



República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0609128-8 B1

(22) Data do Depósito: 17/03/2006

(45) Data de Concessão: 09/01/2018



(54) Título: PRIMEIRO COMPONENTE DE PAREDE PARA REATOR DE FUSÃO

(51) Int.Cl.: G21B 1/13

(30) Prioridade Unionista: 22/03/2005 AT GM 179/2005

(73) Titular(es): THE EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY

(72) Inventor(es): THOMAS FRIEDRICH; ARNO PLANKENSTEINER; BERTRAM SCHEDLER;
KARLHEINZ SCHEIBER; HANS-DIETER FRIEDLE; THOMAS HUBER; DIETMAR SCHEDLE; ANTON
ZABERNIG

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**PRIMEIRO COMPONENTE DE PAREDE PARA REATOR DE FUSÃO**".

A presente invenção refere-se a um primeiro componente de parede de um reator de fusão que abrange no mínimo um escudo de calor com uma passagem fechada ou aberta de um material grafítico e um tubo de refrigeração, percorrido por agente de refrigeração, conectado por junção de material ao menos parcialmente com o escudo de calor e de um material com uma condutibilidade térmica $> 200 \text{ W/m K}$.

Um exemplo típico para o emprego desses primeiros componentes de parede são um Divertor e um Limiter que ficam expostos a cargas térmicas máximas acima de 10 mW/m^2 . Usualmente, os primeiros componentes de parede são constituídos por um escudo de calor e por uma região que descarrega calor. O material da placa de calor tem que ser compatível com o plasma, apresentar uma alta resistência em relação a pulverizações físicas e químicas, possuir um alto ponto de fusão/sublimação e ser o mais resistente possível em relação a choques térmicos. Além disso, eles têm que apresentar uma alta condutibilidade térmica, baixa capacidade de ativação de nêutrons e suficiente solidez/tenacidade de ruptura, juntamente com boa disponibilidade e custos aceitáveis. Além de metais refratários, como tungstênio por exemplo, os materiais grafíticos (grafite reforçado com fibras, por exemplo) são os melhores a preencher esse perfil de exigência variado e, em parte, em sentidos opostos. Devido ao fato de que as correntes de energia provenientes do plasma atuam sobre esses componentes por um intervalo de tempo mais longo, então esses primeiros componentes de parede são refrigerados ativamente de modo típico. O descarregamento de calor é apoiado por meio de dissipadores de calor, por exemplo de cobre ou de ligas de cobre, que usualmente ficam conectados com o escudo de calor por meio de ajuste de formas.

Primeiros componentes de parede podem ser projetados com designs diferentes. Um design usual é o assim chamado design de monobloco. No caso do design de monobloco, o primeiro componente de parede é constituído por um escudo de calor com perfuração concêntrica. Através

dessa perfuração concêntrica, o escudo de calor fica conectado com o tubo de refrigeração.

Os primeiros componentes de parede têm que suportar não apenas tensões induzidas termicamente, como também tensões mecânicas que ocorram adicionalmente. Tais cargas mecânicas adicionais podem ser geradas através de correntes induzidas eletromagneticamente, as quais fluem nos componentes e entram em ação recíproca com o campo magnético do ambiente. Nesse caso, podem ocorrer forças de aceleração de alta frequência, que têm que ser transmitidas pelo escudo de calor, por exemplo de material grafitico. No entanto, materiais grafiticos apresentam uma solidez mecânica e uma tenacidade de ruptura reduzidas. Adicionalmente, durante o emprego ocorre fragilização por nêutrons, fazendo com que ocorra um outro aumento da sensibilidade desses materiais em relação a formação de fissuras. Como material grafitico emprega-se usualmente grafite reforçado com fibras (CFC). Nesse caso, o reforço com fibras é disposto de modo tridimensional e linear. A arquitetura das fibras proporciona ao material diferentes propriedades dependendo da direção espacial. Usualmente, CFC é reforçado por fibras Ex-Pitch em uma direção espacial, as quais apresentam uma solidez máxima e também uma máxima condutibilidade térmica. As duas outras direções espaciais são reforçadas por fibras Ex-PAN, sendo que uma direção é apenas costurada de modo típico.

