

CONFORMAÇÃO DOS METAIS E SINTERIZAÇÃO NAS CONDIÇÕES ISOTÉRMICAS: PARTICULARIDADES DE AQUECIMENTO¹

*Guerold Sergueevitch Bobrovnitchii*²
*Marcello Filgueira*³
*Rômulo Crespo Tardim*⁴

Resumo

A efetividade de processos de conformação a quente, como extrusão e sinterização, depende da realização do aquecimento da zona de trabalho. São conhecidos dois métodos convencionais de aquecimento do recipiente: através da indução sob a frequência da corrente industrial e pela resistência elétrica. Ambos os métodos aquecem a parte externa do recipiente, diminuindo a eficiência do aquecimento e resistência mecânica do recipiente. A base de cálculos desenvolvidos tem como propósito a instalação do aquecedor próximo à zona de trabalho, usando para o aquecimento, somente a resistência elétrica do aquecedor. Essa construção do recipiente com novo aquecedor foi fabricada e testada, mostrando a diminuição de gastos da energia elétrica.

Palavras-chave: Conformação; Extrusão; Aquecedor; Recipiente composto.

CONFORMATION OF METAL AND SINTERING IN ISOTHERMAL CONDITIONS: PARTICULARITIES OF HEATING

Abstract

The efficiency of hot forming process, such as extrusion and sintering, depends on the accomplishment of heating the work zone. Two conventional container-heating methods are known: through the induction under frequency from the industrial current and for electric resistance. Both methods give heat to the external part of the container, decreasing the efficiency of the process and mechanical resistance of the container. The calculus basis is developed for installing the heater close to the work zone, using for the heating, only the electrical resistance of the heater. This construction of the container with the new heater was manufactured and tested, showing the reduction of costs on electric energy.

Key words: Forming; Extrusion; Heater; Composed container.

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *Engenheiro Mecânico, Prof. Titular do Setor de Materiais Superduros, do LAMAV/CCT/UENF. Av Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes – RJ. CEP 28013-600, e-mail: guerold@uenf.br*

³ *DSc Engenharia de Materiais, Prof. Associado do LAMAV/CCT/UENF. Av Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes – RJ. CEP 28013-600, e-mail: marcello@uenf.br*

⁴ *Graduando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, LAMAV/CCT/UENF. Av Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes – RJ. CEP 28013-600, e-mail: rtardim@terra.com.br*

1 INTRODUÇÃO

Tanto a conformação em matrizes e extrusão, quanto a sinterização dos pós dependem de muitos fatores. Um deles é a velocidade de aquecimento da ferramenta e gastos de energia durante a execução desses processos.

Como é conhecido, na maioria das máquinas para extrusão, e dispositivos de sinterização de pós são utilizados aquecedores indutivos.⁽¹⁾ O tempo de aquecimento da ferramenta até a temperatura de trabalho (800°C – 1000°C) nestas máquinas varia de 2 até 50 ou mais horas. Quanto maiores as dimensões da ferramenta, maior será o tempo de aquecimento, já que o indutor fica na parte exterior da ferramenta.

Podem ser citadas outras formas de aquecimento de ferramentas. Por exemplo, pela resistência elétrica do aquecedor.⁽²⁾ O aquecimento realiza-se pela irradiação e convecção a partir de espirais ou barras de resistência aquecidas até altas temperaturas que ficam na superfície exterior da ferramenta. É necessário notar que em ambos os métodos, a ferramenta é aquecida em todo seu volume. E mais, junto com a superfície são aquecidas até altas temperaturas as peças que estão localizadas em sua periferia. Isto influencia muito sobre a vida útil da ferramenta e consumo da energia elétrica.

Há poucos trabalhos sobre a escolha racional do método de aquecimento efetivo das ferramentas para conformação e sinterização em condições isotérmicas. O mesmo acontece com as recomendações sobre os cálculos dos meios mais efetivos de aquecimento para estes fins.

Neste trabalho pretende-se à base de cálculos teóricos, desenvolver o método de aquecimento e construção do aquecedor para ferramentas utilizadas na conformação e sinterização de materiais metálicos.

2 PARTE TEÓRICA

É interessante analisar as possibilidades do aquecimento do corpo cilíndrico de comprimento unitário pelos dois métodos.

