

HIDROEXTRUSÃO A FRIO: A INTERAÇÃO ENTRE A MATRIZ E O TARUGO⁽¹⁾

Guerold S. Bobrovnitchii⁽²⁾

Alan M. Ramalho⁽³⁾

Apóstolos Jean Sideris Junior⁽⁴⁾

Resumo

Até o presente momento, ainda não foram apresentados dados em relação ao estudo das condições de atrito na zona de deformação plástica durante a hidroextrusão dos metais. Isto se deve a complexidade da avaliação do caráter de contato de pares sob atrito cinético específico. O presente trabalho, tem como objetivo a determinação teórica dos aspectos tribológicos e condições de atrito hidrodinâmico durante a extrusão hidrostática de um material metálico sob alta pressão até 1,6 GPa. Foi determinado que o atrito líquido durante o processo estabelecido da hidroextrusão sob alta pressão ocorre para valores bem definidos da velocidade de deformação, da viscosidade do meio comprimível e o do ângulo de inclinação do cone de entrada. Em relação à espessura da camada lubrificante do meio comprimível líquido, foi confirmado que ela depende, principalmente, da atividade superficial e da propriedade plástica do meio comprimível. O trabalho mostra que a presença de duas zonas de atrito na superfície de contato entre a matriz e o material extrudado permite obter produtos com alta qualidade superficial, sendo que a superfície do tarugo não influencia sobre a qualidade do produto.

Palavras-chave: Atrito; Hidroextrusão; Zona de deformação.

¹ 60º Congresso Anual - Internacional da ABM, Belo Horizonte – MG, 25 a 28 de Julho de 2005.

² Prof. Titular do Setor de Materiais Superduros, do Laboratório de Materiais Avançados, da Universidade Estadual Norte Fluminense.

³ D.Sc. em Engenharia de Ciências dos Materiais no Setor de Materiais Superduros, Laboratório de Materiais Avançados, Universidade Estadual Norte Fluminense.

⁴ Mestrando em Engenharia de Ciências dos Materiais no Setor de Materiais Superduros, Laboratório de Materiais Avançados, Universidade Estadual Norte Fluminense.

1 INTRODUÇÃO

No início dos anos 60 houve um grande desenvolvimento da tecnologia de hidroextrusão a frio sobre alta pressão (Pugiv, 1970, p. 372), alguns trabalhos afirmam que em alguns casos, ela poderá substituir a extrusão a quente (Spain et al., 1978, p. 423-464). Passaram-se anos até esta técnica encontrar sua área de aplicação, a qual ainda é muito reduzida. A grande vantagem de utilizá-la está na mudança de estado de tensão, favorável para a deformação plástica além da diminuição do atrito no contato entre o tarugo e a matriz.

Até o presente momento, ainda não foram apresentados trabalhos em relação ao estudo das condições de atrito na zona de deformação. Isto se deve a complexidade da avaliação do caráter de contato de pares sob atrito cinético específico.

Como já é conhecido, dependendo do caráter de contato da superfície, o atrito pode ser classificado em três tipos (Kameron, 1960, p.238):

Atrito seco – ocorre quando as superfícies entram em contato direto e simultâneo;

Atrito de fronteira - ocorre quando a espessura da camada do lubrificante não é suficiente, e nela não se revelam as propriedades volumétricas da substância lubrificante;

Atrito líquido ou hidrodinâmico - ocorre quando as superfícies em contato são totalmente diferenciadas pela camada espessa do meio viscoso.

É importante observar que estes tipos básicos de atrito são sempre acompanhados pelos intermediários: semi-seco, semi-líquido e etc.

Para o tipo seco, o valor do coeficiente de atrito está nos limites de 0,2 a 1,0 (dependendo do material), já o atrito de fronteira apresenta-se entre 0,08 a 0,2 e finalmente o atrito líquido de 0,01 a 0,08 (Bonden et al., 1961).

É claro que durante a hidroextrusão pode acontecer qualquer tipo de atrito, mas provavelmente é melhor variar as condições de semi-líquido até líquido, pois o processo ocorre geralmente sob pressões de até 1,6 GPa.

