

A MUDANÇA DAS CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DAS LIGAS DE FERRO COM SILÍCIO APÓS AÇÃO DE ALTAS PRESSÕES E TEMPERATURAS¹

Guerold Sergueevitch Bobrovnitchii²

Marcello Filgueira³

João José de Assis Rangel⁴

Rômulo Crespo Tardim⁵

Resumo

Os aços eletrotécnicos (ligas de ferro com silício) são amplamente aplicados na indústria em geral. A fim de se obter a diminuição da quantidade de defeitos na estrutura desse material, são aplicados processos de tecnologias variáveis, tais como compressão multiaxial, laminação em etapas e tratamento térmico. Estas operações influenciam, em um grau significativo, as propriedades magnéticas. Para avaliar a influência da alta pressão sobre essas características magnéticas neste estudo, amostras da liga foram tratadas no dispositivo de alta pressão com pressões de até 5,0 GPa, e temperaturas até 1400° C. Dentre todas as combinações de variáveis experimentadas, a maior diminuição da susceptibilidade magnética foi obtida para a liga com 16% de Si, depois da aplicação da pressão de 5,0 GPa e a temperatura de 1000° C, durante 180 s.

Palavras-chave: Alta pressão; Susceptibilidade magnética; Liga de ferro; Silício.

THE CHANGE OF MAGNETIC CHARACTERISTICS OF IRON-SILICON ALLOYS AFTER THE ACTION OF HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES

Abstract

The electrotechnical steel (iron-silicon alloys) is widely applied in the industry for general purposes. In order to reduce the amount of defects in the structure of this material, some processes are applied, such as multiaxial compression and thermal treatment. These operations have great influence also on the magnetic properties. To evaluate the influence of high pressure on these characteristics, in this study, samples of some alloys had been put into a high-pressure device with pressures up to 5,0 GPa, and temperatures until 1400° C. Among all the combinations of parameters, the most significant reduction of the magnetic susceptibility was gotten for the alloy with 16% of Si, application of 5,0 GPa of pressure and the temperature of 1000° C, for 180 s.

Key words: High pressure; Magnetic susceptibility; Iron alloy; Silicon.

¹ *Contribuição técnica ao 62° Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Professor Emérito do SMSD/LAMAV - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes, RJ – Brasil. CEP 28013-600*

³ *Professor Associado do SMSD/LAMAV - (UENF)*

⁴ *Professor Associado – Universidade Cândido Mendes, Campos dos Goytacazes, RJ – Brasil.*

⁵ *Graduando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – (UENF)*

1 INTRODUÇÃO

Os aços utilizados na indústria eletrotécnica são geralmente feitos de ligas à base de ferro e silício. As características magnéticas destas ligas são determinadas em função das condições nas quais ocorre sua cristalização, principalmente pela velocidade do processo. Com o objetivo de diminuir a quantidade dos defeitos que são responsáveis pela magnitude das propriedades magnéticas, são utilizados métodos tecnológicos variáveis: compressão volumétrica, laminação de multigrau, tratamento térmico especial. Estes procedimentos, em particular o último, determinam o nível das propriedades magnéticas.⁽¹⁾

A alta pressão e a alta temperatura, no caso em que há aplicação simultânea, como é sabido,^(2,3) provocam profundas mudanças na termodinâmica e na cinética das transformações de fase em metais e ligas.⁽²⁻⁵⁾

Durante o estudo da mudança das características magnéticas, a pressão máxima utilizada não superou 1,8-2,0 GPa e foi gerada nos chamados dispositivos de alta pressão hidrostática, sem aplicação de aquecimento.⁽⁶⁾

A técnica de altas pressões desenvolvida no século XX torna possível a aplicação de valores a partir de 2,5 GPa⁽⁵⁾ em volumes relativamente pequenos. Nesta técnica são utilizados os dispositivos de alta pressão (DAP) e alta temperatura capazes de gerar os p , T – parâmetros em meio comprimível sólido, que deve apresentar propriedades de termo e eletro resistência, e transferir a pressão para a amostra tratada de maneira semelhante a hidrostática. Isso se deve ao fato de que na realidade, qualquer tipo de DAP gera alta pressão em sua câmara de compressão, mas com gradientes de pressão e temperatura, o que pode gerar alterações durante o estudo.

