

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO SOB EXTRUSÃO DE PÓS NANOESTRUTURADOS DE LIGAS DE ALUMÍNIO COMO UM PROCESSO TERMICAMENTE ATIVADO

Mauricio Mhirdai Peres¹

João Batista Fogagnolo²

Cláudio S. Kiminami³

Walter José Botta Filho³

Claudemiro Bolfarini³

Alberto Moreira Jorge Júnior³

Resumo

Neste trabalho, a extrusão de pós nanoestruturados é analisada a partir do ponto de vista de mecanismos de deformação ativados termicamente, tais como os que operam normalmente em materiais cristalinos convencionais. Pós nanoestruturados de ligas de alumínio foram conformadas por extrusão a quente em três temperaturas diferentes: 375°C, 400°C e 425°C, com razão de extrusão de 10:1 e velocidades de 1 mm/s, 15 mm/s e 30 mm/s. Os dados resultantes foram analisados utilizando equações típicas do trabalho a quente de materiais convencionais, principalmente a equação de Sellars, e os resultados são comparados com os dados da literatura de materiais convencionais processados por extrusão e torção a quente. Pode ser verificado que a extrusão a quente de materiais nanoestruturados também é um processo termicamente ativado, no qual o mecanismo controlador também é a escalagem ou o movimento severo de discordâncias. As mudanças microestruturais observadas são consistentes com os mecanismos de deformação propostos.

Palavras-chave: Extrusão; Pós; Alumínio; Energia de ativação.

EXTRUSION BEHAVIOUR ANALYSIS OF NANOSTRUCTURED ALUMINIUM POWDER ALLOYS UNDER A THERMALLY ACTIVATED PROCESS BASEMENT

Abstract

In this work, the hot extrusion of nanostructured powders is analysed from the point of view of thermally activated deformation mechanisms, such as normally operate in conventional crystalline materials. Nanostructured aluminium powders alloy were deformed by hot extrusion at temperatures of 375°C, 400°C and to 425°C, with extrusion ratio of 10:1 and over the ram speed range of 1 mm/s to 30 mm/s. The resultant data were analyzed by means of typical equations from hot working of conventional materials, mainly the Sellars equation, and the results are compared with the literature data of conventional materials processed by hot extrusion and hot torsion. It is concluded that the hot extrusion of nanostructured materials is a thermally activated process, in which the rate-controlling mechanism is either the climb of edge dislocations or the motion of jogged screw dislocation. The microstructural changes observed are consistent with the proposed deformation mechanisms.

Key words: Extrusion; Powders; Aluminum; Activation energy.

1 INTRODUÇÃO

Apesar do grande progresso no entendimento da tecnologia de extrusão de pós, principalmente os nanoestruturados, muito pouco é conhecido sobre os mecanismos que atuam durante o processamento deste tipo de material. Considerações

prévias que descrevem a extrusão de pós têm indicado que a relação entre a velocidade de extrusão (V), a pressão (P) e a temperatura (T) pode ser dada por equações do tipo:⁽¹⁻⁵⁾ $V = aP^b$ e $P = A' \exp(-\lambda T)$. Nestas equações, a e b são constantes que dependem da temperatura, A' é uma

¹Doutor – UFSCAR (PPG-CEM / DEMA). Rodovia Washington Luís, km 235. CEP: 13560-905. São Carlos, SP. peresmm@yahoo.com.br

²Professor Doutor – Universidade São Francisco. Rua Alexandre Rodrigues Barbosa, 45. Itatiba, SP

³Professor Doutor – UFSCAR (PPG-CEM / DEMA). Rodovia Washington Luís, km 235. CEP: 13560-905. São Carlos, SP. moreira@dema.ufscar.br

constante da velocidade de extrusão e λ é um “coeficiente” com valores diferentes para cada tipo de metal. Embora estas equações tenham aplicações bastante amplas, elas não contribuem muito com o entendimento dos fundamentos da deformação. Além disso, até o momento, a extrusão de pós não tem sido considerada como um processo termicamente ativado.