A análise das condições na zona de deformação plástica de alguns tipos de conformação de metais tem caráter ainda não estabelecido. Por exemplo, o trabalho de Korostelin e Moiseev (1962), é dedicado às pesquisas das condições de surgimento de atrito líquido durante a trefilação, a qual é parecida, em parte, com a hidroextrusão. Rozner e Faupel (1964, p.227) tentaram analiticamente determinar a espessura da camada lubrificante entre o metal deformado e a matriz durante a hidroextrusão, utilizando a equação do movimento do líquido viscoso entre as duas superfícies inclinadas. Mesmo assim, a respeito da condição da igualdade da pressão do líquido na camada lubrificante, a pressão normal do metal sobre a matriz, e algumas outras particularidades do cálculo pouco preciso, colocam em dúvida os resultados desta pesquisa.

No presente trabalho tenta-se determinar as condições de existência da lubrificação hidrodinâmica durante a extrusão dos metais por líquido sob alta pressão.

2 AS CONDIÇÕES INICIAIS DO CÁLCULO

Na prática, utiliza-se alguns tipos de óleo como meio comprimível. Ele é considerado líquido de Newton, o qual possui característica de movimento laminar.

Sua densidade é constante e a viscosidade está associada com a pressão pela seguinte correlação (Korovtchincky, 1959, p.189):

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{ap} \quad (1)$$

Isto significa que com uma pequena resistência ao atrito e pequenos valores de “a” é possível dizer que a pressão do metal sobre a matriz (σ_n) é igual à tensão principal máxima (Hill, 1956, p.238).

Então, para as condições de fluxo de Von Mises na zona de deformação plástica a tensão normal é:

$$\sigma_n = p_2 \approx p_1 + \sigma_s \quad (2)$$

Onde:

P_1 – pressão específica de prensagem;

P_2 – pressão do líquido no início da zona de deformação;

σ_s - tensão de cisalhamento.

O fluxo do lubrificante será de acordo com a expressão (2) somente no caso em que a sua pressão quando elevada até a zona antes do início da deformação atingir o valor da pressão normal sobre a matriz no início da zona de deformação. Conhecendo a distribuição da pressão e a velocidade do líquido lubrificante na zona antes do início da deformação plástica, pode-se concluir o caráter do atrito.

O atrito será líquido se:

$$h_2 > h_m + h_t \quad (3)$$

Onde:

h_m e h_t – alturas da rugosidade (protuberâncias) da superfície da matriz e do tarugo de metal.

Sob $h_2 < h_m + h_t$ o atrito vai possuir caráter misto ou de fronteira.

3 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ATRITO NA ZONA DE DEFORMAÇÃO

Analisando a região antes da zona de deformação plástica (Figura 1) pode ser dito que a espessura do lubrificante é muito menor em comparação ao raio do tarugo. Por isso o movimento pode ser definido como plano.

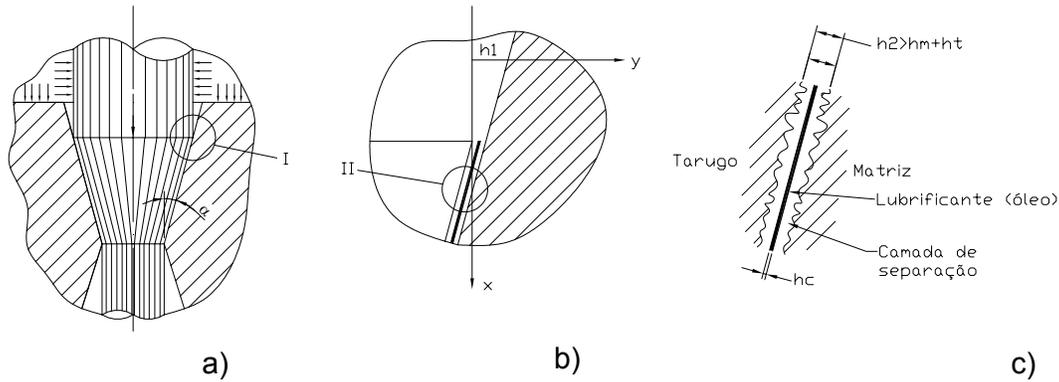


Figura 1. a) Esquema da zona de deformação durante a hidroextrusão; b) Detalhe da zona de deformação; c) Esquema do ponto de contato “matriz-tarugo” com apresentação da camada de separação das superfícies de contato (linha grossa hc).

