

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL** (11) **236468**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **425567**

(51) Int. Cl.
B22D 27/04 (2006.01)
B22C 9/00 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **16.05.2018**

(54) **Izolacja formy odlewniczej zwłaszcza do wytwarzania odlewów 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
KRZYSZTOF KUBIAK, Rzeszów, PL
JAN SIENIAWSKI, Rzeszów, PL

(74) Pełnomocnik:
recz. pat. Henryk Pisiński

PL 236468 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest izolacja formy odlewniczej zwłaszcza do wytwarzania odlewów podzespołów części gorącej silników lotniczych i przemysłowych turbin gazowych.

Nadstopy niklu stosowane są w konstrukcji podzespołów części gorącej silników lotniczych i przemysłowych turbin gazowych. Charakteryzują się dużą odpornością na pełzanie 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 nieniszczącej 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. Ziąja, 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.

Izolacja cieplna formy odlewniczej, zwłaszcza do wytwarzania odlewów z nadstopów niklu, według wynalazku charakteryzuje się tym, że jest w postaci, zakładanego na formę odlewniczą, modułu wykonanego z materiału ceramicznego, przy czym moduł ten posiada otwór przelotowy oraz wnękę do przyjmowania formy odlewniczej.

Korzystnie odległość pomiędzy wewnętrzną powierzchnią modułu izolacji a zewnętrzną powierzchnią formy wynosi do 30 mm, a grubość ścian modułu izolacji jest zmienna wzdłuż jego wysokości.

Dalsze korzyści uzyskuje się, jeśli ściana modułu izolacji jest grubsza u góry niż u dołu.

W wariantach wykonania ściana modułu izolacji ma stałą grubość.

Kolejne korzyści uzyskuje się, jeżeli moduł izolacji jest podzielony na segmenty, które są ze sobą połączone rozłącznie.

Dalsze korzyści uzyskuje się, jeżeli materiał ceramiczny, z którego jest wykonany moduł izolacji ma odporność na zmiany temperatury w zakresie od 100°C do 1400°C, współczynnik przewodzenia ciepła od 0,01 W/mK do 2,5 W/mK oraz gęstość od 100 kg/m³ do 3000 kg/m³.

Dzięki zastosowaniu izolacji formy odlewniczej w postaci modułu możliwe jest uzyskanie oszczędności związanych z możliwością wielokrotnego użycia tej samej izolacji przy wykonywaniu odlewów. Moduł według wynalazku zapewnia również lepszą powtarzalność procesu oraz możliwość skrócenia samego czasu wykonywania odlewów. Wielokrotne wykorzystanie tej samej izolacji oprócz pozytywnych efektów ekonomicznych, pozwala również na znaczne ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko związanego z koniecznością utylizacji izolacji oraz form po wykonaniu odlewu z wykorzystaniem znanej izolacji w postaci mat. 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.

Wynalazek w przykładzie wykonania pokazano na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia moduł nałożony na formę odlewniczą w przekroju wzdłużnym, fig. 2

– ten sam moduł w przekroju wzdłuż linii B-B pokazanej na fig. 1, fig. 3 – ten sam moduł w przekroju wzdłużnym, fig. 4 – moduł w drugim wariantcie wykonania, fig. 5 – moduł w trzecim wariantcie wykonania, fig. 6 i 7 – moduł nałożony na formę odlewniczą pokazany na fotografii odpowiednio w widoku z boku i z dołu.

Izolacja formy odlewniczej zwłaszcza do wykonywania odlewów z nadstopów niklu w pierwszym przykładzie wykonania jest w postaci modułu 1 nakładanego na formę 2 odlewniczą. Moduł 1 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.

Wnęka 3 modułu 1 ma kształt walca zbliżony wymiarami do zewnętrznego obrysu formy 2 odlewniczej izolację, której stanowi moduł 1, 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 stopniowo na określonych wysokościach. 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 ciepłego 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. $d = 2000$ kg/m³.