Esta lacuna é surpreendente porque o comportamento de pós nanoestruturados em processos de trabalho a quente é similar ao comportamento de materiais cristalinos convencionais em muitos aspectos. Na realidade, existe um conjunto de evidências experimentais^(4,5) sugerindo essa similaridade, mesmo para processos de deformação a quente com taxas de deformação muitas ordens de grandeza diferentes (de 10^{-5}s^{-1} para fluência e 10^0s^{-1} para processos com taxas maiores, como na extrusão ou torção). Uma vez que o trabalho a quente de materiais convencionais tem sido extensivamente analisado em termos de mecanismos que envolvem discordâncias, a comparação entre o processamento a quente de tais materiais com o de pós nanoestruturados processados por extrusão a quente é de grande valia, pois pode sugerir os possíveis mecanismos de deformação que atuam durante o processo. Neste trabalho, a extrusão a quente de pós de alumínio é examinada sob o ponto de vista de mecanismos de deformação termicamente ativados, como os que operam durante o trabalho a quente de materiais convencionais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram usados pós nanoestruturados de uma liga de alumínio com composição nominal de Al-3,0Fe-0,42Cu-0,37Mn (%p) (liga Al-3Fe) e tamanho médio de grão de 25 nm obtidos via atomização em atmosfera de argônio. Pré-formas cilíndricas do pó com densidade relativa de 0,96 e diâmetro de 26,2 mm foram preparadas via compressão a frio. A seguir, as pré-formas foram consolidadas por extrusão nas temperaturas 375°C, 400°C e 425°C, em três velocidades: 1 mm/s, 15 mm/s e 30 mm/s e com razão de extrusão de 10:1, resultando em barras de 7,9 mm de diâmetro. As microestruturas foram observadas em um microscópio eletrônico de transmissão.

A comparação entre os dados de extrusão e de outros ensaios de conformação não pode ser feita diretamente, uma vez que a pressão de extrusão não é a tensão verdadeira do material. Dessa forma, a tensão efetiva que atua durante a extrusão é calculada a partir da pressão de extrusão, enquanto a taxa de deformação média é calculada a partir da velocidade de extrusão. Os procedimentos para a correção do efeito da deformação homogênea, do atrito e do trabalho redundante foram realizados de acordo com a metodologia descrita por Thomsen, Yang e Kobayashi.⁽⁶⁾

A deformação efetiva foi calculada utilizando a Equação 1 e a taxa de deformação média no processo de extrusão, pela Equação 2:⁽⁷⁾

$$d\bar{\epsilon} = \frac{dl}{l} \Rightarrow \bar{\epsilon} = \int_0^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (1)$$

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{6VD_c^2 \tan \alpha}{(D_c^3 - D_e^3)} 2 \ln \frac{D_c}{D_e} \quad (2)$$

em que l_0 : comprimento inicial, l : comprimento final, V : velocidade média de extrusão, D_c : diâmetro inicial, D_e : diâmetro final; e α : semi-ângulo da zona morta do metal.

Para determinar as constantes envolvidas no cálculo da energia de ativação, por meio da equação do seno hiperbólico de fluência, foi utilizado um método similar ao proposto por Uvira e Jonas,⁽⁸⁾ na resolução da Equação 5.

Neste trabalho, a técnica de ajuste para a resolução de equações não-lineares (como é o caso da Equação 5) consiste basicamente de um programa que compreende três algoritmos, que utilizam os métodos de Newton-Raphson, Steepest Descent e Marquardt para resolução de sistemas de equação, utilizando a técnica de mínimos quadrados. O programa desenvolvido para o ajuste é, em parte, uma variação das rotinas VA05A e MBI 1A (inversão de matrizes) da *Harwel Subroutine Library* (biblioteca disponível em FORTRAN), utilizada em computadores de grande porte e adaptada para microcomputadores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As duas aproximações experimentais usuais na investigação da deformação em altas temperaturas exibem uma importante e comum característica. Na primeira aproximação, que corresponde à fluência, é aplicada uma tensão constante ao material a uma temperatura constante e a deformação resultante é registrada contra o tempo. Após um estado transitório inicial, ocorre um estado estacionário com taxa de deformação constante (estágio secundário de fluência) que é sensível à variação tanto da tensão aplicada quanto da temperatura.

