

EFEITO DA ATMOSFERA DO RECOZIMENTO DE ALÍVIO DE TENSÕES SOBRE A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE AÇOS SILICIOSOS DE GRÃO NÃO ORIENTADO TOTALMENTE PROCESSADOS⁽¹⁾

Sebastião da Costa Paolinelli⁽²⁾

Resumo

Amostras de aço silício de grão não orientado sem revestimento, com teores de silício e alumínio variados foram submetidas a tratamentos de alívio de tensões com temperatura e atmosfera variadas para avaliar seus efeitos sobre microestrutura e propriedades magnéticas. Foi encontrado que o potencial alcançável de propriedades magnéticas pode ser alterado em função da atmosfera de recozimento e que perda magnética adequada é difícil de se conseguir em determinadas atmosferas em aços com maior teor de Si e Al. Sob determinadas atmosferas, o ganho que se teria com a alívio de tensões pode ser suprimido e há risco de obtenção de piores resultados que no material após corte. A degradação microestrutural pela oxidação e nitretação é apontada como responsável pela obtenção de maus resultados magnéticos.

Palavras-chave: Alívio de tensões; Oxidação; Nitretação; Propriedades magnéticas.

⁽¹⁾ 60º Congresso Anual da ABM - Belo Horizonte - Julho de 2005

⁽²⁾ Pesquisador - Centro de Pesquisa, Acesita S/A

1 INTRODUÇÃO

Aços silício de grão não orientado (GNO) produzidos na forma totalmente processada apresentam estrutura e composição química completamente desenvolvidas, o que dispensaria o tratamento posterior das lâminas no processo de obtenção dos núcleos pelo fabricante de máquinas elétricas. Entretanto, durante sua manufatura ocorre a introdução de tensões e deformações, principalmente quando do corte das lâminas, as quais degradam as propriedades magnéticas num nível que pode inviabilizar o alcance de rendimento e desempenho desejado das máquinas as quais estes núcleos fazem parte. Portanto, mesmo lidando com aços GNO totalmente processados, alguns fabricantes de maquinaria elétrica incluíram um tratamento de alívio de tensões dos estampos com objetivo de restaurar, homogeneizar ou mesmo melhorar suas propriedades eletromagnéticas. O benefício deste tratamento, apesar de agregar custos, tem sido reconhecido por estes usuários devido à melhoria de desempenho e aumento da competitividade promovidos nos seus produtos.

O tratamento de alívio de tensões tem objetivos bastante simples de relaxar as tensões e promover a recristalização das partes muito deformadas pelo corte, entretanto, constitui-se uma operação bastante crítica, a qual envolve extremo controle das variáveis do ciclo térmico e atmosfera, para que o potencial eletromagnético do aço seja atingido. Falta de controle destas variáveis poderia conduzir a resultados magnéticos ruins, até mesmo piores que os apresentados pelo material tensionado e deformado.

Tanto no recozimento final no produtor quanto no tratamento de alívio de tensões no usuário, oxidação e nitretação tem sido apontadas como as principais causas de degradação microestrutural que levam a maus resultados de propriedades magnéticas. O nível destes sofre influência da própria composição química do aço e de variáveis dos tratamentos como ciclo térmico, atmosfera, etc. Para avaliar o efeito destes dois fenômenos foi realizado um trabalho submetendo tiras de aços comerciais a recozimentos de alívio de tensões em temperaturas e condições de atmosfera variadas objetivando variar os níveis de oxidação e nitretação e verificar seus efeitos sobre as propriedades magnéticas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A temperatura é a variável determinante para o processo de alívio de tensões. O relaxamento das tensões elásticas é alcançado quando a temperatura atinge valores que levam o limite de escoamento do material a valores inferiores aos das tensões residuais elásticas e/ou promovem fluência do material ⁽¹⁾, além de ser suficiente para recristalizar a área de corte, cuja deformação ultrapassou a crítica.