Tem-se no corpo cilíndrico a camada com espessura Δr que gera o calor. Não há perda de calor através dos topos. Em conformidade com o primeiro método a camada geradora de calor está localizada perto da superfície externa (Figura 1a), e com segundo -- perto da superfície do orifício central, ou seja, perto da zona de trabalho (Figura 1b).

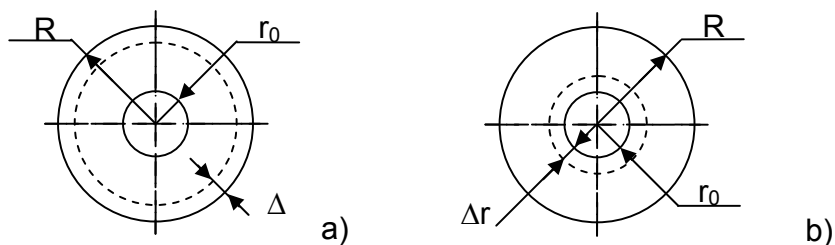


Figura 1. Esquemas de aquecimento para cálculo: a – primeiro método; b – segundo método.

Considerando a distribuição da temperatura na seção durante o aquecimento do corpo em conformidade com primeiro método,⁽³⁾ o tempo de aquecimento é expresso pela relação:

$$t = \frac{\lambda \cdot T(R + \Delta r)}{4 \cdot q \cdot a} + \frac{(R - \Delta r)^2}{8 \cdot a} - \frac{r_0^2}{4 \cdot a}; \quad (1)$$

Onde: λ – coeficiente de condutividade térmica; T – temperatura de aquecimento; R – raio externo do corpo; r_0 – raio interno; q – fluxo específico de calor; a – o coeficiente de condutividade de temperatura.

O tempo de aquecimento do cilindro em conformidade com o segundo método determina-se pelo desprendimento em camada Δr e perda de calor ao longo do raio R .⁽¹⁾

Em conformidade com isso:

$$t = \frac{\lambda \cdot T \cdot \Delta r^2}{4 \cdot q \cdot a} + \frac{\Delta r^2}{2 \cdot r_0 \cdot \Delta r}; \quad (2)$$

O segundo membro da equação (2) representa as perdas de calor que são sempre menores que 1. Para análise posterior ele desaparece.

Tomando as propriedades físico-caloríficas do cilindro, as equações (1) e (2) são representadas por:

$$\text{Para 1º método } t = A(R - \Delta r)^2 + B(R - \Delta r) - C; \quad (3)$$

$$\text{Para 2º método: } t = B \cdot \Delta r^2; \quad (4)$$

Na Figura 2 estas dependências são apresentas pelos gráficos. As curvas foram construídas com parâmetros relativos e neles foi considerada a mudança do Δr de 25 a 85mm. Este intervalo reúne os materiais a partir de aços de carbono até ligas a base de Ni em relação ao aquecimento indutivo, considerando a profundidade do fluxo de calor.

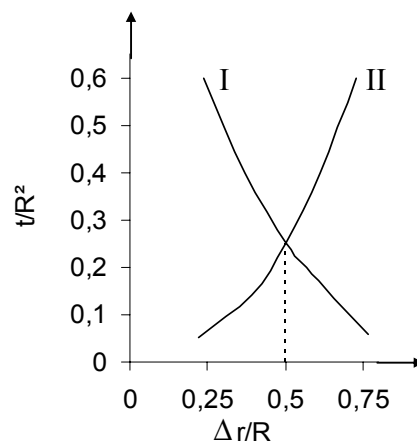


Figura 2. Dependência entre o tempo relativo de aquecimento t/R^2 do corpo cilíndrico e espessura relativa da camada aquecedora $\Delta r/R$ deste corpo para os métodos de aquecimento I e II.

Analisando as fórmulas (3) e (4) e os gráficos, pode ser concluído que o tempo de aquecimento do corpo cilíndrico com localização externa da camada que gera o calor, depende significativamente das dimensões deste corpo. O tempo de aquecimento do corpo com a localização interna da camada de calor depende em geral do tamanho desta camada. Neste caso é garantida a localização do aquecimento que atinge as temperaturas de trabalho somente na própria zona de trabalho. A distribuição da temperatura em zonas periféricas depende de características físicas do corpo aquecido. Esta distribuição pode ser controlada, refrigerando a superfície externa.