Na segunda aproximação, é aplicada uma taxa de deformação constante e a tensão é registrada, que corresponde a ensaios de torção ou compressão a quente. Sob uma temperatura constante ocorre um crescimento inicial da tensão até um estado estacionário, no qual a tensão é sensível à variação tanto da taxa de deformação quanto da temperatura.⁽⁹⁾ Este estado estacionário é análogo ao estado estacionário de fluência e, com o qual apresenta muitas características em comum.

3.1 Dependência da Taxa de Deformação com a Tensão

De forma a avaliar a dependência da taxa de deformação com a tensão em condições de extrusão dos pós nanoestruturados e comparar esta dependência com os de materiais convencionais, os dados de extrusão obtidos foram analisados de acordo com as equações de potência, exponencial e do seno hiperbólico de fluência.

Quando a tensão média efetiva ($\bar{\sigma}$) e as taxas de deformação médias ($\bar{\dot{\epsilon}}$) (por simplicidade são denotadas apenas por σ e $\dot{\epsilon}$, respectivamente), dos dados de extrusão dos pós nanoestruturados, foram incluídos em um gráfico log-log, foram obtidas retas convergentes com inclinações diferentes, mostrando que (Equação 3):

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n'} \quad (3)$$

em que A_1 e n' são constantes dependentes da temperatura. A inclinação n' diminui de 12°C a 375°C para 6°C a 425°C, de uma maneira análoga àquela observada em fluência de alumínio.⁽¹⁰⁻¹²⁾ Quando os valores de $\log(\dot{\epsilon})$ são registrados contra a tensão σ , são obtidas retas paralelas apenas em tensões superiores a 30 MPa, mostrando que, acima destas tensões, a taxa de deformação é dada por:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-\Delta H/RT) \quad (4)$$

Em que A_2 é uma constante independente da temperatura, β é uma constante, ΔH é uma energia de ativação experimental e R é a constante universal dos gases.

Como a Equação 4 é válida apenas em uma parte da faixa experimental e a Equação 3 não serve para a determinação da energia de ativação, foram utilizadas a Equação 5 do seno hiperbólico e a Equação 6 do parâmetro de Zener-Hollomon (Z).

$$\dot{\epsilon} = A_3 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-\Delta H/RT) \quad (5)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp(\Delta H/RT) = A_3 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (6)$$

Em que A_3 , α , n e ΔH são constantes. A Equação 5 é proposta por Garofalo⁽¹³⁾ para a correlação de dados de fluência e adaptada e aplicada em ensaios de torção a quente por Sellars e Tegart.⁽¹⁴⁾

A Figura 1 apresenta a aplicação da lei do seno hiperbólico (Equação 5) para a análise dos dados das extrusões dos pós nanoestruturados da liga Al3Fe (Figura 1a) e sua comparação com os dados da literatura⁽¹⁵⁾ da extrusão de alumínio cristalino convencional de pureza comercial (Figura 1b), indicando a compatibilidade dos dados de trabalho a quente obtidos em altas taxas de deformação e grandes deformações tanto de pós nanoestruturados como de alumínio convencional.