Portanto, enquanto o CFC apresenta uma arquitetura linear de material, a geometria de conexão escudo de calor / tubo de refrigeração é circular. Devido aos diferentes coeficientes de dilatação térmica dos materiais empregados, durante o processo de produção ocorre uma formação de tensão que pode levar a fissuras no CFC. Essas fissuras só podem ser detectadas, quando o podem, por meio de métodos muito dispendiosos devido às condições geométricas e à combinação de materiais empregada. Frente a um plano de fundo de um ambiente nuclear, isso leva a problemas correspondentes para esses componentes, principalmente porque fissuras / solturas são consideradas como possíveis agentes causadores de uma pane maior. Apesar de uma atividade dispendiosa de desenvolvimento durante

anos na área dos primeiros componentes de parede, até hoje os componentes existentes não preenchem o perfil de exigências de modo perfeito.

Por isso, a invenção tem como objetivo disponibilizar um primeiro componente de parede que seja adequado às exigências resultantes das solicitações mecânicas.

Esse objetivo é alcançado de acordo com as características apresentadas na reivindicação 1. O primeiro componente de parede inclui no mínimo um escudo de calor, de um material gráfico, com uma área A inclinada para o plasma e uma área B oposta. O escudo de calor apresenta uma ou mais fendas que desembocam na área A ou B e que, observando-se na direção do eixo do tubo de refrigeração, correm pelo comprimento do escudo de calor. Também é vantajoso o fato de que a largura máxima de fenda na região da base de fenda não ultrapasse $D/2$, sendo que D é o diâmetro externo do tubo de refrigeração. Testes, expostos detalhadamente nos exemplos, revelaram que os componentes de acordo com a invenção correspondem adequadamente às solicitações mecânicas resultantes tanto da produção, como também de um ciclo térmico. A fenda corre, vantajosamente, aproximadamente perpendicular à área A, respectivamente B. A profundidade de fenda por sua vez também é vantajosamente maior do que a metade da distância entre A, respectivamente B, e a superfície imediatamente seguinte do tubo de refrigeração. Uma faixa particularmente propícia para a profundidade de fenda x comporta $u/2 \leq x \leq 9u/10$, sendo que u é a distância medida em direção vertical entre a área A, respectivamente B, e a superfície imediatamente seguinte do tubo de refrigeração. No entanto, a fenda também pode chegar até o tubo de refrigeração ou até uma camada dúctil que envolve o escudo de calor. Neste caso, o escudo de calor não apresenta uma passagem fechada, mas sim uma passagem aberta. Já que usualmente os tubos de refrigeração são empregados com seção transversal circular, então também a passagem apresenta uma seção transversal circular.

A largura mínima de fenda de $10 \mu\text{m}$ é obtida a partir do processo de corte disponível para materiais gráficos, tais como o processo de cortar diamantes ou de cortar arames. A largura máxima de fenda preferível

comporta $D/3$. Para se evitar picos de tensão na base da fenda, é vantajoso que esta apresente um raio que se situe na faixa de $0,5 \times$ largura de fenda. Além disso, é vantajoso que a fenda desemboque na área B, pois durante o uso ocorre uma leve erosão na região da fenda, na área voltada para o plasma. Uma outra forma de execução vantajosa é a variante com uma fenda, sendo que a fenda encontra-se dirigida para o ponto central do tubo de refrigeração. Também o emprego de duas ou três fendas, tal como também é mostrado detalhadamente nos exemplos, reduz em grande medida as tensões que ocorrem durante a produção e durante o ciclo térmico. A combinação de CFC para o escudo de calor com as fendas de acordo com a invenção leva especialmente, então, a um efeito combinatório particularmente propício, quando as fibras Ex-Pitch ficam orientadas aproximadamente perpendicularmente em relação à área A; as fibras Ex-PAN paralelamente ao eixo do tubo de refrigeração e as fibras Ex-PAN costuradas ficam orientadas radialmente em relação ao eixo do tubo de refrigeração. Por razões de economia e devido à alta condutibilidade térmica deve-se dar preferência ao emprego de ligas de cobre para os tubos de refrigeração. As tensões nos componentes também podem ser reduzidas por meio da inserção de uma camada bastante maleável (dureza < 200 HV) entre o tubo de refrigeração e o escudo de calor.