O nível de restauração das propriedades magnéticas, ou seja, a diminuição da perda e o acréscimo da permeabilidade magnética, depende da temperatura de tratamento. O nível de restauração cresce com a temperatura mas, grande parte do trabalho de restauração das propriedades já ocorre em temperaturas mais baixas ⁽²⁾.

De uma maneira geral pode-se dizer que a quantidade absoluta de restauração é também uma função do nível de degradação magnética promovido pela introdução de tensões e deformações durante a manufatura dos estampos. Condições de corte mais severas, dimensões menores e geometrias mais complicadas que levam a uma grande razão área afetada/área total (ou volume afetado/volume total) degradarão

mais as propriedades com possibilidade de maiores percentuais de restauração destas quando comparados com os percentuais de restauração numa geometria simples como a do corpo de prova Epstein^{(3),(4)}.

O tempo de tratamento é também uma variável importante. Existe um tempo mínimo no qual as tensões podem ser relaxadas seja pelo abaixamento da tensão de escoamento, seja por fluência, além do tempo necessário para a recristalização das áreas de grande encruamento. Quanto maior o tempo de permanência sob uma dada temperatura maior a segurança de que o trabalho de alívio de tensões seja realizado⁽¹⁾.

A escolha do ciclo térmico para um determinado material pode ser feita através da experimentação que deve levar em conta primeiramente o objetivo a ser alcançado com respeito aos valores das propriedades e então, o tipo de forno, a geometria dos estampos, tamanho dos núcleos, distribuição da carga no forno, tipo de material (composição química, espessura e revestimento), etc.

Na prática os valores de tempo e temperatura de tratamento devem ser os estritamente necessários para se alcançarem os objetivos magnéticos. Quando além do necessário representam desperdício de energia, queda de produtividade além do aumento do risco de degradação do revestimento e microestrutura das lâminas levando a degradação magnética.

Aços GNO totalmente processados apresentam teor de carbono abaixo de 30ppm, portanto, durante seu tratamento não é necessária a presença de umidade na atmosfera para promover sua descarbonetação. No entanto, por dificuldades operacionais ou mesmo por aproveitamento de fornos e condições utilizadas para tratamento de outros tipos de aço que requerem sua presença, usuários realizam o tratamento de alívio de tensões numa atmosfera contendo umidade. Umidade presente na atmosfera leva a ocorrência de oxidação interna, a qual ocorre em aços contendo elementos de liga com maior afinidade pelo oxigênio que o ferro como o silício, alumínio e manganês. A morfologia e espessura da subcamada oxidada dependem da concentração do soluto, potencial de oxidação da atmosfera do forno, tempo e temperatura de tratamento. Quanto maior o tempo e a pressão parcial de oxigênio maior a espessura da camada oxidada e maiores os danos nas propriedades. Quanto maiores os teores de Si e Al maior a propensão a oxidar e mais crítico o tratamento^{(5), (6), (7)}.

A nitretação é caracterizada pelo aumento da quantidade de nitrogênio do material cedido pela atmosfera de tratamento contendo este gás, formando uma camada subsuperficial de precipitados de nitretos de um soluto, principalmente, alumínio. Sua espessura e morfologia dependem da temperatura, tempo, pressão parcial de N₂ e características físicas e químicas do material. Quanto maior o acréscimo de nitrogênio provocado pelo tratamento maior a espessura da camada de precipitados de nitretos e maior a degradação magnética⁽⁸⁾.

Quanto maior a temperatura, tempo e pressão parcial de N₂ maior a espessura da camada de precipitados de nitretos. Quanto maior o teor de alumínio presente no material maior o nível de nitretação do material⁽⁹⁾.