No presente trabalho, pretende-se investigar a influência do tratamento pela alta pressão (até 5,0 GPa) e da alta temperatura (até 1600° C) sobre a estrutura e o valor da susceptibilidade magnética das ligas de ferro com teores de 6 até 16% de silício.

2 METODOLOGIA

Para a geração de alta pressão foi utilizado o DAP tipo bigorna com concavidade central de diâmetro 55 mm,⁽⁷⁾ que tem como meio comprimível uma capsula feita de calcita. O volume ocupado pela célula reativa possui o diâmetro de 30 mm e altura de 30 mm da cápsula deformável. Durante a aplicação da força da prensa hidráulica de 2500 toneladas dentro da câmara de compressão pode ser gerada uma pressão de até 5,0 GPa. Já para aquecimento da amostra tratada foi utilizado um aquecedor de grafite no formato de uma bucha, com o diâmetro externo de 30 mm e interno de 26 mm.

A escolha do material para o isolamento da amostra estudada se deu em função das dificuldades identificadas. Em contrapartida, materiais tradicionalmente aplicados em experimentos sob alta pressão, como calcita e nitreto hexagonal de boro (hBN), não cumprem as exigências necessárias para o isolamento. A calcita devido à infiltração significativa de grafite do aquecedor na amostra tratada. E o hBN pela sua interação com a amostra durante o aquecimento sob altas temperaturas. Os melhores resultados foram obtidos utilizando buchas e tampas compactadas de NaCl. A calibração dos valores de pressão e temperatura foi feita segundo a metodologia já aprovada.⁽⁸⁾

Durante o estudo, foi aplicado o chamado “método de têmpera sob a pressão”. Nele as amostras são submetidas a altas pressões, e depois aquecidas. A manutenção

simultânea de pressão e temperatura constantes durante algum tempo determinado, possibilitou realizar as condições necessárias para a transformação de fase. Depois desta etapa, o aquecimento foi diminuindo até 350-400° C durante 35-45 s. Para alcançar esta faixa de temperatura os DAP foram intensamente refrigerados.

As amostras tratadas sob altos p,T-parâmetros termodinâmicos foram liberadas de célula reativa e depois submetidas a estudos metalográficos, além de passar por medições da susceptibilidade magnética relativa, $\chi \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$.

A determinação da susceptibilidade magnética foi realizada através do método de Faraday,⁽⁹⁾ que é mais preciso para materiais com altos valores das características magnéticas, aplicando um campo magnético H ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$) de aproximadamente $2 \cdot 10^6$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dependência entre susceptibilidade magnética relativa e tempo de tratamento sob p, T – parâmetros para as ligas de composição 6% de Si em ferro, aplicando a pressão constante de 5,0 GPa e temperatura variável está apresentada na figura 1. Observando o comportamento das curvas para temperaturas de 1000, 1100, 1200, 1300 e 1400° C, nota-se que sob determinada temperatura, a velocidade do aumento da susceptibilidade magnética relativa no início do processo é máxima e depois de algum tempo diminui significativamente. Além disso, a velocidade inicial desta característica aumenta com o crescimento da temperatura.