Izolacja formy odlewniczej według wynalazku ma zastosowanie zwłaszcza do wykonywania odlewów płyt i łopatek silnika lotniczego.

Izolacja formy odlewniczej według wynalazku w drugim przykładzie wykonania pokazanym na fig. 4 grubość ściany modułu zmienia się w sposób ciągły wzdłuż jego osi. W pozostałym zakresie wykonanie izolacji jest jak w przykładzie pierwszym.

Izolacja formy odlewniczej według wynalazku w trzecim przykładzie wykonania pokazanym na fig. 5, mającym zastosowanie w wytwarzaniu łopatek silnika lotniczego o małej wysokości, ściana modułu ma stałą grubość. W pozostałym zakresie wykonanie jest jak w przykładzie pierwszym.

Zastrzeżenia patentowe

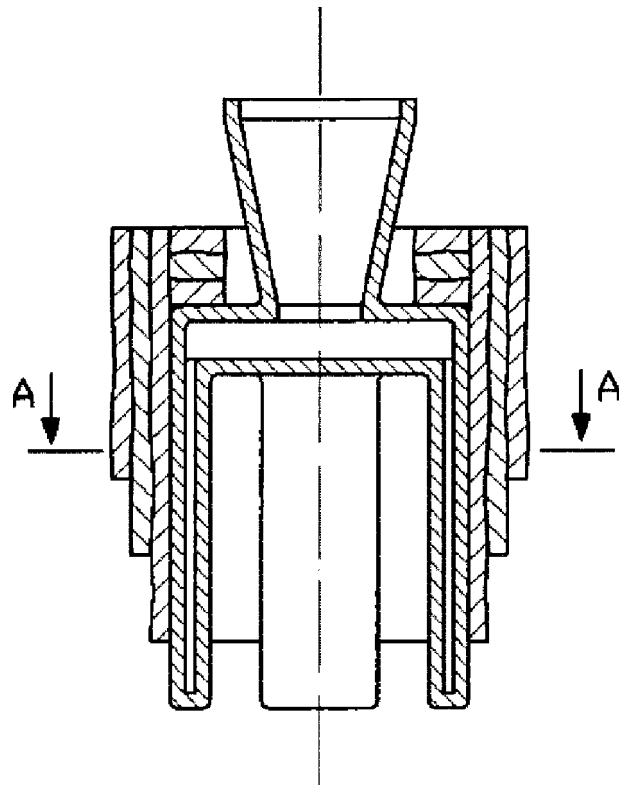
1. Izolacja cieplna formy odlewniczej, zwłaszcza do wytwarzania odlewów z nadstopów niklu **znamienna tym**, że jest w postaci, zakładanego na formę (2) odlewniczą, modułu (1) wykonanego z materiału ceramicznego, przy czym moduł ten posiada otwór (4) przelotowy oraz wnękę (3) do nakładania na formę (2) odlewniczą.
2. Izolacja według zastrz. 1, **znamienna tym**, że odległość pomiędzy wewnętrzną powierzchnią modułu (1) izolacji a zewnętrzną powierzchnią formy wynosi do 30 mm.
3. Izolacja według zastrz. 1 albo 2, **znamienna tym**, że grubość ścian modułu (1) izolacji jest zmienna wzdłuż jego wysokości.
4. Izolacja według zastrz. 3, **znamienna tym**, że ściana modułu (1) izolacji jest grubsza u góry niż u dołu.

5. Izolacja, według zastrz. 1 albo 2, **znamienna tym**, że ściana modułu (l) izolacji ma stałą grubość.
6. Izolacja według zastrz. 1 albo 2 albo 3 albo 4 albo 5, **znamienna tym**, że jej moduł (1) jest podzielony na segmenty, które są ze sobą połączone rozłącznie.
7. Izolacja według zastrz. 1 albo 2 albo 3 albo 4 albo 5 albo 6, **znamienna tym**, że materiał ceramiczny, z którego jest wykonany moduł (1) izolacji ma odporność na zmiany temperatury w zakresie od 100C do 1400°C, współczynnik przewodzenia ciepła od 0,01 W/mK do 2,5 W/mK oraz gęstość od 100 kg/m³ do 3000 kg/m³.

