



ANAIS
4º. Congresso Brasileiro
de Engenharia e
Ciência dos Materiais



Deptº. de Engenharia Mecânica - UFSC
Dezembro de 1980

Trabalho/Paper Nº... A-20... PP... 203-212..

Patrocínio

ABCM - ABM - CNEN - CNPq. - SESU/MEC - UFSC

INFLUÊNCIA DA IRRADIAÇÃO NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE METAIS E LIGAS

Valdir Sciani

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- São Paulo

Georgi Lucki

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- São Paulo

SUMÁRIO - Neste trabalho, concentra-se a atenção nos efeitos da irradiação neutrônica nas propriedades magnéticas de metais e ligas metálicas: anisotropia magnética, ciclo de histerese, permeabilidade magnética inicial, propriedades estas sensíveis à mudanças estruturais. Na primeira parte do trabalho é feita uma breve revisão, seguida por resultados experimentais e o levantamento da curva de supersaturação de lacunas, obtidos no reator do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

SUMMARY - In this work we are interested in the effects of neutron irradiation on the magnetic properties of metals and alloys, namely magnetic anisotropy, hysteresis loop, initial magnetic permeability, which are sensitives to structural changes. First a short review is made, followed by experimental results and the plot of the vacancies supersaturation, which are obtained in the reactor of the Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

1. Introdução

O estudo de metais e ligas é de primordial importância tanto para a tecnologia em geral, como para a tecnologia nuclear em particular, visto sua grande aplicação em qualquer instalação industrial.

Em instalações nucleares, além do material estar sujeito a condições tais como ambientes corrosivos, esforço mecânico, etc., que tendem a diminuir a vida útil do material, tem-se uma condição adicional: os componentes de reatores estão expostos a fluências altas de partículas energéticas, que causam mudanças em suas estruturas atômicas. Estas mudanças podem influenciar propriedades macroscópicas tais como a ductilidade e a estabilidade dimensional, que são aspectos muito importantes dos materiais em relação a sua aplicação prática⁽¹⁾,

A colisão de nêutrons rápidos com a rede cristalina produz um grande número de pares lacuna-intersticial, responsáveis por vários fenômenos de danos de irradiação, incluindo a formação de cavidades^(2,3,4). A formação de cavidades resulta em um inchaço, bem como em mudanças nas propriedades físicas do material. A descoberta deste fenômeno foi feita por Cawthorne e Fulton⁽⁵⁾, que demonstraram haver inchaço, em aços inoxidáveis, devido à formação de pequenas cavidades dentro dos grãos do material. Pesquisas posteriores mostraram que as cavidades formam-se em aços inoxidáveis somente em temperaturas entre 350 e 600°C aproximadamente, e que todos os metais sofrem o fenômeno do inchaço entre 0,3 a 0,55 da temperatura absoluta de fusão. A intensidade do inchaço depende também da fluência: parece haver um período de incubação, até uma fluência de aproximadamente 10^{22} nêutrons/cm², no qual não ocorre nenhum inchaço observável. Bombardeamentos com íons de alta energia mostraram que o inchaço nos aços inoxidáveis satura em fluências da ordem de 10^{24} nêutrons/cm²⁽⁴⁾,

Neste trabalho, o interesse está voltado ao estudo da influência da irradiação nas propriedades magnéticas de metais e ligas metálicas, no intervalo de fluência de incubação de cavidades. A ênfase é dada à irradiação com nêutrons, sendo analisados resultados experimentais que simulam as condições de irradiação de um reator de potência: alta temperatura e atmosfera controlada.

2. Propriedades Magnéticas (6,7,8,9,10)

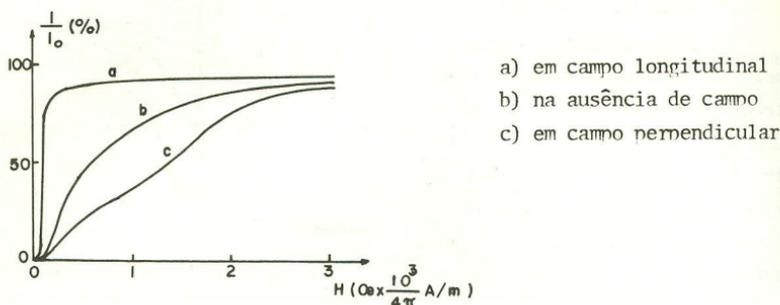


Fig. 3 Curvas de primeira imantação para o Permalloy resfriado de 600°C⁽¹²⁾

C e N no Fe⁽¹⁴⁾. A teoria é válida para todos os defeitos anisotrópicos, susceptíveis de se orientarem em relação à imantação espontânea da rede cristalina^(6,12,15,16,17). O EMP é caracterizado por um decréscimo da permeabilidade inicial com o tempo, medido logo após a uma desimantação, em um campo ac fraco e a uma temperatura constante, conforme fig. 4.