Com a correlação $\Delta r/R = 0,5$, ambos os métodos de aquecimento são idênticos. Diminuindo esta correlação, ou seja, aumentando o raio R da ferramenta, é racional que aconteça o aquecimento de modo imediato da zona de trabalho. Sob $\Delta r/R$ maior que 0,5, a escolha entre os dois métodos de aquecimento vai depender das particularidades da construção e da tecnologia de fabricação do aquecedor.

3 ANÁLISE DE CONSTRUÇÕES DOS AQUECEDORES

Na realização do processo industrial de deformação a quente dos metais e pós em condições isotérmicas, freqüentemente são exigidas ferramentas com grandes dimensões. Por isso o interesse está em apresentar soluções técnicas e de construção em relação do aquecimento imediato da zona de trabalho da ferramenta até altas temperaturas, e os métodos de cálculos dos seus parâmetros elétricos e energéticos.⁽⁴⁾

O esquema de construção, por exemplo, do recipiente para a prensagem a quente em condições isotérmicas com aquecedor incorporado perto da zona de trabalho, pode ser executado da seguinte forma (Figura 3).⁽⁵⁾ Sobre a superfície externa da bucha interna aplica-se o eletro-isolamento, por exemplo, Al_2O_3 com espessura de 0,3-0,4 mm realizado pelo método de plasma. Depois, usando a “máscara” ou outro método, aplica-se à camada de metal condutor elétrico com espessura 0,3-0,6mm do perfil (desenho) desejado. Em seguida, sobre parte do trabalho do aquecedor aplica-se uma nova camada de eletro-isolamento, por exemplo, Al_2O_3 com espessura de 0,3-0,4mm. Em regiões livres de isolamento conectam-se os contatos elétricos. A espessura geral do aquecedor não pode ser maior que 1,5mm.

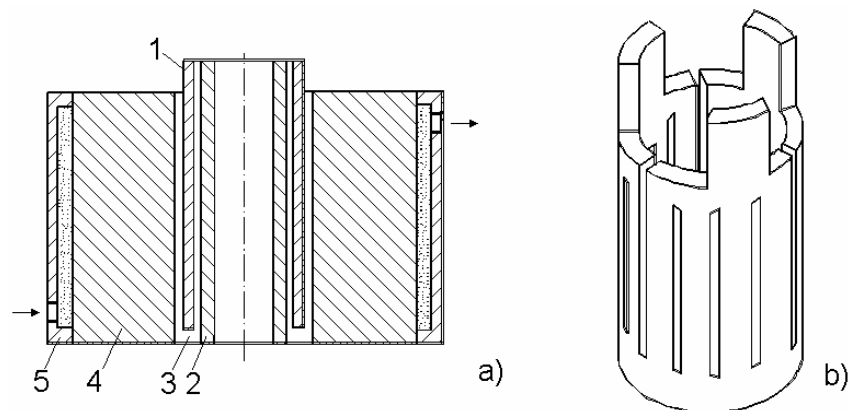


Figura 3. Recipiente composto para prensagem isotérmica a quente com aquecedor de resistência incorporado: a – a vista geral; b – variação do aquecedor; 1 – aquecedor; 2 – bucha interna de trabalho; 3 – isolamento elétrico; 4 – recipiente; 5 – camisa de refrigeração.