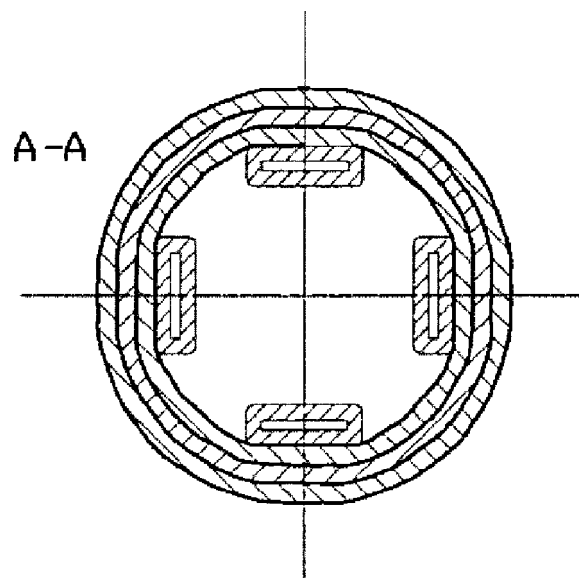
Wykaz oznaczeń

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

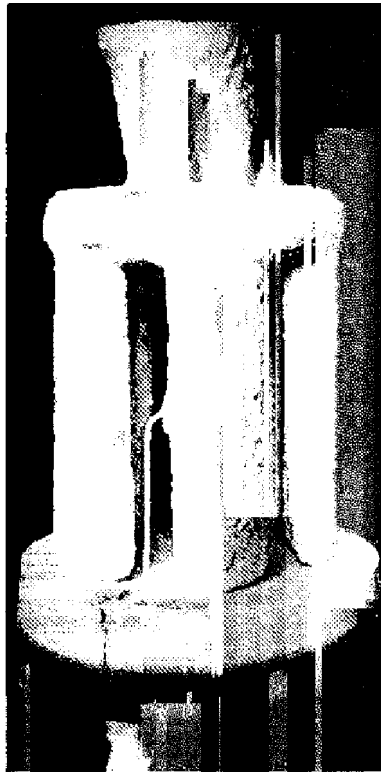
Rysunki



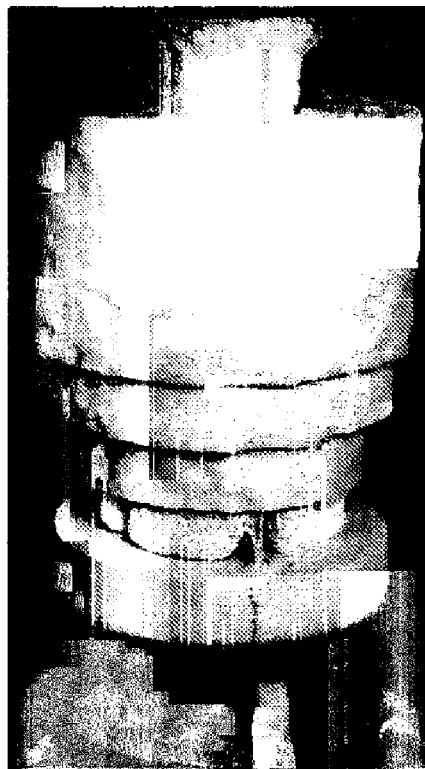
