

INVESTIGAÇÃO DA CINÉTICA DE CRESCIMENTO DE GRÃO AUSTENÍTICO DO AÇO SAE 52100

Guilherme Bugatti dos Santos¹, Júlio César Dutra²

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário FEI

² Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário FEI
 guilherme_bugatti@hotmail.com¹, jdutra@fei.edu.br²

Resumo: O presente trabalho analisou a cinética de crescimento de grão do aço hipereutetoide SAE 52100 por uma nova técnica para caracterização do tamanho de grão austenítico. Amostras austenitizadas em diferentes tempos e temperaturas foram submetidas a têmpera dentro da zona crítica para precipitação eminente de carbonetos no contorno de grão para análise da evolução do crescimento de grão pelos modelos de Beck, Burke, Hu e Rath usando o método dos mínimos quadrados e os métodos de Moravec e Persson. Os resultados mostram que a energia de ativação para o crescimento de grão estão mais próximos dos valores da energia de ativação para a difusão no contorno de grão do Cr no Fe- γ e autodifusão no contorno de grão de Fe- γ .

1. Introdução

O potencial termodinâmico para o crescimento de grão em metais ou ligas metálicas policristalinas monofásicas totalmente recristalizadas deve-se à redução na energia livre de superfície dos contornos de grão [1]. À medida que os grãos aumentam em tamanho médio, diminuem em número e, portanto, o crescimento de grão torna-se mais lento à medida que sua ocorrência toma lugar.

O diâmetro de grão D , em μm , é utilizado como parâmetro para medir o tamanho médio de grão de determinada liga e se relaciona com o tempo e a temperatura por meio da equação proposta por Beck [2]:

$$D = Kt^n \quad (1)$$

onde n é o expoente do tempo e K uma constante que depende da temperatura, em $\mu\text{m s}^{-n}$, por sua vez dada por:

$$K = K_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2)$$

onde K_0 é uma constante pré-exponencial, Q , a energia de ativação para o crescimento de grão, em J mol^{-1} , R a constante geral dos gases, $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e T a temperatura absoluta, em K . Na discussão do artigo de Beck [2], Burke [3] propôs uma equação que levasse em conta o tamanho médio de grão inicial D_0 , dada por:

$$D^2 - D_0^2 = Kt \quad (3)$$

A forma mais geral da evolução do crescimento de grão, frequentemente encontrada na literatura [4], no entanto, é dada por:

$$D^n - D_0^n = Kt \quad (4)$$

Os resultados obtidos no presente trabalho foram analisados pelos modelos de Beck [2], Burke [3], Hu e Rath [5] usando o método dos mínimos quadrados e os métodos de Moravec e Persson [4,6]. Constatou-se que o valor de n é tanto maior quanto maior a temperatura e que o maior valor obtido foi para a temperatura de $940 \text{ }^\circ\text{C}$. Os

valores da energia de ativação pelo modelo de Beck [2], Burke [3] e Hu e Rath [5] mostram que o crescimento de grão é controlado pela difusão de Cr ou de Fe no contorno de grão do Fe- γ (austenita).

2. Materiais e métodos

Amostras na forma de barras do aço SAE 52100 de aproximadamente 15 mm foram cortadas em pequenas bolachas de altura de cerca de 15 mm para os tratamentos térmicos; tais amostras foram austenitizadas a $860, 880, 900, 920$ e $940 \text{ }^\circ\text{C}$ nos tempos de $5, 25, 125$ e 625 minutos. Em seguida, elas foram mantidas em uma temperatura abaixo da linha A_{cm} para nucleação e crescimento de pequena monta de carbonetos de cromo ou de ferro por curto período de tempo, preferencialmente no contorno de grão, e finalmente temperadas em óleo.

Concluída essa etapa, as amostras foram preparadas mecanicamente e atacadas com Nital 2%, mas levemente atacadas a fim de delinear/revelar os contornos de grão da austenita. O tamanho de grão foi medido de acordo com a norma ASTM E-112 [7].

A determinação dos parâmetros mostrados nas equações anteriores foi feita pela regressão linear pelos mínimos quadrados. De posse dos valores do tamanho médio, diversos gráficos foram construídos na escala logarítmica dos tamanhos médios e respectivos erros-padrão em função do tempo, também na escala logarítmica, e o inverso da temperatura para os casos da determinação da energia de ativação.

3. Resultados

Os resultados alcançados no presente trabalho podem ser vistos na Tabela I, a seguir. Nota-se que o tamanho médio de grão é tanto maior quanto maior a temperatura e ou o tempo de tratamento. Todos os valores analisados pelos diferentes modelos usando o método dos mínimos quadrados ou os métodos de Moravec [4] e Persson [6], podem ser vistos na Tabela II.

Tabela I – Evolução do tamanho médio de grão, em milímetros, em função da temperatura e do tempo de austenitização.

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Tempo de austenitização em segundos			
	300	1500	7500	37500
860	0,00766	0,00796	0,00911	0,01039
880	0,00540	0,00717	0,00959	0,01257
900	0,00695	0,00923	0,01189	0,01505
920	0,00695	0,00892	0,01257	0,01711
940	0,01366	0,01586	0,01822	0,02428

De posse desses valores, foram feitas as análises de cinética de crescimento normal de grãos pelas abordagens citadas anteriormente. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 1.