A seguir, a invenção será apresentada e explicada com exemplos, por meio das figuras de 1 a 7.

figura 1: mostra em uma imagem inclinada, um componente de acordo com a invenção com uma fenda;

figura 2: mostra a projeção do componente da figura 1;

figura 3: mostra o corte transversal do componente da figura 1 e, também, a direção de fibras CFC;

figura 4: mostra em imagem inclinada um componente de acordo com a invenção com duas fendas;

figura 5: mostra a projeção do componente da figura 4;

figura 6: mostra o corte transversal do componente da figura 4;

figura 7: mostra a projeção de um componente com fenda em

forma de V.

Exemplo 1

Um primeiro componente de parede 1 segundo as figuras de 1 a 3 foi produzido da seguinte maneira:

5 Escudo de calor 2, sob a forma de monoblocos com uma perfuração 4, foram trabalhados a partir de blocos de grafite (CFC) reforçados com fibras, sendo que as fibras Ex-Pitch de alta resistência localizam-se na direção da maior condutibilidade térmica possível, as fibras Ex-PAN localizam-se paralelamente ao eixo do tubo de refrigeração e as fibras Ex-PAN costuradas localizam-se no eixo do tubo de refrigeração. As dimensões de cada um dos monoblocos eram de 40 mm (Ex-Pitch), 30 mm (Ex-PAN) e 20 mm (Ex-PAN Needled). O diâmetro da perfuração 4 era 14 mm e se situava no centro de simetria 9 do escudo de calor 2. Antes de continuar o processamento, foi estruturada a parede da perfuração 4 por meio de LASER, e
10 desse modo foi incorporada uma série de furos cônicos ao CFC. Tipicamente, esses furos possuem uma profundidade de cerca de 0,5 mm e uma abertura na superfície de 0,2 - 0,3 mm. A distância foi escolhida de tal modo que a superfície da parede de perfuração foi maximizada. No lado 6 voltado em direção oposta ao plasma, foi incorporada uma fenda 7 com uma largura de
15 fenda de 0,3 mm no escudo de calor 2 por meio de corte de arame. Essa fenda 7 ficou situada no eixo de simetria do escudo de calor 2 e corria desde a superfície 6 voltada na direção oposta ao plasma até a perfuração 4 localizada centralizadamente. Em seguida, a perfuração 4 foi produzida por meio de um processo de fundição mediante a presença de um formador de carbureto, como o titânio, por exemplo, com cobre livre de oxigênio. O processo
20 foi conduzido de tal modo que durante esse processo de fundição, a fenda 7 com 0,3 mm de largura anteriormente incorporada no escudo de calor 2 não foi borrifada por cobre. Depois do processo de fundição, os flancos da fenda 7 apresentam uma distância menor em comparação com o estado do processamento. Esse circunstância mostrou que as tensões surgidas foram convertidas em deformação. Isso levou a uma redução de tensão, sem que a
25 funcionalidade e as propriedades propícias do componente 1 tenham sido
30

perdas devido a esse procedimento. Uma avaliação visual e metalográfica da interface CFC/Cu no estado pós-fundição não resultou em indicações quanto a eventuais deslaminações no composto CFC/cobre.

5 A perfuração 4 enchida com cobre assim obtida foi submetida, em seguida, a um processamento mecânico, de tal modo que no CFC restou uma perfuração com diâmetro de 12,5 mm e, por conseguinte, com uma camada de cobre com cerca de 0,5 – 1,0 mm de espessura.

Três escudos de calor 2, obtidos desse modo, com fenda 7 foram enfiados em um tubo de refrigeração 3 de uma liga de CuCrZr com um diâmetro de 12 mm e foram colocados em uma jarra metálica. Depois da soldagem da jarra, essa foi evacuada e, depois, o bocal de esvaziamento por sucção foi selado de modo vedado a vácuo. Os componentes assim encerrados na jarra foram então submetidos a um processo HIP a 550°C e 100 MPa. Durante esse processo ocorreu uma ligação por meio de junção de materiais entre o tubo 3 de CuCrZr e a camada de cobre na perfuração 4 do monobloco 2 de CFC. Paralelamente também ocorreu um endurecimento do material de CuCrZr, possibilitando assim a obtenção de propriedades mecânicas excelentes no tubo de refrigeração 3. Depois do processo de composição, a jarra foi removida do primeiro componente de parede 1 assim obtido.