Considerando que α e n são constantes independentes da temperatura e podem ser determinadas a partir dos dados experimentais nos ensaios de deformação a quente,⁽¹⁴⁾ observa-se, na Figura 1a, para os resultados do presente trabalho, que $\log(\dot{\epsilon})$ é uma função do $\log(\sinh(\alpha\sigma))$ para $\alpha = 0,04821 \text{ MPa}^{-1}$ e que são

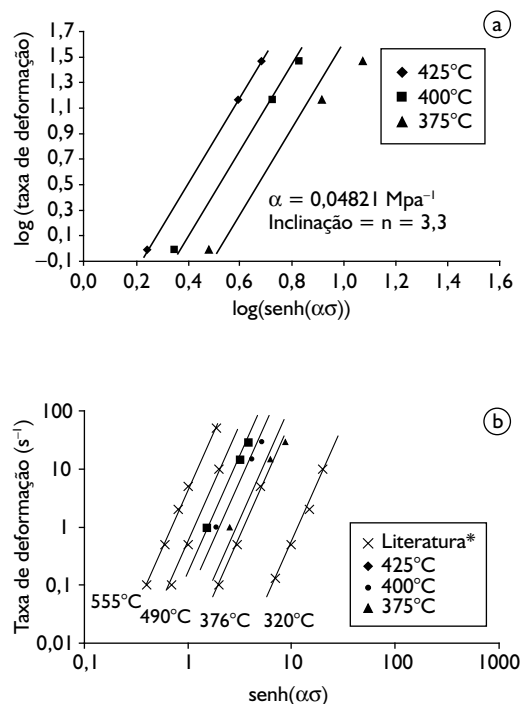


Figura 1. Lei do seno hiperbólico (Equação 5) na análise das extrusões de: a) pós nanoestruturados da liga Al3Fe; e b) pós nanoestruturados da liga Al3Fe em conjunto com dados da literatura,⁽¹⁵⁾ para alumínio convencional de pureza comercial (99,73% Al).

obtidas retas com inclinação constante de $n = 3,3$ em toda a faixa de tensões nas três temperaturas usadas, demonstrando que os dados de extrusão dos pós nanoestruturados são muito bem descritos pela equação do seno hiperbólico.

A partir da discussão entre tensão e taxa de deformação dos dados de extrusão a quente de pós nanoestruturados, é aparente que as equações de fluência, já bem estabelecidas, podem ser usadas satisfatoriamente para descrever o fenômeno. A similaridade da dependência da tensão com a taxa de deformação de extrusão com aquela apresentada por fluência é consideravelmente significativa, uma vez que as taxas de deformação ($\dot{\epsilon}$) de extrusão são muitas ordens de grandeza superiores às usadas em fluência ($\dot{\epsilon}$ de 10^0 a $3,0 \times 10^1 \text{ s}^{-1}$, para as extrusões do presente trabalho, contra $\dot{\epsilon}$ de 10^{-9} s^{-1} a 10^{-5} s^{-1} para a fluência⁽¹⁶⁾). Esta observação confirma a sugestão anterior onde a extrusão a quente de pós nanoestruturados pode ser considerada como uma extensão lógica de fluência de alta temperatura ou qualquer outro processo de trabalho a quente. Do ponto de vista da resposta do material, os vários processos aparecem como sendo intrinsecamente similares.

3.2 Comparação da Inclinação n entre o Alumínio Nanoestruturado e o Alumínio Convencional

A Figura 1b apresenta dados da extrusão a quente de barras de alumínio convencional de pureza comercial (99,73% Al)⁽¹⁵⁾ e os dados experimentais deste trabalho. Considerando a larga faixa de quatro ordens de grandeza de taxas de deformação e a diferença de composição entre os dois materiais, a aderência dos dados de trabalho a quente com as equações de fluência é extremamente próxima, com as constantes da equação tomando valores similares. Entretanto, há uma pequena diferença de inclinação n entre os dados da literatura ($n = 4,0$) e os dados experimentais ($n = 3,3$), podendo ser observada mais claramente no gráfico de Z contra $\log(\sinh(\alpha\sigma))$ na Figura 2a. Essa diferença dos valores de n pode estar relacionada ao efeito das diferentes composições entre o alumínio convencional de pureza comercial e a liga Al-3Fe nanoestruturada, sendo esse um comportamento comumente observado em processamento a quente de materiais convencionais de diferentes composições.