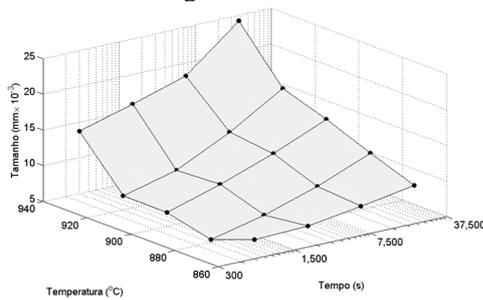


Figura 1 - Evolução do tamanho de grão em função do tempo e da temperatura para as amostras desse trabalho.

Nota-se pela Tabela II que a análise que não adota o valor de n a priori, de Hu e Rath [5], levou a um valor de energia de ativação para o crescimento de grão de 93 kJ mol^{-1} , com valores próximos da energia de ativação de autodifusão do Fe no Fe- γ (35 kJ mol^{-1}) e de difusão de Cr no contorno de grão do Fe- γ ($85,1$ a $90,6 \text{ kJ mol}^{-1}$).

Os valores de n calculados nesse trabalho foram comparados com aqueles obtidos por Hu e Rath [5] e experimentalmente por Simpson, Aust e Winegard [8]. Eles podem ser observados na Figura 2.

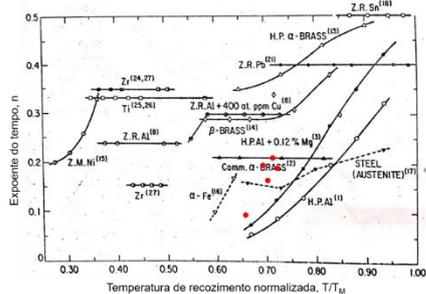


Figura 2 - Valores do expoente n em função da temperatura normalizada de recozimento T/T_M em (K K^{-1}). Os valores do atual trabalho estão em \bullet .

Tabela II - Valores obtidos da equação de crescimento de grão dos modelos analisados nesse trabalho: Beck [2], Burke [3], Hu e Rath [5], Moravec [6] e Persson [8].

Modelo	k_0 ($\text{mm}^n \text{s}^{-n}$)	Q (kJ mol^{-1})	n'	n	R^2
Beck	0,12733	35,3	-	0,06524 0,17589 0,15980 0,18930 0,11590	0,0424
Burke	0,05024	159,5	2	0,50000	0,0947
Hu e Rath	$2,37 \times 10^6$	93,0	10,430 5,592 6,296 4,924 5,572	0,095887 0,178827 0,158831 0,203087 0,179469	0,8870
Moravec	1,214	190,4	2	0,50000	0,8656
Persson	$9,08 \times 10^4$	252,0	5	0,20000	-

4. Conclusões

As seguintes conclusões podem ser depreendidas dos experimentos e medidas realizadas:

A análise para a determinação da cinética de crescimento de grão pelos modelos abordados mostraram valores de energia de ativação para autodifusão do Fe no Fe- γ e de difusão volumétrica do Cr no Fe- γ e de difusão volumétrica do Cr no Fe- γ , mas mais próximos dos valores da energia de ativação para a difusão no contorno de grão do Cr no Fe- γ e autodifusão no contorno de grão de Fe- γ .

A comparação dos valores de n obtidos no presente trabalho com aqueles apresentados por Hu e Rath [5] mostra que os valores para as temperaturas investigadas estão próximos dos obtidos experimentalmente, porém se distancia para a menor temperatura investigada, de $860 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Referências

- [1] Abbaschian, R.; Abbaschian, L.; Reed-Hill, R. E. Physical Metallurgy Principles. Publishing Company. 1992.
- [2] Beck, P. A. et al. Transactions of the American Institute for Metallurgical Engineers. v.175, (1947) p.372-400.
- [3] Burke, J.E. Transactions of the American Institute for Metallurgical Engineers, v.175, p.399-400, Out.1947.
- [4] Moravec, J. Science Journal. (2015) 649-653.
- [5] Hsun, Hu; B. B., Rath. One the Time Exponent in Isothermal Grain Growth. **Metallurgical Transactions**, Monroeville, v. 1, p.3183-3184, Nov. 1970.
- [6] Persson, E. Degree Project. Royal Institute of Technology. Stockholm. 2014.
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Methods for Determining Average Grain Size (E112), **Annual Book of ASTM Standards**. Part 11: Metallography; Nondestructive Testing, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa. p. 135-69, 1982.
- [8] Simpson, C. J.; Ayst, K.T.; Winegard, W. C. The Four Stages of Grain Growth. **Metallurgical Transactions**, Toronto, v. 2, p.987-991, abr. 1971.

Agradecimentos

Ao Centro Universitário FEI, pelo financiamento do projeto de iniciação científica PBIC 030/17 e IN-1N1R32/17 e bolsa de estudos assim como ao laboratório de materiais pelo seu pessoal e equipamentos para a execução do projeto.

¹ Aluno de Iniciação Científica do Centro Universitário FEI

² Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Universitário FEI.