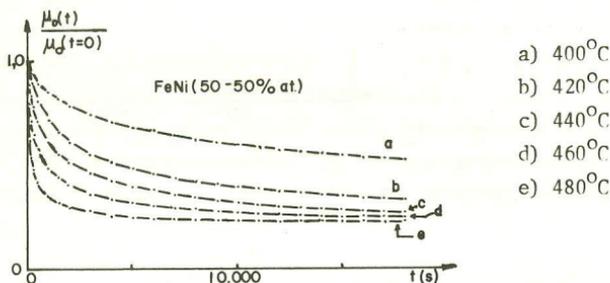


Fig. 4 Curvas de desacomodação da permeabilidade inicial⁽¹¹⁾

3. Efeito da Irradiação nas Propriedades Magnéticas

As propriedades magnéticas mais sensíveis à irradiação são a permeabilidade inicial, força coercitiva e indução remanente, que são propriedades sensíveis a estrutura. Os materiais magnéticos "moles" (alta permeabilidade e baixa força coercitiva) são mais afetados pela irradiação que os materiais magnéticos "duros" (baixa permeabilidade e grande força coercitiva)⁽¹²⁾. As seguintes informações podem ser obtidas a partir das propriedades magnéticas ora citadas:

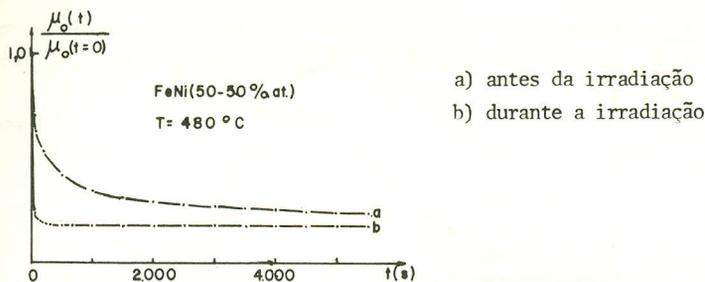


Fig. 5 Aceleração da difusão induzida por nêutrons rápidos⁽¹¹⁾

a) a figura 5 mostra duas curvas de desacomodação da permeabilidade inicial respectivamente antes e durante a irradiação para a liga FeNi. Nota-se que a irradiação acelera o processo de desacomodação da permeabilidade. Este fato possibilita o estudo de processos que envolvem tempos de relaxação enormes, quando ativados termicamente. Como um exemplo, pode-se citar a determinação da temperatura crítica de transição ordem-desordem em ligas FeNi e NiCr^(18,19), no caroço do reator IEA-R1. O experimento, que levou algumas dezenas de horas durante a irradiação, levaria alguns anos para ser realizado sem irradiação.

b) a irradiação provoca quadratização na curva de histerese, mostrando a presença de ordem direcional, conforme figuras 6 e 7.

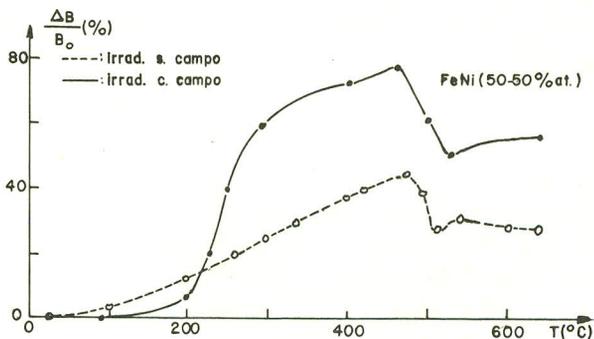


Fig. 6 Variação relativa da indução magnética em função da temperatura⁽²⁰⁾

Outros estudos efetuados em FeNi⁽¹⁷⁾ concluem que a irradiação com nêutrons rápidos acelera o processo de ordenação: em amostras irradiadas

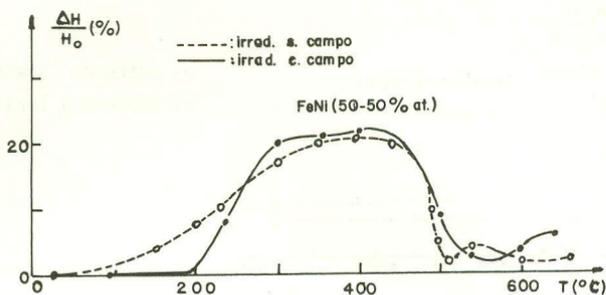


Fig. 7 Variação relativa do campo coercitivo em função da temperatura⁽²⁰⁾

das foi observada a ordem direcional, após tratamentos térmicos, desde a temperatura de 50°C. Neste caso, a ordenação se dá pela migração dos átomos da liga, facilitada pela presença dos vários defeitos introduzidos pela irradiação.