Para a determinação de h_2 , podem ser usadas as equações de Reynolds (Sleskin, 1955, p.151) as quais são amplamente aplicadas em cálculos da teoria hidrodinâmica da lubrificação.

$$\frac{\partial_p}{\partial_x} = \frac{\partial}{\partial_y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial_y} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial_p}{\partial_y} = 0$$

Além disso, a equação de ininterrupção:

$$\frac{\partial u}{\partial_x} + \frac{\partial v}{\partial_y} = 0 \quad (5)$$

Integrando as equações (4 e 5) sob as seguintes condições de fronteira:

$$\begin{aligned} u &= u_0; v = 0 \text{ sob } y = 0 \\ u &= 0; v = 0 \text{ sob } y = h \\ p &= p_1 \text{ sob } x = 0 \\ p &= p_2 \text{ sob } x = e \end{aligned} \quad (6)$$

No resultado da integração obtém-se:

$$p = \frac{1}{a} \ln \left[-\frac{6\mu_0 u_0 a}{m} \left(\frac{1}{h} - \frac{h_2}{h^2} \right) + \frac{\mu_0}{\mu_1} \left(1 - \frac{h_2^2}{h^2} \right) + \frac{\mu_0}{\mu_2} \frac{h_2^2}{h^2} \right] \quad (7)$$

$$u = u_0 \left(1 - \frac{y}{h} \right) - 3u_0 \left[\frac{1}{h^2} - \frac{2h_2}{h^3} + \frac{m}{3u_0 a} \frac{h_2^2}{h^3} \left(\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2} \right) \right] \quad (8)$$

$$w = h_2 \left[u_0 - \frac{m \cdot h_2}{6a} \left(\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2} \right) \right] \quad (9)$$

Onde:

w – o gasto do lubrificante por segundo em relação à largura;

$m = \text{tg}\alpha$ - coeficiente de atrito.

O atrito líquido na zona de deformação é possível somente sob $w \leq 0$.
Então, da equação (9) tem-se:

$$h_2 = \frac{k \cdot u_0 \cdot a \cdot \mu_1}{m [1 - \exp(-a\sigma_s)]} \quad (10)$$

Onde: $0 \leq k \leq 6$

Sob quaisquer valores de k que estiverem no intervalo de 0 a 6, como pode ser visto na figura 2, as soluções para w , h_2 , p e u devem satisfazer as condições de fronteira do problema em questão. Por isso, é necessário verificar a correlação dos valores de “ k ” às condições complementares e aos dados experimentais.

Sob $k < 3$, a espessura da camada lubrificante tem o menor valor possível. A condição (3) pode existir somente sob altos valores de μ e u_0 e menores m e σ_s .

Além disso, sob $k < 3$ o máximo valor de p fica a frente da zona de deformação (Figura 2), o que é pouco provável.

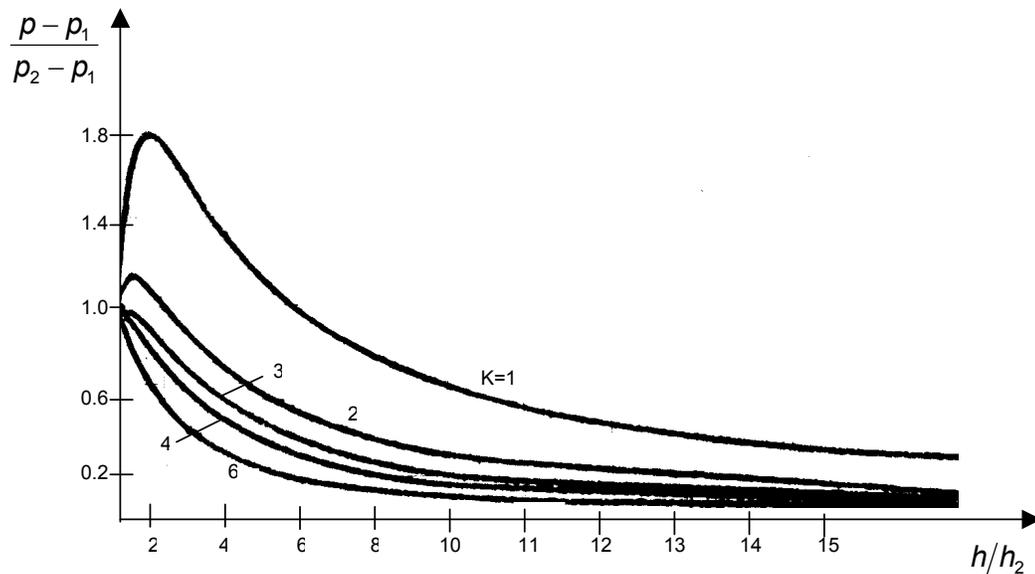


Figura 2. Dependência da pressão de contato em relação ao valor da fenda entre a matriz e o tarugo.