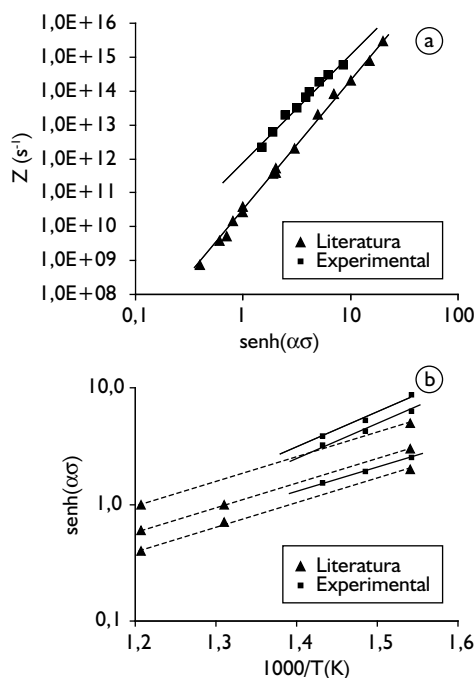


Figura 2. a) Dados obtidos de extrusão a quente da literatura⁽¹⁵⁾ e do presente trabalho mostram a diferença de inclinação n ; e b) Gráfico $\sinh(\alpha\sigma)$ em função de $1/T$ para o uso da inclinação na determinação da energia de ativação.⁽¹⁵⁾

3.3 Dependência da Taxa de Deformação com a Temperatura

A comparação desses dois parâmetros na extrusão a quente de pós nanoestruturados e de materiais convencionais pode ser feita pela comparação das energias de ativação experimentais de ambos os casos. O cálculo da energia de ativação no presente trabalho adota o método proposto por Uvira e Jonas⁽⁸⁾ para a resolução da Equação 5, conforme procedimento descrito na metodologia. Graficamente, o método proposto por Uvira e Jonas considera que a Equação 5 pode ser reescrita da seguinte forma (Equação 7):

$$\dot{\epsilon} = cte \times [f(\sigma)]^n \times \exp(-\Delta H/RT) \quad (7)$$

Analisando-se a equação 7, pode ser construído um gráfico de $\log(\dot{\epsilon})$ como uma função de T^{-1} , com σ constante. A inclinação deste gráfico é proporcional a ΔH , isto é (Equação 8):

$$\left(\frac{\delta \log \dot{\epsilon}}{\delta T^{-1}} \right)_{\sigma} = \frac{-\Delta H}{2,3R} \quad (8)$$

em que $\dot{\epsilon}$ e T são medidos experimentalmente. Porém, o cálculo de ΔH com tensão constante envolve extensivas extrapolações e interpolações de dados experimentais de tensão-taxa de deformação, como pode ser observado na Figura 1b.

A forma alternativa para o cálculo de ΔH foi o de utilizar a Equação 9:

$$\begin{aligned} - \left(\frac{\delta \log \dot{\epsilon}}{\delta \log f(\sigma)} \right)_{T} \times \left(\frac{\delta \log f(\sigma)}{\delta T^{-1}} \right)_{\dot{\epsilon}} &= \\ = \left(\frac{\delta \log \dot{\epsilon}}{\delta T^{-1}} \right)_{\sigma} &= \frac{-\Delta H}{2,3R} \end{aligned} \quad (9)$$

em que cada termo do lado esquerdo da equação é obtido a partir de medidas experimentais (Figuras 1b e 2b, respectivamente). A Figura 2b apresenta o comportamento da dependência da tensão com a temperatura em taxas de deformação constantes. As inclinações das retas são usadas na determinação da energia de ativação, assim como as inclinações da Figura 1b. A Tabela 1 apresenta os valores da energia de ativação obtidos neste trabalho e os obtidos na literatura para torção a quente de alumínio puro⁽¹⁴⁾ e extrusão a quente de alumínio comercial.⁽¹⁵⁾ Os valores encontrados são similares e são aproximadamente iguais àqueles apresentados pela autodifusão, sugerindo que a resposta à variação de temperatura dos pós nanoestruturados na extrusão a quente é similar àquelas observadas em materiais convencionais. Uma comparação melhor entre os dados deste trabalho e os dados de materiais convencionais está apresentada na Tabela 2, que resume as constantes obtidas neste trabalho e na literatura: (14, 15) n , α , ΔH e A_3 .