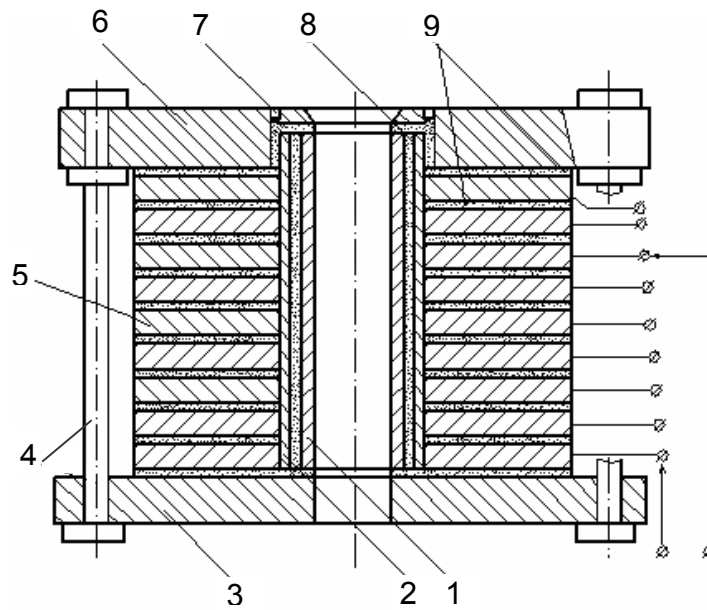


Figura 4. Recipiente para prensagem isotérmica a quente com aquecedor de resistência incorporado e com regulagem da zona de aquecimento ao longo da altura: 1 – bucha interna; 2 – bucha do aquecedor; 3 e 6 – blocos (chapas); 4 – fixação; 5 – disco do recipiente; 7, 8, 9 – eletro-isolamento.

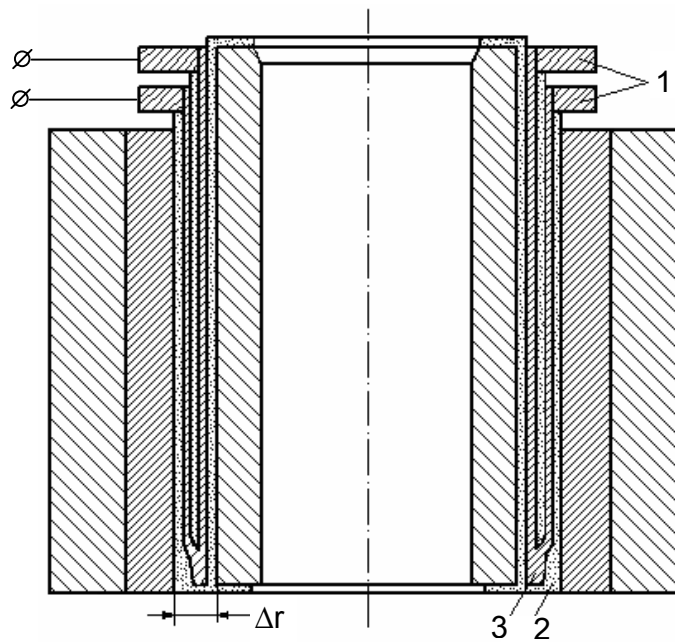


Figura 5. Recipiente com aquecedor de resistência incorporado de duas camadas: 1 – contatos; 2 – isolamento elétrico; 3 – aquecedor; $\Delta = 3 \text{ mm}$ – espessura do aquecedor.

A parte externa da camada aquecedora é coberta pela bucha com espessura fina que permita encaixar o conjunto “bucha interna - aquecedor - bucha fina” dentro da bucha externa (base). Então, obtém-se o bloco indismontável que pode ser montado dentro de outras buchas da ferramenta ou recipiente composto.⁽⁶⁾

Em outra variação da construção do aquecedor incorporado à bucha - aquecedor fabrica-se sem buchas externas de parede fina (Figura 4). A camada de condutividade elétrica aplica-se sobre a camada eletro-isolante sem qualquer desenho. Sobre a parte exterior da bucha, com aperto determinado, encaixam-se os anéis de contato para a ligação com a fonte de corrente elétrica. Cada anel está isolado eletricamente do vizinho pela camada fina de, por exemplo, Al_2O_3 . Tal solução técnica permite regular efetivamente a temperatura na zona de trabalho da ferramenta em relação da sua altura. Quanto menor é a altura do recipiente (altura da bucha - aquecedor) maior é o valor da corrente elétrica que passa pelo aquecedor levando ele próximo ao curto circuito.