15 20 Uma avaliação visual não resultou em nenhuma indicação quanto a eventuais erros, como, por exemplo, deslaminações. Um teste de ultra-som executado adicionalmente por uma sonda de tubo interno mostrou uma interface perfeita.

Ao final, esse primeiro componente de parede 1 foi submetido ao plasma de uma instalação VPS. O componente 1 foi conectado ao sistema de água de refrigeração existente na instalação e foi retido pelo braço de garra do robô instalado na instalação. Por meio da velocidade de fluxo, aumento de temperatura do agente de refrigeração e da superfície atingida pelo plasma, foi detectado um fluxo de calor na faixa de 10 – 15 MW/m². No total, o componente 1 foi submetido a um ciclo aproximadamente 100 x por meio de movimento através do plasma. Durante o movimento o componente 1 foi retido respectivamente no plasma até que a temperatura da água de

25 30

refrigeração não se aquecesse mais. Depois desse teste, o componente 1 foi testado de modo destrutivo. Comprovou-se que em nenhum dos escudos de calor 2 examinados foi comprovada uma fissura, circunstância esta que ainda não pôde ser obtida em componentes que não são de acordo com a invenção.

Exemplo 2

Um outro componente 1 foi produzido como no exemplo 1. No teste que se seguiu, a superfície com fendas foi exposta ao plasma. O teste trouxe resultados similares aos do exemplo 1, com a diferença de que na região da fenda 7 ocorreu uma leve erosão.

Exemplo 3

Um primeiro componente de parede 1 segundo as figuras de 1 a 3 foi produzido do modo que se segue:

Escudos de calor 2, sob a forma de monoblocos com uma perfuração 4 foram trabalhados a partir de blocos de grafite (CFC) reforçados com fibras, sendo que nesse caso também as fibras Ex-Pitch altamente resistentes situavam-se na direção da condutibilidade térmica máxima, as fibras Ex-PAN situavam-se paralelamente ao eixo do tubo de refrigeração e as fibras Ex-PAN costuradas situavam-se no eixo do tubo de refrigeração. As dimensões de cada um dos monoblocos correspondia àquelas do exemplo 1. Também a incorporação da perfuração e da estruturação a laser foi efetuada do modo descrito no exemplo 1. No lado 6, voltado em direção oposta ao plasma, foi produzida uma fenda 7 com uma largura de fenda de 0,3 mm no escudo de calor 2 por meio de corte de arame. Essa fenda 7 situava-se sobre o eixo de simetria do escudo de calor 2 e atravessa a perfuração 4. Em seguida, de modo análogo ao exemplo 1, a perfuração 4 foi revestida com cobre livre de oxigênio, foi submetida a um processamento mecânico, foi ligada com um tubo de refrigeração 3 de uma liga de CuCrZr por meio de soldagem, sendo que a temperatura de soldagem situou-se na faixa da temperatura de incandescência de dissolução (970°C) da CuCrZr. O resfriamento da temperatura de soldagem para baixo de 400°C ocorreu com uma taxa de resfriamento > 1 K/seg, fazendo com que ao ocorrer um enrijecimento

subseqüente a 475°C/3h, puderam ser ajustados valores ótimos de solidez. Também os compostos assim produzidos não apresentaram nenhuma fissura depois do ciclo térmico conforme o exemplo 1.

