz. 2, **znamienny tym**, że przed nałożeniem modułu (1) na formę (2) odlewniczą, nagrzewa się tą formę (2) do określonej temperatury, a moduł (2) pozostawia się w temperaturze pokojowej.
7. Sposób według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że moduł (1) po zdjęciu z formy (2) odlewniczej nagrzewa się, a następnie ten moduł (1) zakłada się na kolejną formę (2).
8. Sposób według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że moduł (1) po zdjęciu z formy (2) odlewniczej chłodzi się do temperatury pokojowej, a następnie ten moduł (1) zakłada się na kolejną formę (2).
9. Sposób według zastrz. 2 albo 3 albo 4 albo 5 albo 6 albo 7 albo 8, **znamienny tym**, że nagrzewanie modułu (1) lub formy (2) odlewniczej realizuje się w piecu komorowym.
10. Sposób według zastrz. 2 albo 3 albo 4 albo 5 albo 6 albo 7 albo 8 albo 9, **znamienny tym**, że temperaturę, do której nagrzewa się moduł (1) lub formę (2) wybiera się z przedziału od 400 do 1350°C.

Wykaz oznaczeń

- 1 – moduł
- 2 – forma
- 3 – wnęka
- 4 – otwór
- 5 – wlew

Rysunki

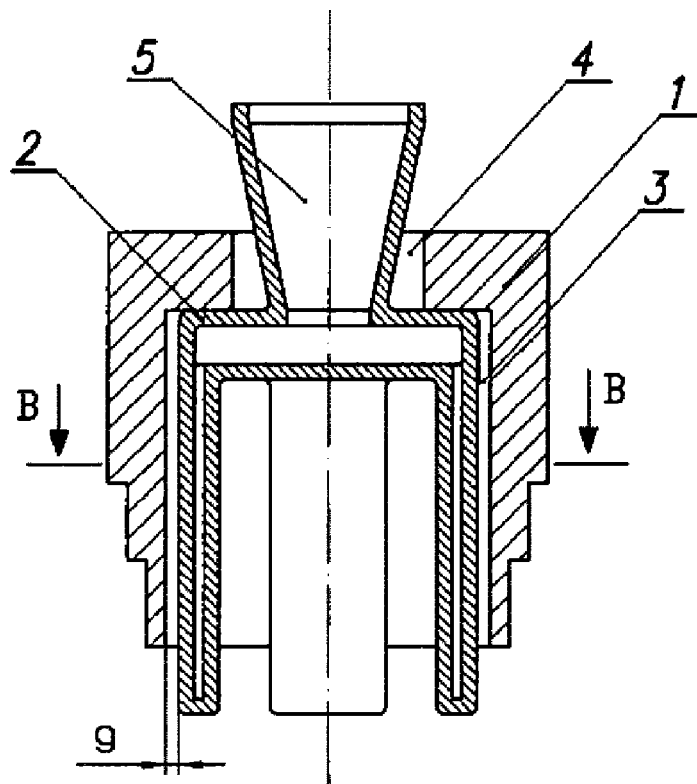
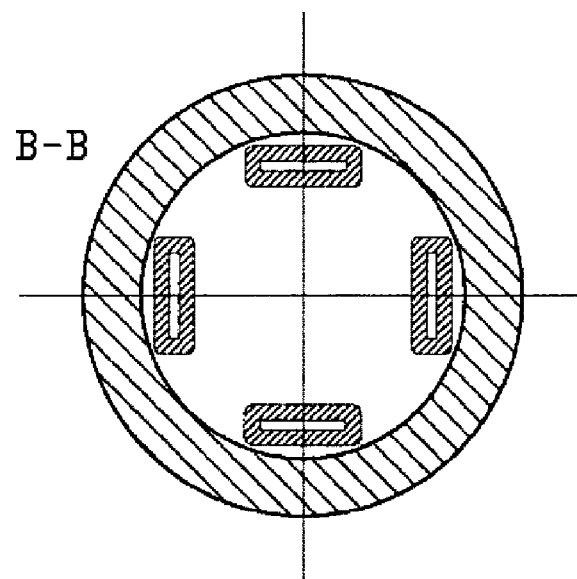
*Pos. I**Pos. II*



Pos. III



Pos. IV

*Fig. 1**Fig. 2*

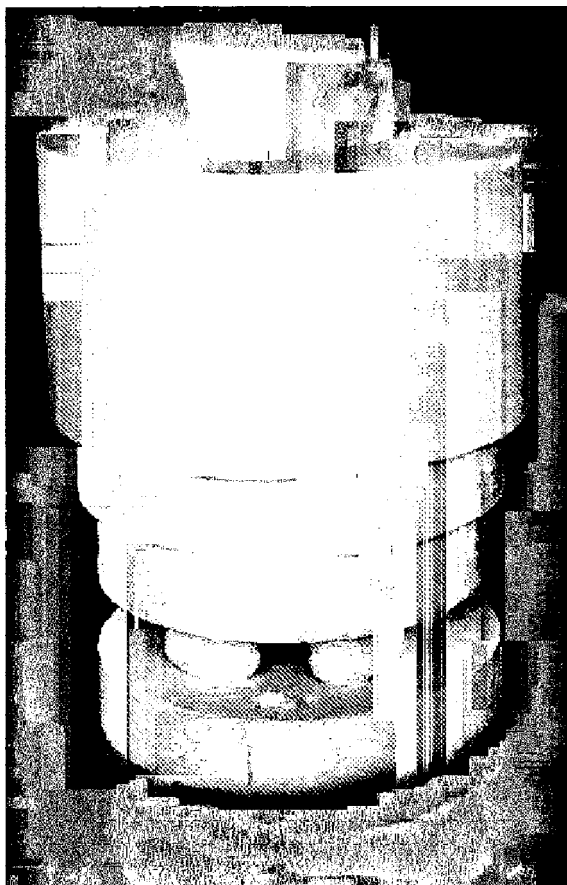


Fig. 3

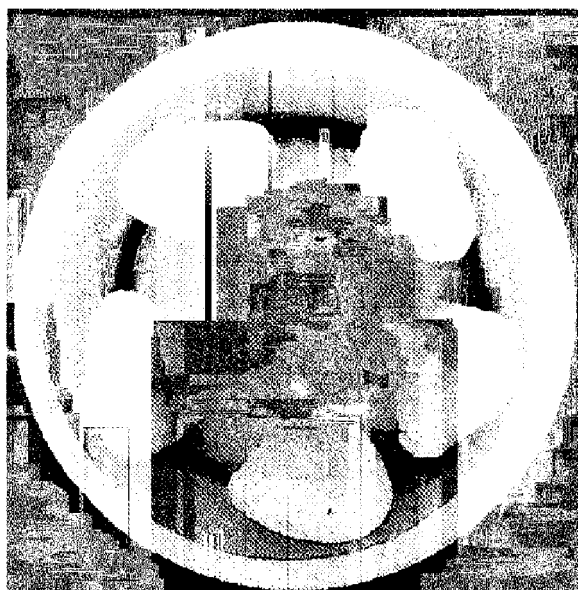


Fig. 4