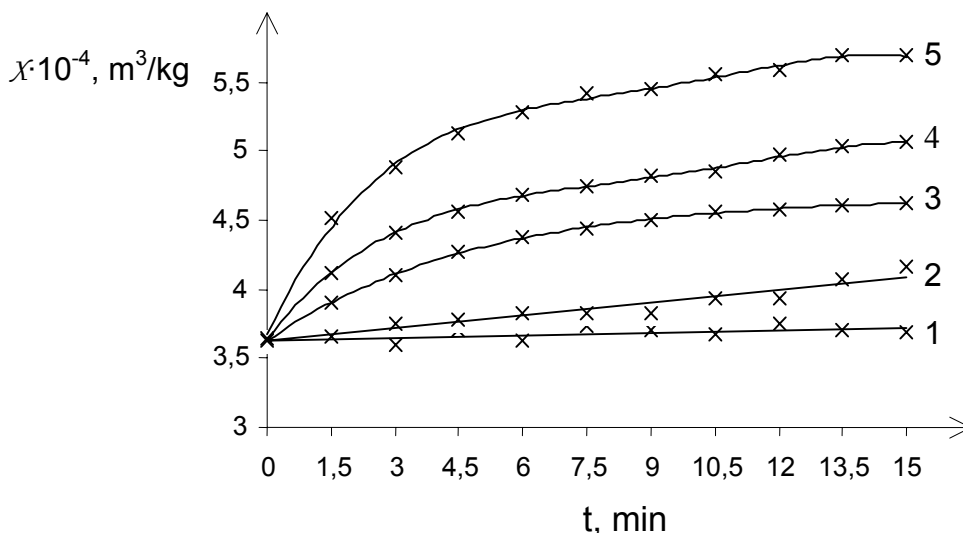


Figura 1. Dependência entre susceptibilidade magnética relativa e tempo de tratamento térmico sob alta pressão de 5,0 GPa para a liga de ferro com 6% de Si: 1 – 1000° C; 2 – 1100° C; 3 – 1200° C; 4 – 1300° C; 5 – 1400° C.

Considerando o resultado do estudo metalográfico simples, o fenômeno citado pode ser relacionado com a recristalização da liga, ou seja, com o crescimento de uns grãos em detrimento de outros, graças ao deslocamento de contornos.

Por outro lado, a comparação dos dados obtidos com outros já conhecidos,^(1, 9) mostra que a aplicação de altas pressões durante o tratamento térmico aumenta

significativamente a temperatura da recristalização e diminui a velocidade de crescimento dos grãos sob a temperatura determinada do tratamento em comparação com o tratamento térmico sem aplicação de alta pressão.^(1,10)

Interessante a determinação da dependência entre a susceptibilidade magnética da liga com teor de Si 6,11 e 16% e temperatura de tratamento da amostra sob a pressão constante de 5,0 GPa e tempo de três minutos (Figura 2). Sob as temperaturas acima de 1150° C, a susceptibilidade magnética praticamente fica constante, o que justifica o aumento da temperatura de recristalização sob ação de alta pressão (sem tratamento por altas pressões o início da recristalização começa em 900° C).^(1,10)

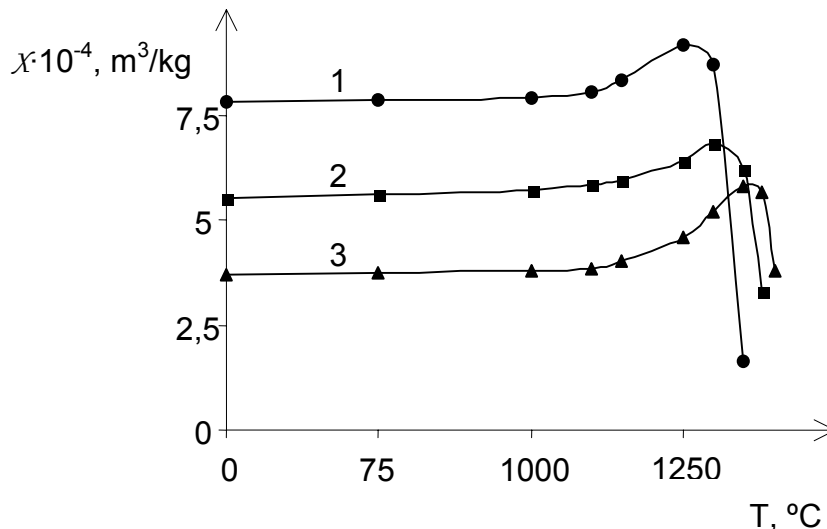


Figura 2. Dependência entre a susceptibilidade magnética relativa e temperatura de tratamento (pressão de 5,0 GPa é constante) para liga de ferro com teor de Si (massa %): 1 – 6%; 2 – 11%; 3 – 16%.