As constantes da Equação 5 mostradas na Tabela 2 têm valores similares para os três materiais, tanto em extrusão quanto em torção a quente, dando suporte ao argumento que a extrusão a quente de pós nanoestruturados, sob processamento a quente em geral, são processos de deformação termicamente ativados e são processos controlados por difusão assim como nos materiais convencionais, mesmo com diferenças nas taxas de deformação. A dependência da tensão observada experimentalmente neste

trabalho e as evidências de variações micro/subestruturais que acontecem durante a extrusão dos pós, apresentadas na Figura 3, sugerem que o mecanismo controlador do movimento e geração de discordâncias é dominado pelo escorregamento com desvio ou ainda pela escalagem das mesmas, como em materiais convencionais processados a quente.

Tabela 1. Energias de ativação para extrusão e torção a quente (Equação 9).

Dados	$\left(\frac{\delta \log \dot{\epsilon}}{\delta \log f(\sigma)}\right)_T^*$	$\left(\frac{\delta \log f(\sigma)}{\delta T^{-1}}\right)_\dot{\epsilon} \times 10^{-3**}$	ΔH (kcal/mol)
Literatura ⁽¹⁴⁾	4,0	2060	37,4
Literatura ⁽¹⁵⁾	4,8	1710	37,3
Experimentais	3,3	1444	39,2

*Os valores podem ser obtidos a partir das retas da Figura 1b; e **Os valores podem ser obtidos a partir das inclinações das retas da Figura 2b.

Tabela 2. Resumo das constantes n, α , ΔH e A_3 , para extrusão e torção a quente.

Temperatura (°C)	n	α (ksi ⁻¹)	ΔH (kcal/mol)	A_3	Comentários
320	4,0	0,30	37,4	$0,28 \times 10^{10}$	Extrusão (15):
376	4,0	0,30	37,4	$2,00 \times 10^{10}$	Alumínio de
445	4,0	0,30	37,4	$2,34 \times 10^{10}$	pureza comercial
490	4,0	0,30	37,4	$2,34 \times 10^{10}$	(99,73% Al)
555	4,0	0,30	37,4	$2,51 \times 10^{10}$	
195	4,8	0,31	37,3	$5,60 \times 10^{12}$	Torção (14):
280	4,8	0,31	37,3	$0,40 \times 10^{12}$	Alumínio de alta
380	4,8	0,31	37,3	$4,80 \times 10^{12}$	pureza (composição
450	4,8	0,31	37,3	$2,82 \times 10^{12}$	não especificada)
480	4,8	0,31	37,3	$2,09 \times 10^{12}$	
550	4,8	0,31	37,3	$1,41 \times 10^{12}$	
375	3,3	0,30	39,2	$6,84 \times 10^{11}$	Extrusão
400	3,3	0,30	39,2	$7,82 \times 10^{11}$	(este trabalho)
425	3,3	0,30	39,2	$6,70 \times 10^{11}$	(Al-3,0Fe-0,42Cu-0,37Mn)