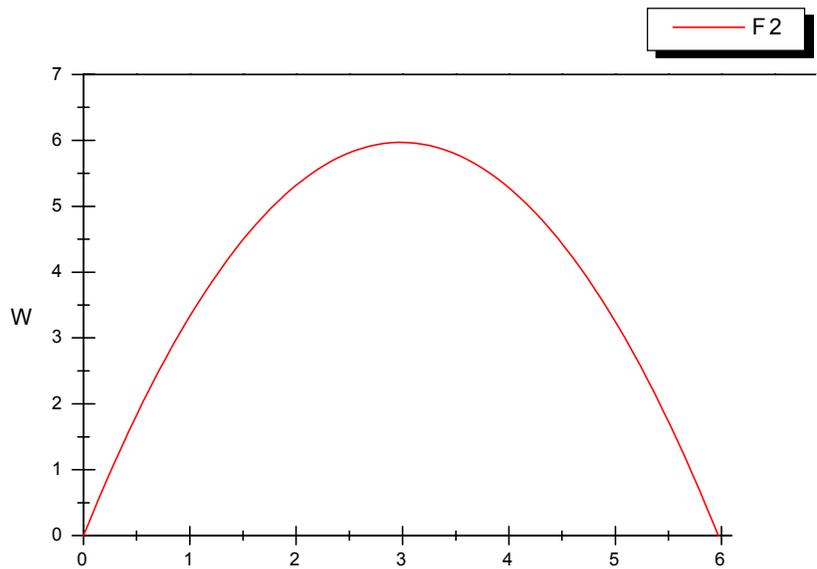


Figura 3. Dependência entre o gasto do lubrificante e o valor de “k” sob m , μ , μ_0 e σ_s constantes.

Em conformidade com a Figura 3 sob $k=\sigma$, w será igual a zero. Isto significa que o lubrificante não penetrou entre as superfícies de contato. Mas isso não é justificado pelos experimentos, pois no produto prensado sempre está presente a camada de lubrificante (Fiorentino, MS 72-154 e MF 71-10). Observando a figura 1 (c) pode-se concluir também que, se o material do tarugo é mais dúctil do que o material da matriz, os picos de rugosidade acumulam o líquido e liberam-no durante a sua deformação no decorrer do processo

Sob $k=3$ o gasto do lubrificante é $w = \frac{1}{2}u_0.h_2$. É possível supor que este caso é real em conformidade com o princípio do mínimo da energia plena da extrusão, pois o gasto do lubrificante é máximo (figura 3), e conseqüentemente, tem que surgir a resistência mínima ao atrito na zona de deformação. Entretanto, os experimentos mostram o seguinte:

- ✓ Sob um aumento de três vezes da velocidade inicial de extrusão, não houve um acréscimo significativo da espessura da camada lubrificante, apesar de que o valor de h_2 sob $k=3w$ é proporcional à u_0 .
- ✓ Pode se observar claramente a existência de duas zonas durante a extrusão da parte do tarugo no local da superfície situada na zona de deformação. Na zona de entrada, que ocupa a maior parte da superfície de contato entre o tarugo e a matriz, tem-se uma camada bastante grossa de lubrificante. Na zona próxima a parte calibrante da matriz o caráter do atrito é evidentemente de fronteira.

Em resumo, conclui-se que sob o processo estabelecido da extrusão por líquido de alta pressão o valor “k” fica entre 3 e 6. Sendo que a grandeza mais provável do “k” fica no intervalo entre 4 e 5.

4 CONCLUSÕES

1. O atrito líquido durante o processo estabelecido da hidroextrusão pelo líquido de alta pressão é possível somente sob a condição:

$$\frac{k u_0 a \mu_1}{m[1 - \exp(-a \sigma_s)]} > h_m + h_t \quad (11)$$

ou seja, sob as velocidades determinadas da extração, viscosidade do lubrificante e ângulo de inclinação do cone da entrada da matriz.