c) pode-se também verificar o efeito da adição de impurezas em metais e ligas. Em estudos realizados com ligas de FeNi contendo impurezas de Si e Mo, concluiu-se que as variações de B_r , H_c e μ_0 em ligas contendo Si e Mo foram menores que as da liga FeNi pura, dando uma clara indicação de que as impurezas atenuam a difusão e a ordem direcional⁽²⁰⁾. Pode-se notar ainda, através de medidas da Temperatura de Curie, que as impurezas diminuem o caráter ferromagnético da liga⁽²⁰⁾, conforme podemos ver na tabela abaixo:

Liga	T_c (°C)	Autor
FeNi (50-50 %at.)	505	11
FeNiCr (49,95-49,95-0,1 %at.)	500	11
FeNiCr (49,75-49,75-0,5 %at.)	483	11
FeNiMo (49-49-2 %at.)	421	20
FeNiMo (48-48-4 %at.)	349	20
FeNiSi (49-49-2 %at.)	454	20
FeNiSi (48-48-4 %at.)	400	20

d) identificação dos estágios de difusão, bem como identificação dos defeitos correspondentes. Em medidas de EMP em temperaturas acima de 25°C em amostras irradiadas, foi possível a identificação dos estágios III, IV e V⁽²⁰⁾.

e) através de recozimentos isotérmicos (EMP) é possível a determinação

de parâmetros como constantes de tempo das curvas de desacomodação e energias de ativação do processo correspondente, conforme figura 8.

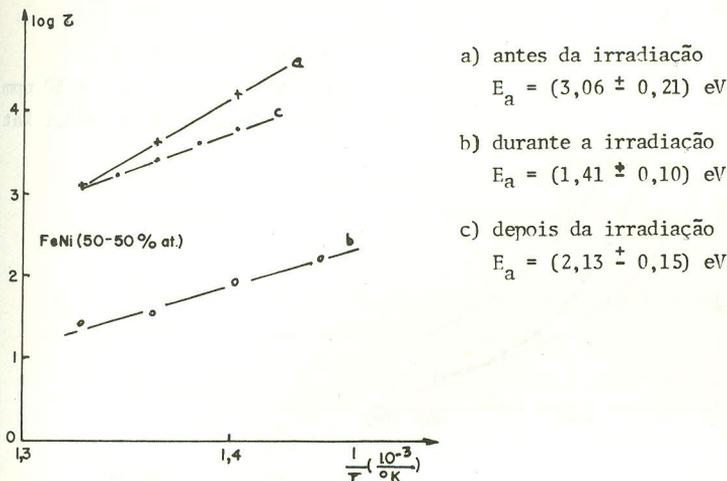


Fig. 8 Logaritmo das constantes de tempo médias em função de $1/T$ (11)

Vê-se, que as energias de ativação para processos termicamente ativados (antes da irradiação) são maiores que as energias de ativação para processos durante a irradiação. Muitos fatores podem influir para que isto ocorra, mas deve-se ter em mente que, em um processo termicamente ativado deve-se ter as contribuições das energias de formação e migração, e que durante a irradiação os defeitos são formados pela interação da radiação com a rede cristalina, sendo predominante a energia de migração do defeito. Com isto, é razoável que a energia de ativação, para o processo correspondente a depois da irradiação, estar compreendida entre as correspondentes a antes e durante a irradiação.

f) supondo a concentração de lacunas inversamente proporcional à constante de tempo, é possível avaliar quantitativamente a supersaturação de lacunas, como o quociente entre as concentrações de lacunas durante e antes da irradiação. A supersaturação de lacunas é uma condição necessária para a formação de cavidades. Um exemplo é mostrado na figura 9.

O decréscimo acentuado nos valores da supersaturação com o aumento da temperatura pode ser explicado pelo fato de que a concentração de la