A terceira variação, desenvolvida pelos autores, do aquecedor de resistência elétrica também pode ser feita pela aplicação, como nos exemplos anteriores, das duas camadas inteiriças cilíndricas divididas pelo Al_2O_3 (Figura 5). As camadas juntam-se entre si perto de um topo da bucha da ferramenta. Tal realização do aquecedor pode tornar possível a diminuição da espessura da camada condutora de corrente elétrica e diminuição de valores de corrente em aquecedores com constante de densidade de corrente nele. A espessura geral do aquecedor de camadas duplas pode chegar a 2,7 – 3,0 mm. A quantidade de camadas pode ser aumentada se for necessário. Do ponto de vista tecnológico, cada construção de aquecedor tem suas particularidades de construção e fabricação. Entretanto é necessário notar que sob cobertura de pó de metais e materiais com coeficientes variáveis de expansão térmica é necessário fazer uma seleção durante a formação da camada intermediária. Por exemplo, para adição perfeita do Al_2O_3 e liga Ni-Cr é necessário aplicar a camada intermediária da mistura partes iguais de Al_2O_3 e liga Ni-Cr. As variações das construções apresentadas do aquecimento de zonas de trabalho da ferramenta para a deformação até as temperaturas de trabalho podem garantir não somente a diminuição do tempo de aquecimento. A localização do elemento que gera o calor em uma camada relativamente fina fixada por uma zona de trabalho que permita receber as cargas de conformação sem debilitação da seção transversal da ferramenta. Além disso, a manutenção do gradiente de temperatura na ferramenta, dirigida a sua periferia pode garantir a compressão complementar da zona de trabalho do recipiente. Isto cria a possibilidade de aumentar a pressão tecnológica e ampliar a capacidade de deformação isotérmica a quente.

4 A METODOLOGIA DE CÁLCULO DE AQUECEDORES INCORPORADOS

O primeiro passo é a escolha do esquema de acomodação do aquecedor na ferramenta, e localização dos blocos de apoio com isolamento térmico. Conforme a necessidade, coloca-se a refrigeração em pares separados da fronteira. Depois, formam-se as condições de fronteira em relação às temperaturas nas direções possíveis de fluxos de calor. Previamente são indicadas as localizações dos isolamentos térmicos e do metal da ferramenta, considerando os fluxos de calor.

Na etapa preparativa seguinte do cálculo, entra a determinação prévia do volume da camada aquecedora de condutividade elétrica. Aqui é necessário estudo minucioso do desenho da construção da espiral aquecedora. Além disso, é desejado determinar a densidade máxima possível da corrente no aquecedor. Ele é limitado pela temperatura de fusão do material escolhido do aquecedor. A temperatura pode ser determinada por meio do calor de fusão sobre um mol do material. De outro lado, o calor de fusão se expressa através da energia elétrica que se desprende uma unidade de volume por um segundo.

Este parâmetro é expresso através da densidade da corrente:

$$q' = \delta^2 \cdot \rho \quad (5)$$

Onde: δ - a densidade de corrente no material condutor; ρ - a resistência elétrica específica.

Temos que a densidade de corrente máxima possível que leva à fusão do condutor em um segundo é:

$$|\delta|_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{L_f \cdot \gamma}{\rho}} \quad (6)$$

Onde: L_f – o calor da fusão do material – aquecedor; γ – o peso específico do material – aquecedor.

Para a maioria dos materiais usados para aquecedores, a densidade máxima possível da corrente fica no intervalo 130 – 150 A/mm².⁽¹⁾

À base de dados iniciais determinados na etapa preparatória, calculam-se as perdas de calor em todas as direções:

$$Q_p = \sum_{j=1}^n \Delta T_j \cdot A_j \cdot k_j \quad (7)$$

Onde: ΔT_j – o gradiente de temperatura; A_j – a superfície que transmite calor; k_j – coeficiente de transmissão de calor na j-ésima direção.

As temperaturas nas fronteiras imediatas são determinadas em conformidade com cada direção. Simultaneamente, pelo método de aproximações sucessivas, alcançam a diferença mínima entre as temperaturas corretivas nas fronteiras extremas.

Em conformidade com o cálculo da distribuição de temperatura, o conteúdo de calor do sistema:

$$Q_s = \sum_{i=1}^n m_i \cdot c_{ci} \cdot T_i \quad (8)$$

Onde: m_i – massa da i-ésima parte da ferramenta com temperatura T_i ; c_{ci} - capacidade térmica específica do material na i-ésima parte.

A potência de uso para aquecimento da ferramenta é determinada pelo somatório dos resultados das expressões (7) e (8).

$$N = Q_p + Q_s \quad (9)$$

Continuando e propondo que a densidade admissível da corrente $\delta < (\delta)$ determinam o tempo de aquecimento da ferramenta:

$$t = \frac{N}{\delta^2 \cdot \rho \cdot V_{aq}} \quad (10)$$

Onde: V_{aq} – o volume do material do aquecedor que é determinado na etapa inicial do projeto.