Exemplo 3a

5 Um primeiro componente de parede 1 segundo as figuras de 4 a 6 foi produzido do modo que se segue:

Escudos de calor 2 sob a forma de monoblocos com uma perfuração 4 foram trabalhados a partir de blocos de grafite (CFC) reforçados com fibras, sendo que também nesse caso as fibras Ex-Pitch de alta resistência
 10 situavam-se na direção da condutibilidade térmica máxima, as fibras Ex-PAN situavam-se paralelamente ao eixo do tubo de refrigeração e as fibras Ex-PAN costuradas situavam-se no eixo de tubo de refrigeração. As dimensões de cada um dos monoblocos correspondiam àquelas do exemplo 1. Também a incorporação da perfuração e a estruturação a laser foram efetuadas do
 15 modo descrito no exemplo 1. No lado 6, voltado na direção oposta ao plasma, foram incorporadas duas fendas 7 com uma largura de fenda de 0,3 mm no escudo de calor 2 por meio de corte de arame. Essas fendas 7 situavam-se simetricamente ao eixo de simetria do escudo de calor 2. As fendas 7 apresentavam respectivamente uma profundidade x de 0,8 u, sendo que u é a
 20 menor distância entre a superfície de escudo de calor 5 e o tubo de refrigeração 3. Em seguida, a perfuração 4 foi revestida com cobre livre de oxigênio, de modo análogo ao exemplo 1, foi submetida a um processamento mecânico e foi ligada por junção de materiais com um tubo de refrigeração 3 de uma liga de CuCrZr por meio de soldagem conforme à seqüência no exemplo 3. Também os compostos assim produzidos não apresentaram nenhuma
 25 fissura depois do ciclo térmico conforme o exemplo 1.

Exemplo 4

Um primeiro componente de parede 1 segundo a figura 7 foi produzido do modo que se segue:

30 Monoblocos foram produzidos conforme o exemplo 1. No lado 6, voltado na direção oposta ao plasma, foi incorporada uma fenda 7 em forma de V, como mostrado na figura 7, por meio de corte de arame. As demais

etapas de produção ocorreram conforme descrito no exemplo 1. Também os compostos assim produzidos não apresentaram nenhuma fissura depois do ciclo térmico conforme o exemplo 1.

REIVINDICAÇÕES

1. Primeiro componente de parede (1) de um reator de fusão, que inclui pelo menos um escudo de calor (2) de um material grafítico e um tubo de refrigeração (3) percorrido por agente de refrigeração, ligado ao me-
5 nos parcialmente por junção de materiais com o escudo de calor (2) e com um diâmetro externo D, constituído de um material com uma condutibilidade térmica $> 200 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, sendo que o escudo de calor (2) apresenta uma passagem fechada ou aberta (4), uma área A (5) inclinada para o plasma, uma área B (6) oposta a ela, um comprimento l e uma largura b, caracterizado
10 pelo fato de que o escudo de calor (2) é um monobloco e apresenta pelo menos uma fenda (7) que corre essencialmente pelo comprimento l, fenda esta que desemboca na área (A) 5 ou B (6).

2. Primeiro componente de parede (1) de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a largura máxima de fenda y na base de fenda comporta $D/2$.
15

3. Primeiro componente de parede (1) de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que a fenda (7), que desemboca em A (5) ou em B (6), corre essencialmente perpendicularmente à respectiva área A (5) ou B (6).

20 4. Primeiro componente de parede (1) de acordo com uma das reivindicações de 1 a 3, caracterizado pelo fato de que a fenda (7) apresenta uma profundidade x, com $u/2 \leq x \leq u$, sendo que u é a menor distância entre a superfície de escudo de calor (5, 6) e o tubo de refrigeração (3).

25 5. Primeiro componente de parede (1) de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que a fenda (7) chega até o tubo de refrigeração (3).

6. Primeiro componente de parede (1) de acordo com uma das reivindicações de 1 a 5, caracterizado pelo fato de que a largura de fenda y na base de fenda é $10 \mu\text{m} < y < D/3$.

30 7. Primeiro componente de parede (1) de acordo com uma das reivindicações de 1 a 6, caracterizado pelo fato de que a base de fenda apresenta um raio.

8. Primeiro componente de parede (1) de acordo com uma das reivindicações de 1 a 7, caracterizado pelo fato de que a fenda (7) desemboca na área B (6).

5 9. Primeiro componente de parede (1) de acordo com uma das reivindicações de 1 a 8, caracterizado pelo fato de que o escudo de calor (2) apresenta uma fenda (7), sendo que esta está orientada na direção do ponto central (9) do tubo de refrigeração (3).

10 10. Primeiro componente de parede (1) de acordo com uma das reivindicações de 1 a 8, caracterizado pelo fato de que o escudo de calor (2) apresenta duas fendas (7), sendo que estas estão dispostas simetricamente ao plano de simetria.