Quando a temperatura de tratamento ultrapassa 1150° C, a recristalização tem início e sua velocidade diminui com o aumento do teor de Si na liga.

A têmpera das ligas aquecidas até temperaturas próximas às de fusão sob altas pressões, ou seja, o tratamento térmico de fusão da liga sob a pressão, revela a diminuição muito significativa da susceptibilidade magnética relativa das ligas temperadas, que também é proporcional ao teor de Si na liga.

O resfriamento da amostra fundida sob alta pressão com velocidade a de 35-45° C/s leva ao aparecimento de um grande número de núcleos e cria uma estrutura composta de pequenos cristais.

Portanto, a têmpera de fusão sob alta pressão forma uma estrutura de granulação fina. O tamanho dos grãos diminui com o aumento do teor de Si na liga.

A diminuição dos valores da susceptibilidade magnética relativa para tais ligas com estrutura de granulação fina confirma inteiramente as compreensões atuais sobre a correspondência do tamanhos dos grãos e as características magnéticas de materiais ferromagnéticos.

Então, qualquer alteração da distância entre os átomos e do volume sob ação de pressão externa, temperatura, ou as duas em conjunto, acarreta em mudanças nas características magnéticas.⁽¹¹⁾

4 CONCLUSÃO

- As altas pressões, além de transformação de fases, mudam algumas características de ligas metálicas como, por exemplo, as características magnéticas da liga Fe-Si;
- Para a liga Fe-Si, a susceptibilidade magnética muda significativamente tanto com a mudança do teor de Si quanto com a temperatura de tratamento sob os mesmos valores de pressão;
- A alta pressão simplifica a formação de estruturas de granulação fina, diminuindo assim a susceptibilidade magnética relativa;
- Tendo em vista as particularidades obtidas em relação às propriedades magnéticas dos materiais tratados, durante a elaboração de qualquer tecnologia de tratamento por altas pressões é necessário levar em conta as variáveis que encontram-se durante a geração de altas pressões na câmara de compressão do dispositivo. Por exemplo, a distribuição não uniforme da temperatura no volume da câmara.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPERJ e CNPq pelo apoio financeiro para desenvolver estas pesquisas.

REFERÊNCIAS

- 1 MICHIN, D. D. Materiais magnéticos. Ed. Escola Superior, Moscou, p. 335, 1981.
- 2 SWENSON, C. A. Physics of High Pressure. v. 2. Solid state physics. Ed. Academic Press, n. 9, London, 1960.
- 3 BRIDGMAN, P. W. The physics of high pressure. London, p.432, 1949.
- 4 BLOCH, D. Solids under pressure. In: HIGH PRESSURE CHEMICAL PROCESS. NATO adv. Study Institute. Corfu, 1977. Dordrech e. a., 1978.
- 5 HAMANN, S. D. The physico-chemical effects of high pressure. NJ, 1957.
- 6 High pressure technology, v. 1 e v. 2. Ed. by Ian L. Spain e Jac Paauwe, 1977.
- 7 PRIKHNA, A. I.; BORIMSKY, A. I.; NAGORNY, P. A. Patente 5087 da Ucrânia. Dispositivo para geração de alta pressão e alta temperatura. Pub. 28.12.94, bul. nº 7.
- 8 BOBROVNITCHII, G. S.; VIANNA, W. S. Metodologia para medição de temperatura nos dispositivos de alta pressão com grande volume, usados na síntese dos diamantes. In: 60º Congresso anual da ABM, Belo Horizonte. In: ANAIS. v. 1, p. 3078-3087, 2005.
- 9 SAMSONOV, G. V.; DVORINA, L. A.; RUD, B. M. Silicides. Ed. Metallurgia, Moscou, p. 272, 1979.
- 10 PREOBRAJENSKY, E. B. Materiais magnéticos e elementos. Ed. Escola Superior, Moscou, p. 336, 1976.
- 11 BEAN, C. P.; RODBELL, D. S. Magnetic disorder as a first-order phase transformation. Physical Review, nº 1, v. 126, p. 104-115, 1962.