Pos. I



Pos. II



Pos. III



Pos. IV

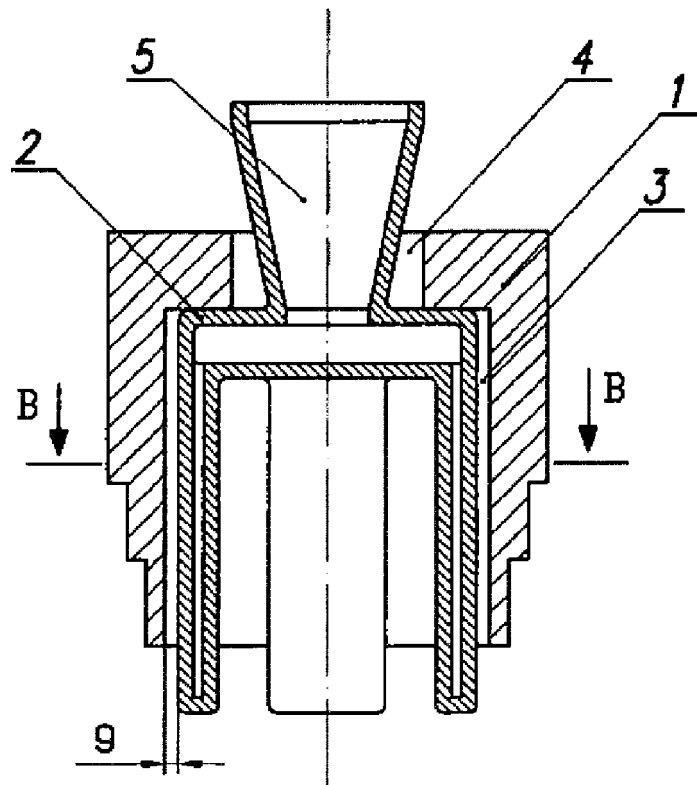


Fig. 1

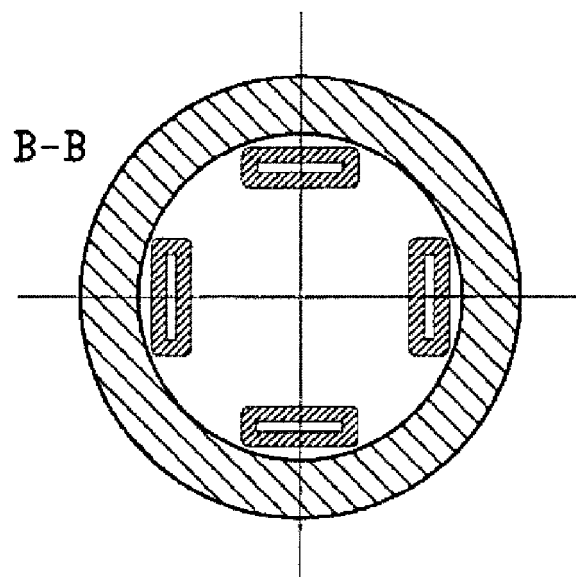


Fig. 2

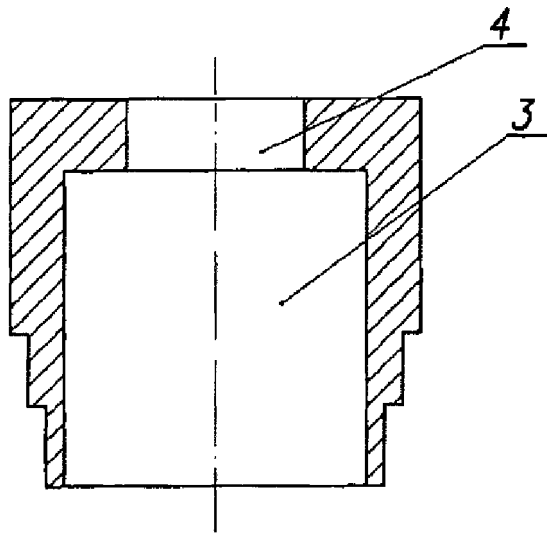


Fig. 3