Sabendo da etapa preparativa do projeto de construção, o valor da seção S do material – aquecedor, calcula-se o valor da corrente que passa através do aquecedor:

$$I_{aq} = \delta \cdot S \quad (11)$$

Depois se calcula a resistência elétrica e a tensão do aquecedor:

$$R_{aq} = \frac{N}{I_{aq}^2} \quad (12)$$

$$U_{aq} = I_{aq} \cdot R_{aq} \quad (13)$$

Se o valor da tensão calculada no aquecedor for maior que a admissível para uso industrial seguro (48V), será necessária a correção da seção do condutor do aquecedor ou da densidade da corrente.

Depois da obtenção do valor seguro da tensão no aquecedor, determina-se o comprimento possível do aquecedor e a potência do transformador da alimentação:

$$L = \frac{R_{aq} \cdot S}{\rho} \quad (14)$$

$$N_{tr} = \frac{N}{\eta_{el}} \quad (15)$$

Onde: $\eta_{el} = 0,85$ – coeficiente de rendimento que considera as perdas em ligações.

5 PARTE EXPERIMENTAL

Para avaliação experimental da efetividade do aquecedor incorporado foi calculada e fabricada uma ferramenta para sinterização de compósitos de pó de diamante e pós metálicos com esta construção. Junto com a ferramenta foi utilizada a prensa com força de 630 toneladas destinada à produção de materiais superduros. Os parâmetros da ferramenta: o diâmetro externo – 230 mm, interno – 50 mm, altura – 180 mm, o aquecedor incorporado foi instalado no diâmetro 85 mm, o material usado no aquecedor foi liga de Ni-Cr.

No dispositivo elaborado foram feitas as sinterizações dos compósitos de diamante com os ligantes de cobre, silício e ligas deles.

Durante o aquecimento da ferramenta projetada, a corrente passada através do aquecedor não ultrapassou 1900 A. A tensão foi igual a 10 V. O tempo de aquecimento da zona interna até 1000°C foi de 27 minutos. Na superfície externa, a temperatura não ultrapassou 400°C. O consumo de energia foi de 8,55 kVA·h.

Para efeito comparativo, a ferramenta desenvolvida foi aquecida pelo indutor indutivo até que a temperatura no interior chegasse a 1000°C de frequência industrial. O tempo gasto foi de até 2 horas e 20 minutos. O valor da corrente no indutor foi igual a 2850 A, e a tensão 26 V. Portanto, sem contabilizar as perdas, a potência gasta durante o aquecimento foi 74 kVA·h.

6 CONCLUSÕES

Foi obtido o critério para escolha do local de acomodação do elemento gerador de calor na ferramenta para tratamento térmico tanto para conformação a quente, quanto para extrusão e sinterização.

Foi elaborada a metodologia do cálculo para aquecedores de resistência elétrica incorporada em zona de trabalho da ferramenta para tratamento isotérmico dos metais.

O aquecimento local da zona de trabalho da ferramenta pode aumentar a eficiência da utilização da deformabilidade isotérmica e aumentar a eficiência do processo.

REFERÊNCIAS

- 1 LAVERS, J. D.; BRINGER, P. P. An Analysis of the coreless induction furnace: axial distribution of electric and magnetic fields. *Eletrowärm International*. 1971 v.29.
- 2 BANNERITZ, H.; Klassifikation von Industricöfen. VII Congress Internazionale di Elettrotermia. Varsóvia, 1992, p. 36-45.
- 3 SWENTCHANSKII, A. D.; *Electric Industrial Furnaces*. Ed. by "Energia", Moscou, 1975, p.382.
- 4 LIDMAN, W. G.; MOYER, K. M.; Hot Pressing of Electrolytic Grade os Beryllium. *Modern Developments in Powder Metallurgy*. v.3. Plenna Press. 1961, p.60-80.
- 5 Patente da URSS nº 852405. Konteiner for pression of manufactured articles. STEPANSKII, L. G.; et al. Pub. bul nº29, 1981.
- 6 Patente da URSS nº 975137. Konteiner for pression of manufactured articles. GRUNIN, N. N., et al. Pub. bul nº 43, 1982.