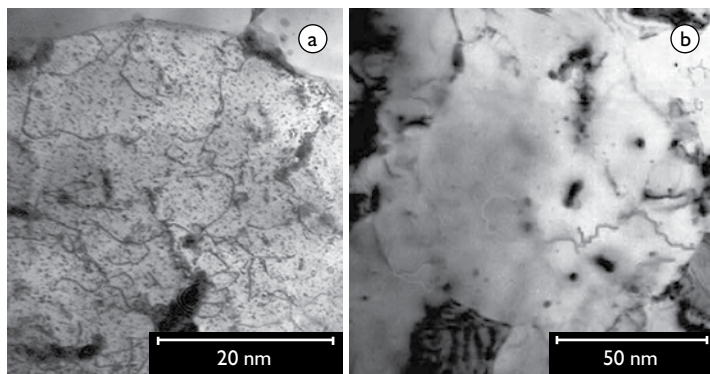


Figura 3. Micrografias eletrônicas de transmissão evidenciando as modificações na subestrutura associadas com o aumento da temperatura e a diminuição de Z: (a) 375°C; e (b) 425°C (ambas a 29,3 s⁻¹).

Pela Equação 6, o parâmetro Z é função da temperatura e da taxa de deformação no primeiro termo e função da tensão no segundo termo, em que baixas temperaturas e altas taxas de deformação promovem tensões de processamento mais elevadas e resultam em maiores valores de Z. Correlacionando Z com os comportamentos mecânico e microestrutural, comandados pela recuperação na matriz de alumínio e ocorre mais efetivamente sob temperaturas mais elevadas, resulta em valores mais baixos de Z para o material processado a 425°C e com menor densidade de discordâncias (Figura 3b) em relação a maiores valores de Z para o material processado a 375°C (Figura 3a).

A Figura 4 representa graficamente os dados da Tabela 2 e indica a compatibilidade dos dados de extrusão entre materiais convencionais e pós nanoestruturados. Esta figura diferencia-se da Figura 2a pela divisão de Z por A_3 de forma a eliminar a influência da diferença de composição entre o alumínio comercial da literatura⁽¹⁵⁾ e da liga utilizada neste trabalho. Assim, os dados experimentais de extrusão de pós nanoestruturados e de materiais cristalinos convencionais, dentro de uma larga faixa de quatro ordens de grandeza na taxa de deformação e duas ordens de grandeza em tensão, podem ser representados da mesma forma pela Equação 5 e utilizar as mesmas constantes para os dois materiais, com um pequeno espalhamento nos dados. A inclinação da reta da Figura 4 é 3,73.

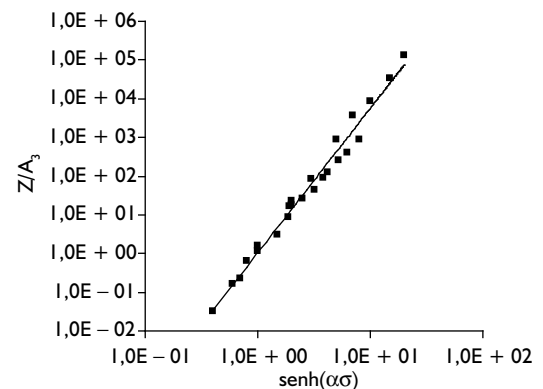


Figura 4. Gráfico $\log(Z/A_3) \times \log(\sinh \alpha\sigma)$ ilustrando a compatibilidade dos dados de extrusão a quente de pós nanoestruturados com os de materiais convencionais.

4 CONCLUSÕES

- Os dados de extrusão a quente de pós de Al-3Fe nanoestruturados são descritos com êxito a partir de equações já bem estabelecidas de fluência e usando constantes similares às dos materiais cristalinos convencionais;

- A energia de ativação de 39,2 kcal/mol para a extrusão dos pós Al-3Fe nanoestruturados obtida é similar às encontradas em extrusão e torção a quente de materiais convencionais e para a autodifusão, indicando que o mecanismo controlador do movimento e geração de discordâncias é comandado por difusão; e
- O emprego de leis de tensão para mecanismos de deformação controlados por difusão e as variações microestruturais observadas sugerem que o mecanismo controlador do movimento e geração de discordâncias