A presença de deformação e condições superficiais podem influenciar de maneira marcante a quantidade de nitretação de um material. A presença de deformação torna o material com “revestimento C-0” (camada de óxido) mais propenso a nitretação. A remoção do “C-0” por risco ou decapagem provoca um acréscimo no teor de nitrogênio em relação ao material com “C-0” “in natura”, mostrando que a uma camada de óxido tem algum efeito protetor. O revestimento AISI C-4 mostrou-se o mais protetivo resultando num acréscimo nulo até 850°C num aço 2,0% Si⁽¹⁰⁾.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para simulação do tratamento de alívio de tensões, amostras de dois aços comerciais, de composições químicas mostradas na Tabela 1, na espessura 0,50mm, sem revestimento (condição "C-0") foram recolhidas após recozimento final, cortadas no formato de corpos de prova Epstein 10L,10T e tratadas num forno elétrico estático em temperaturas de 600 a 900°C sob quatro condições de atmosfera: 100% N₂ com ponto de orvalho -10°C (atm.1) e +15°C (atm.2) e 90%N₂-10%H₂ com ponto de orvalho -10°C (atm.3) e +15°C (atm.4). Para cada conjunto Epstein foram determinadas propriedades magnéticas, realizadas análises metalográficas, análises de oxigênio e nitrogênio, após corte e após cada ciclo de tratamento para avaliar os efeitos dos níveis de oxidação e nitretação provocados na microestrutura.

Tabela 1. Composição química dos aços utilizados no recozimento final e alívio de tensões.

Aço	%Si	%Al	%N	%O
A	1,95	0,27	0,0031	0,0151
B	2,76	0,44	0,0048	0,0231

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de propriedades magnéticas alcançados por cada tipo de aço em cada ciclo serão apresentados aqui referenciados a cada resultado antes do tratamento de alívio de tensões (após corte). Estes resultados após corte são apresentados como uma reta correspondente aos valores médios das propriedades de cada conjunto Epstein correspondente a cada temperatura para facilitar a análise. Isto é razoável pois a oscilação em torno desta média foi muito pequena. Da mesma forma foi feito para os valores de nitrogênio e oxigênio.

No tratamento de alívio de tensões ocorre a eliminação das tensões residuais e deformações provocadas pelo corte com conseqüente restauração das propriedades magnéticas, ou seja, a perda magnética diminui e a permeabilidade aumenta. À medida que a temperatura aumenta o tratamento é mais efetivo e maior a restauração das propriedades. Isto pode ser visto na Figura 1(a) que mostra uma queda nos valores de perda magnética a 1,0T/60Hz para a liga A com a temperatura nas quatro atmosferas de tratamento. Além da queda na perda ocorre uma diferenciação de resultados obtidos de acordo com a atmosfera utilizada, principalmente em temperaturas mais altas. A menor restauração, ou a menor redução na perda magnética é alcançada com 100% N₂ e ponto de orvalho +15°C (atm.2). A diferenciação dos efeitos da atmosfera fica mais clara para a liga B, como mostrado na Figura 1(b). O efeito da atmosfera atm.2 é mais danoso sobre esta liga e, a partir de 750°C, sob esta, ocorre um acréscimo na perda magnética em relação ao material cortado.

Quando se considera a condição 1,5T/60Hz estes efeitos são ainda mais pronunciados, como pode ser visto nas Figuras 2 (a) e (b) para os aços A e B, respectivamente. Na atmosfera atm.2, mesmo o aço A com menos liga, tem seus valores de perda magnética aumentados a partir de 750°C. No caso da liga B isto também ocorre além dos ganhos serem reduzidos e ocorrer piora de resultados em

outras atmosferas em temperaturas mais altas, onde o alívio de tensões deveria ser mais efetivo e proporcionar melhores resultados.

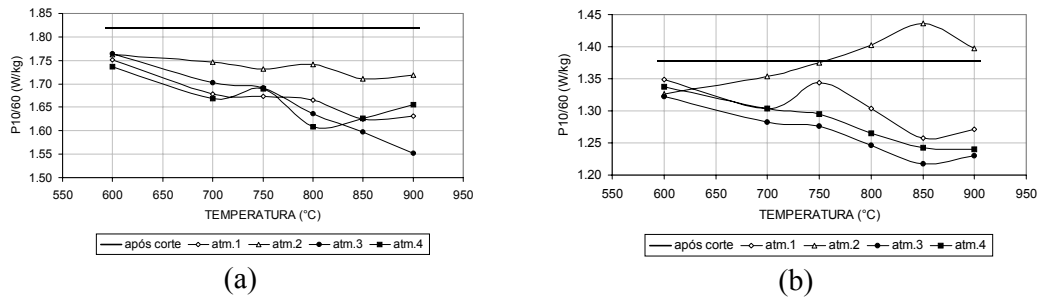


Figura 1. Efeito da atmosfera sobre a perda magnética a 1,0T/60Hz em cada temperatura de tratamento. (a) Liga A; (b) Liga B.