2. Apesar de resolvida a condição (11) no início da zona de deformação, isto não significa que o processo contínuo vai receber o atrito líquido. Na saída, o atrito pode ser de fronteira e de preferência em conformidade com as seguintes causas:
 - a viscosidade do lubrificante na saída em muitas vezes é menor que na entrada da zona de deformação devido a diminuição da pressão normal do tarugo sobre a matriz e o aquecimento significativo do lubrificante;
 - na saída da zona de deformação ocorre a redução brusca da pressão de contato.
3. A espessura da camada do lubrificante, sem gasto na saída, não apresenta variação, e a mesma pode ser determinada pela atividade superficial e propriedades plásticas do lubrificante;
4. A espessura da camada na entrada da zona de deformação estabiliza-se em dependência do gasto do lubrificante por unidade de tempo e corresponde a $3 < k < 6$. Com o aumento da velocidade de extrusão h_2 é aumentado não somente devido ao aumento da u_0 , mas em consequência do crescimento de “ k ”;
5. A presença na superfície de contato do tarugo e a matriz de duas zonas, permite obter os produtos com alta qualidade de superfície tendo a baixa qualidade superficial do tarugo;
6. Na medida em que sob $h_2 > h_m + h_t$ a zona de entrada com caráter de atrito líquido ocupa a parte maior da superfície do contato do tarugo e matriz, as perdas somatórias causadas pelo atrito são determinadas, principalmente, pela resistência do atrito na zona de entrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pugiv M. D., Mechanical Behaviour of Materials Under High Pressure. Elsevier, 1970 – p. 372;
2. Low A. M., Danaldson C. J., and Wilkinson B. T., High Pressure Engineering Conf., London. Proc. Inst. Mech. Eng. 182 (3c), p.188, 1968;
3. Spain I. L. and Paauwe J., High Pressure Technology. V. 2, 1978, 423-464;
4. Kameron A., Lubrification Teory in Engeeniring. London. 1960. p. 238;
5. Bonden F. P., and Teibor D. Atrito e Lubrificante, 1961;
6. Korostelin A. A., and Moiseev V. F., O novo método do oferecimento do lubrificante tecnológico na zona de deformação durante a trefilação. Aço N3, 1962;

7. Rozner A., and Faupeb L. M., Some Consideration of the Mechanic of Hydrostatic Extrusion. J. Franklin Inst., 1964, 227, N3;
8. Korovtchincky M. V., Fundamentos teóricos do funcionamento dos rolamentos. Moskou. Ed. Machgiz. 1959, p. 189 (em russo);
9. Hill P., Teoria Matemática da Plasticidade. Moscou. Ed. Gostekhizdat, 1956, p. 238 (em russo);
10. Sleskin N. A., Dinâmica do Líquido Incompressível Viscoso. Moscou. Ed. Fismatgiz. 1955, p. 151;
11. Fiorentino R. J., ASME Technical Paper MS 72-154;
12. Fiorentino R. J., G. E. Meyer and T. C. Byrer, ASME Technical Paper MF 71-10.

HYDROEXTRUSION: THE INTERACTION BETWEEN THE DIE AND BAR ⁽¹⁾

Gueroold S. Bobrovnitchii ⁽²⁾

Alan M. Ramalho ⁽³⁾

Apóstolos Jean Sideris Junior ⁽⁴⁾

Abstract

Until the present moment, had still not been presented data in relation to the study of the conditions of friction in the zone of plastic deformation during the hydroextrusion of metals. This is due the complexity of the evaluation of the character of contact of pairs under specific kinetic friction. The present work, has as objective the theoretical determination of the convection friction and conditions of hydrodynamic friction during the hydrostatic extrusion of a metallic material under high pressure up to 1,6 GPa. were determined that the liquid friction during the established process of the hydroextrusion under high pressure occurs for well definite values of the speed of deformation, the viscosity of the compressible way and it inclination angle it entrance cone. In relation to the thickness of the lubricative layer of the liquid compressible way, it was confirmed that it depends, mainly, of the superficial activity and the plastic property of the compressible way. The work sample that the presence of two zones of friction in the faying surface between the die and the extrudado material allows to get products with high superficial quality, being that the surface of the wooden plug does not influence on the product quality.

Key-words: Friction; Hydroextrusion; Deformation zone.

¹ *60th Annual Congress - International, 25 - 28 July, 2005 – Belo Horizonte – MG – Brazil.*

² *Prof. Titular of Sector de Materials Superhard, Laboratory of Materials Advanced, University North Fluminense Staten.*

³ *Pos Graduating in Science Engineering of Materials at Sector de Materials Superhard, do Laboratory of Materials Advanced, University North Fluminense Staten.*

⁴ *Student of graduate in Metallurgical and Materials Engineering of Laboratory of Materials Advanced, University North Fluminense Staten.*