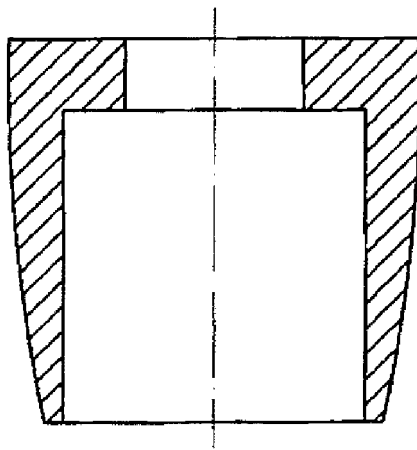


Fig. 4

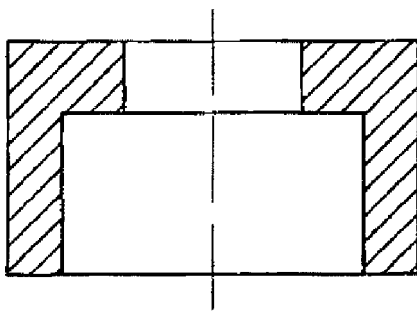


Fig. 5

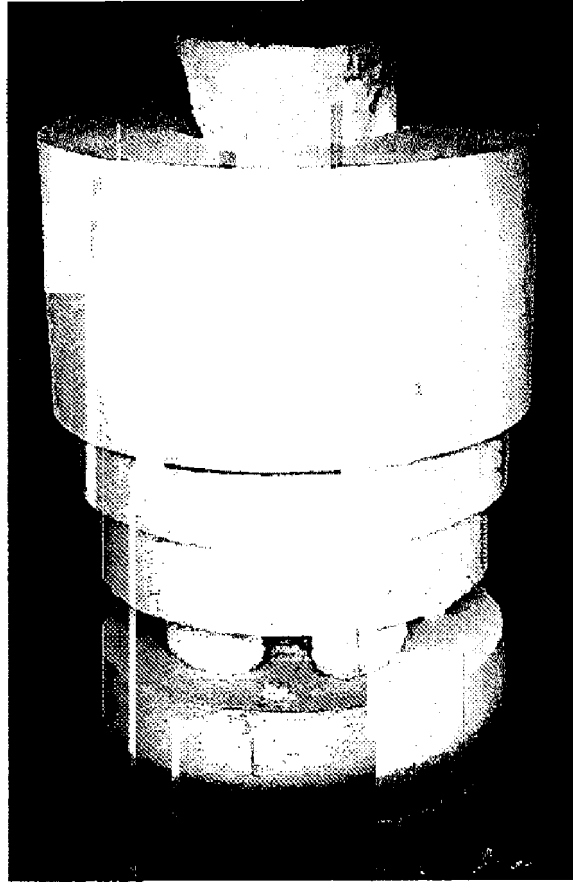


Fig. 6

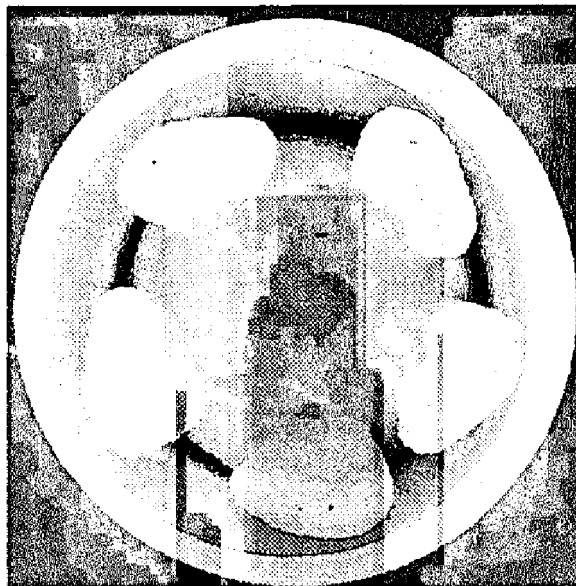


Fig. 7