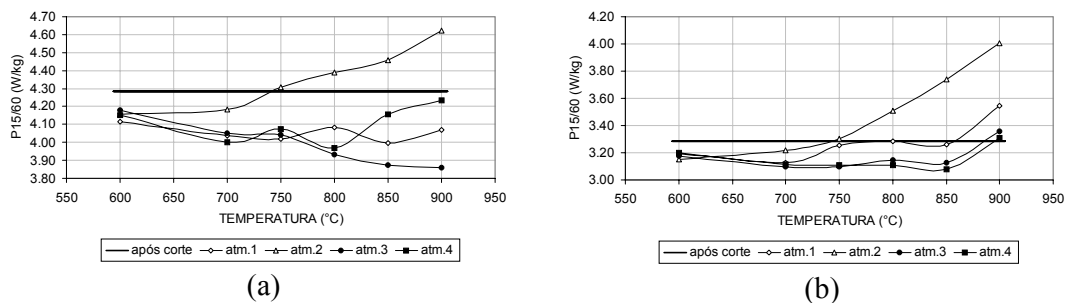


Figura 2. Efeito da atmosfera sobre a perda magnética a 1,5T/60Hz em cada temperatura de tratamento. (a) Liga A; (b) Liga B.

A restauração da permeabilidade também é afetada pela atmosfera conforme evidencia a Figura 3 (a) e (b); na indução mais alta os efeitos da atmosfera são maiores.

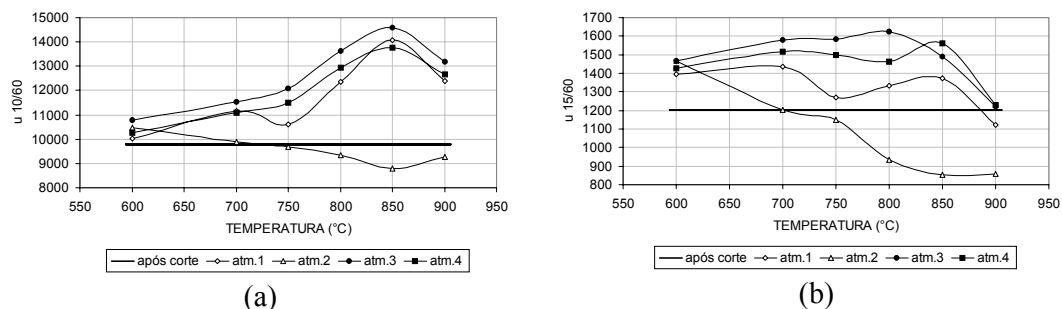


Figura 3. Efeito da atmosfera sobre a permeabilidade magnética a 1,0T/60Hz (a) e a 1,5T/60Hz (b) da Liga A em cada temperatura de tratamento.

Esta interferência negativa da atmosfera sobre os resultados do tratamento de alívio de tensões e a diferente resposta de cada tipo de aço podem ser explicadas pela degradação microestrutural da camada superficial e subsuperficial devido à oxidação e nitretação provocadas em cada atmosfera de tratamento. À medida que a temperatura aumenta o nível de oxidação aumenta e quanto maior o ponto de orvalho e menor %H₂ (maior a razão p_{H₂O}/p_{H₂}) maiores os teores de oxigênio alcançados. Ainda quanto maiores os teores de silício e alumínio da liga, principalmente sob a atmosfera atm.2, maior a propensão a oxidar dos aços. Isto

pode ser confirmado nas Figuras 4 (a) e (b), que mostram, respectivamente, para as ligas A e B, a evolução do teor de oxigênio com a temperatura para cada atmosfera. A figura 5 mostra exemplos da morfologia da oxidação provocada.