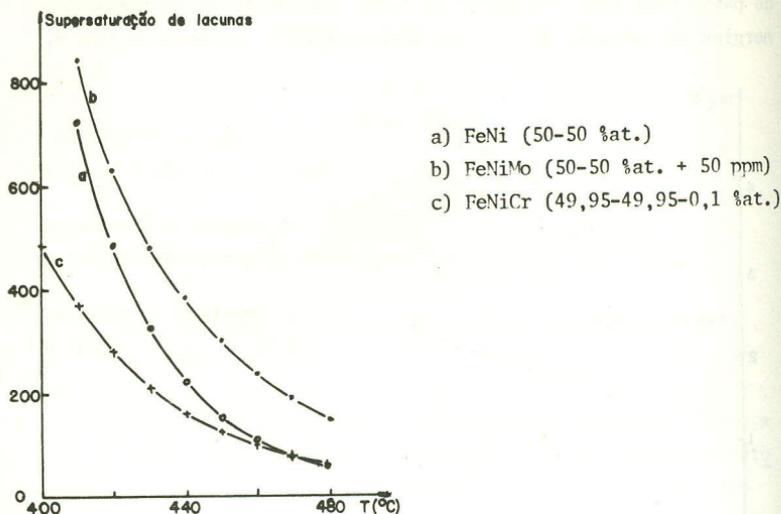


Fig. 9 Curvas da supersaturação de lacunas em função da temperatura⁽¹¹⁾

curvas térmicas tende aos valores da concentração de lacunas induzidas pela irradiação, comportamento este normal, pois os recozimentos em altas temperaturas (estágio V) são procedimentos usuais para aniquilar defeitos induzidos pela irradiação, incluindo a destruição de cavidades e outros tipos de aglomerados. A curva de supersaturação possui um caráter tecnológico muito importante: ela serve como método de seleção de materiais para ambientes nucleares. Na figura 9, pode-se ver que a introdução de uma pequena quantidade de Cr (0,1 %at.) na liga FeNi, melhora as características do material, quando este for utilizado em ambientes de reatores de potência.

Novos métodos e novos materiais estão sendo estudados, no sentido de se obter cada vez mais informações da influência da irradiação nas propriedades magnéticas, visando contribuir para o desenvolvimento de ligas mais resistentes à irradiação.

Bibliografia

(1) Ullmaier, H., e Schilling, W., Radiation Damage in Metallic

Reactor Materials. Série de seminários apresentados no IPEN, 1979, pelo Dr. H. Ullmaier

- (2) Norris, D.I.R., Voids in irradiated metals (part I). Rad. Effects, vol. 14, pp. 1-37, 1972
- (3) Norris, D.I.R., Voids in irradiated metals (part II), Rad. Effects, vol. 15, pp. 1.22, 1972
- (4) Olander, D.R., Fundamental aspects of nuclear fuel elements. Springfield, Virginia. Technical Information Center - ERDA, 1976
- (5) Cawthorne, C., e Fulton, E., The nature of small defects clusters. Nature, vol. 16, p. 576, 1967
- (6) Chicazumi, S., Physics of Magnetism. John Wiley & Sons. 1964
- (7) Michel, A., Phénomènes magnétiques e structure. Mason et Cie, Etudiers, Paris, 1966
- (8) Bozorth, R.M., Ferromagnetism. D.van Nostrand Company-1964
- (9) Kittel, C., Introduction to solid state physics, John Wiley & Sons, Inc., 1971
- (10) Herpin, A., Théorie du magnetism. Presses Universitaires de France, Paris, 1968
- (11) Sciani, V., Estudos de danos de irradiação na liga FeNi pura e com impurezas, por meio de medidas magnéticas. São Paulo, 1978. (Dissertação de Mestrado)
- (12) Pautreppe, D., Radiation Effects in Magnetic Materials, Gordon & Breach, 1968
- (13) Néel, L., Anisotropie magnétique superficielle et surstructure d'orientation. J. Phys. Rad., vol. 15, pp. 225-239, 1954
- (14) Néel, L., Théorie du trainage magnétique de diffusion. J. Phys. Rad., vol. 13, pp. 249-264, 1952
- (15) Brissonneau, P., Contribution a L'etude quantitative du

trainage magnetique de diffusion du carbone dans le fer. J. Phys. Chem. Sol., vol. 7, pp. 22-51, 1958

- (16) Moser, P., Étude au moyen du trainage magnétique de diffusion de défauts par irradiation dans le fer. Grenoble - França, 1965. (Tese de Doutorado)
- (17) Ferreira, I., Efeito Magnético posterior na liga FeNi pura e dopada, sob irradiação neutrônica. São Paulo, 1974. (Dissertação de Mestrado)
- (18) Sordi, L., Estudo da transição ordem-desordem em ligas FeNi com impurezas. São Paulo, 1969. (Dissertação de Mestrado)
- (19) Otero, M.P., Estudo e Caracterização das ligas FeNi e NiCr(80-20)% em peso, durante e após irradiação neutrônica pelo método de resistividade. São Paulo, 1978. (Dissertação de Mestrado)
- (20) Lucki, G., Influência da irradiação com nêutrons rápidos sobre as propriedades magnéticas da liga FeNi pura e com impurezas de Si e Mo. São Paulo, 1971. (Tese de Doutorado).