da liga de alumínio nanocristalina analisada é dominado pelo escorregamento com desvio ou ainda pela escalagem das mesmas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, ao CNPQ e ao MCT "PRONEX" pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Kropp, P. **Cold extrusion of powder mixtures with cold sprayed fat particles**. 2002. 229p. Thesis (Doctor of Technical Sciences) – Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Zürich, 2002.
- 2 Fogagnolo, J.B.; Robert, M.H.; Ruiz-Navas, E.M.; Torralba, M. Extrusion of mechanically milled composite powders. **Journal of Materials Science**, v. 37, n. 21, p. 4603-7, Nov. 2002.
- 3 Onuh, S.O.; Ekoja, M.; Adeyemi, M.B. Effects of die geometry and extrusion speed on the cold extrusion of aluminium and lead alloys. **Journal of Materials Processing and Technology**, v. 132, n. 1-3, p. 274-85, Jan. 2003.
- 4 Ma, L.; Zahrah, T.F.; Fields, R. Processing and simulation of consolidation of amorphous aluminum-based powder material. In: IMECE'03: 2003 ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS, 2003, Washinton. **Proceedings...** Washington, D.C.: ASME, 2003. p. 15-21.
- 5 Kraft, F.F.; Powers, C. Optimizing extrusion through effective experimentation and analysis. In: INTERNATIONAL ALUMINUM EXTRUSION TECHNOLOGY SEMINAR, 7., 2000, Chicago. **Proceedings...** Chicago: Aluminum Association and the Aluminum Extruders Council, 2000. v. 1, p. 43-9.
- 6 Thomsen, E.G.; Yang, C.T.; Kobayashi, S. **Mechanics of plastic deformation in metal processing**. New York: Macmillan 1965.
- 7 Castle, A.F.; Sheppard, T. Hot working theory applied to extrusion of some aluminum alloys. **Metals Technology**, v. 3, n. 10, p. 454-64, Oct. 1976.
- 8 Uvira, J.L.; Jonas, J.J. Hot compression of armco iron and silicon steel **Transactions of the Metallurgical Society of AIME**, v. 242, n. 8, p. 1619-26, Aug. 1968.
- 9 McQueen, H.J.; Jonas, J.J. Recovery and recrystallization during high temperature deformation. In: Herman, H. **Treatise on materials science and technology**. New York: Academic Press, 1975. p. 393-493.
- 10 Sherby, O.D.; Ruano, O.A. Rate-controlling processes in creep of subgrain containing aluminum materials. **Materials Science and Engineering A**, v. 410-1, p. 8-11, Nov. 2005.
- 11 Nabarro, F.R.N. Creep in commercially pure metals. **Acta Materialia**, v. 54, n. 2, p. 263-95, Jan. 2006.
- 12 Carmona, R.; Zhu, Q.; Sellars, C.M.; Beynon, J.H. Controlling mechanisms of deformation of AA5052 aluminium alloy at small strains under hot working conditions. **Materials Science and Engineering A**, v. 393, n. 1-2, p. 157-63, Feb. 2005.
- 13 Garofalo, F. An empirical relation refining the stress dependence of minimum creep rate in metals. **Transaction of the Metallurgical Society of AIME**, v. 227, n. 2, p. 351-6, Apr. 1963.
- 14 Sellars, C.M.; TEGARD, W.J.M. La relation entre la resistance et la structure dans la deformation a chaud. **Mémoires Scientifiques de la Revue Metallurgie**, v. 63, n. 9, p.731-46, 1966.
- 15 McQueen, H.J.; Wong, W.A.; Jonas, J.J. Deformation of aluminum at high temperatures and strain rates. **Canadian Journal of Physics**, v. 45, n. 2, p.1225-34, Feb. 1967.
- 16 Nemat-Nasser, S. Introduction to high strain rate testing. In: **ASM HANDBOOK: Mechanical testing and evaluation**. Metals Park : ASM, 2000. v. 8, p.939-41.

Recebido em: 6/12/07

Aceito em: 2/06/08

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 62., 2007, Vitória, ES. São Paulo: ABM, 2007.