11. Primeiro componente de parede (1) de acordo com uma das reivindicações de 1 a 8, caracterizado pelo fato de que o escudo de calor (2) apresenta três ou mais fendas (7).

15 12. Primeiro componente de parede (1) de acordo com uma das reivindicações de 1 a 11, caracterizado pelo fato de que o escudo de calor (2) é de grafite reforçado com fibras.

20 13. Primeiro componente de parede (1) de acordo com a reivindicação 12, caracterizado pelo fato de que as fibras com a máxima resistência e a fenda (7) apresentam uma orientação divergente em no máximo 20°.

25 14. Primeiro componente de parede (1) de acordo com a reivindicação 12 ou 13, caracterizado pelo fato de que as fibras Ex-Pitch estão orientadas aproximadamente perpendicularmente à área A, as fibras Ex-PAN estão orientadas paralelamente ao eixo do tubo de refrigeração e as fibras Ex-PAN costuradas estão orientadas radialmente ao eixo de tubo de refrigeração.

15. Primeiro componente de parede (1) de acordo com uma das reivindicações de 1 a 14, caracterizado pelo fato de que o tubo de refrigeração (3) é produzido a partir de uma liga de cobre.

30 16. Primeiro componente de parede (1) de acordo com uma das reivindicações de 1 a 15, caracterizado pelo fato de que entre o tubo de refrigeração (3) e o escudo de calor (2) está disposta uma camada (8) de co-

bre puro ou de uma liga de cobre com uma solidez < 200 HV.

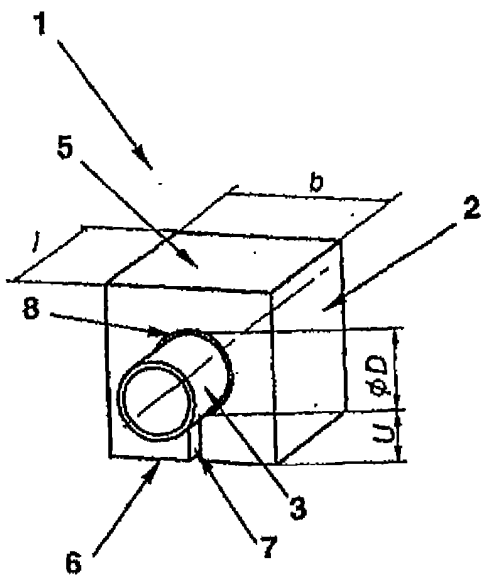


FIG 1

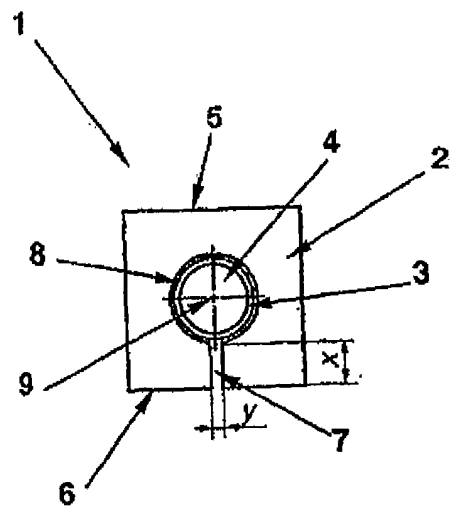


FIG 2

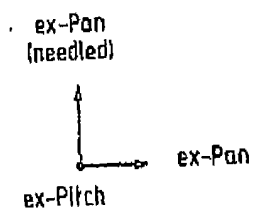
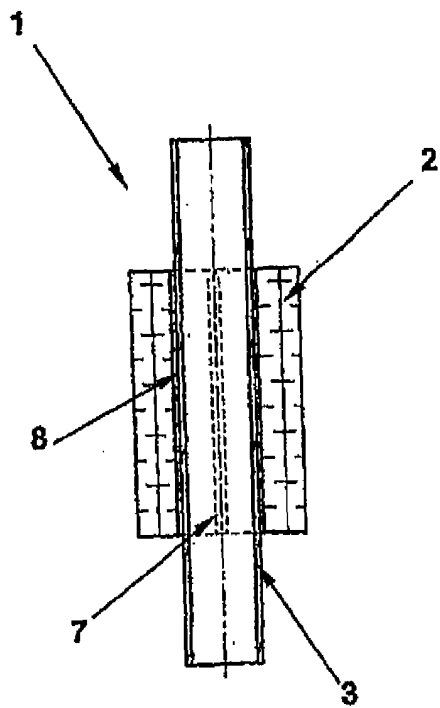


FIG 3

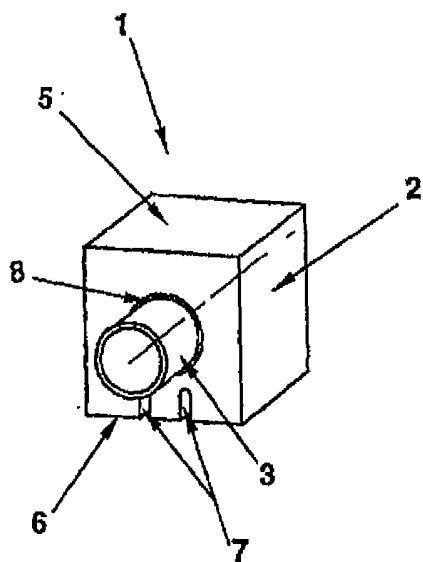


FIG 4

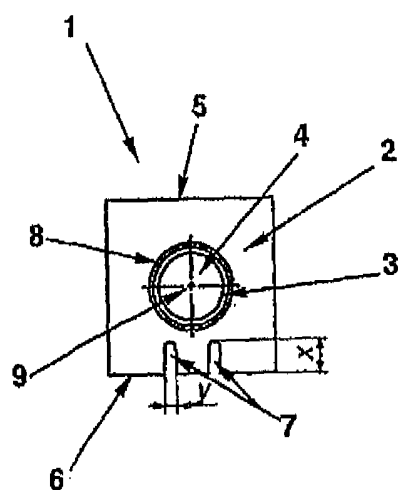


FIG 5

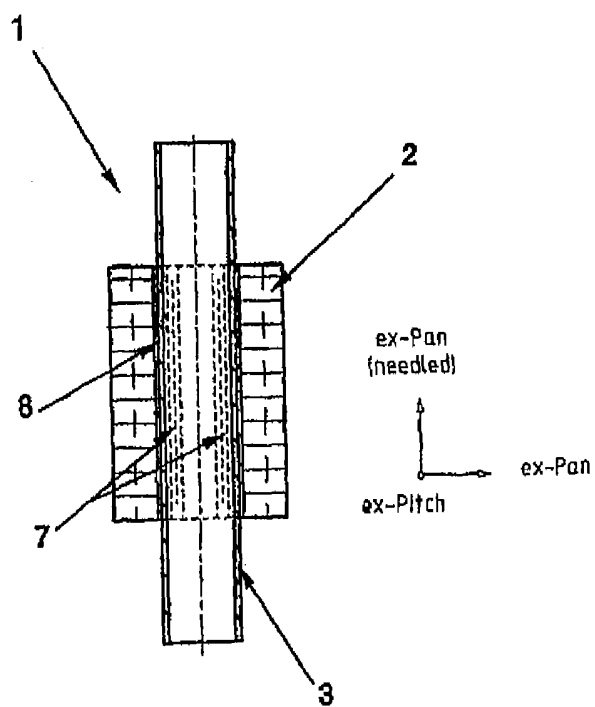


FIG 6

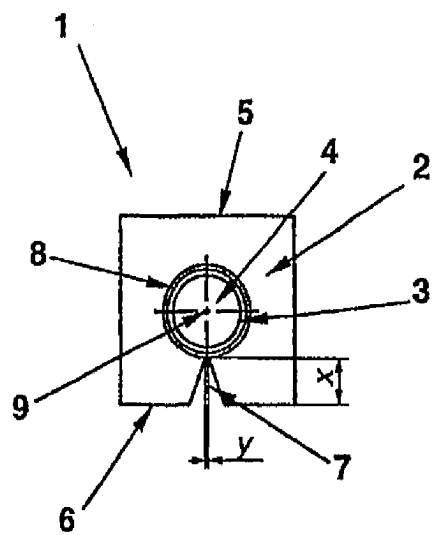


FIG 7