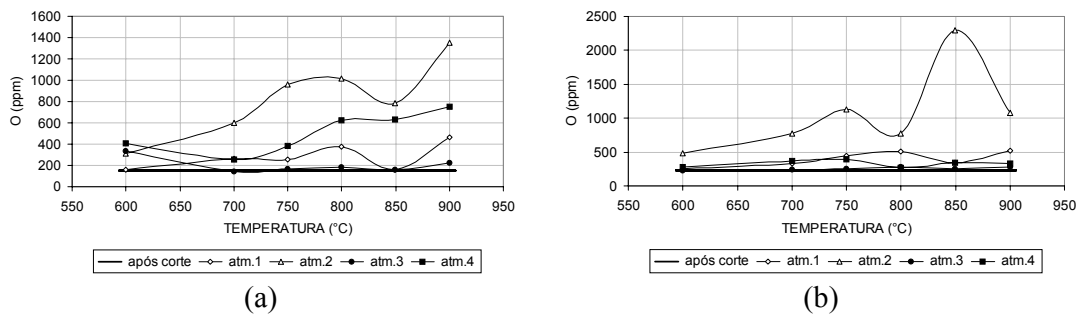


Figura 4. Teor de oxigênio após corte e após tratamento em função da temperatura para cada atmosfera. (a) Liga A; (b) Liga B.

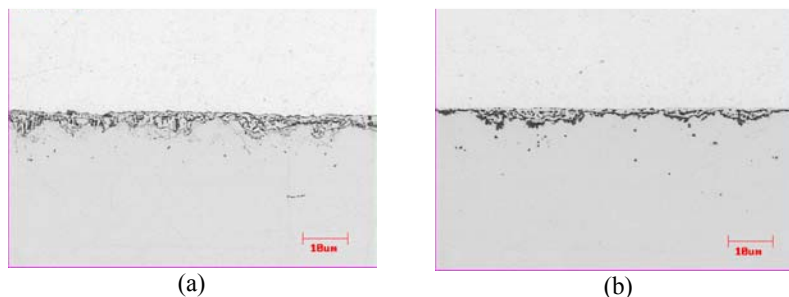


Figura 5. Micrografias evidenciando a camada oxidada (a) Liga A; (b) Liga B.

A nitretação ocorre devido à presença de nitrogênio na atmosfera e está ligada ao teor de alumínio contido na liga, formando precipitados de nitreto de alumínio (AlN). Quanto maior o teor de alumínio maior a propensão a nitretar. Isto pode ser confirmado nas Figuras 6 (a) e (b), para as ligas A e B com 0,27%, e 0,44% de alumínio, respectivamente, que mostram a evolução do teor de nitrogênio com a temperatura para as quatro atmosferas utilizadas. À medida que a temperatura aumenta, ocorre um acréscimo no teor de nitrogênio para as duas ligas, no entanto, esta nitretação começa a ocorrer somente a partir de 750°C, um pouco diferente da oxidação que já ocorre em temperaturas mais baixas. De uma maneira geral quando o teor de nitrogênio da atmosfera aumenta ocorre uma maior nitretação. A degradação microestrutural correspondente pode ser vista nas Figuras 7 (a) e (b). Ocorre a formação de precipitados de nitreto de alumínio que alcançam profundidades bem grandes. O aumento da temperatura provoca maior nitretação e, por conseguinte, maior profundidade da camada. Estes precipitados como a oxidação interferem no processo de magnetização de uma maneira muito negativa aumentando a perda e reduzindo a permeabilidade. O somatório da influência negativa da oxidação e nitretação chega a reduzir ou mesmo suplantando o benefício do tratamento de alívio causando acréscimo na perda e diminuição da permeabilidade magnética em determinadas temperaturas e atmosferas e o material fica com qualidade magnética pior que na condição cortada, mesmo após o tratamento de alívio de tensões.

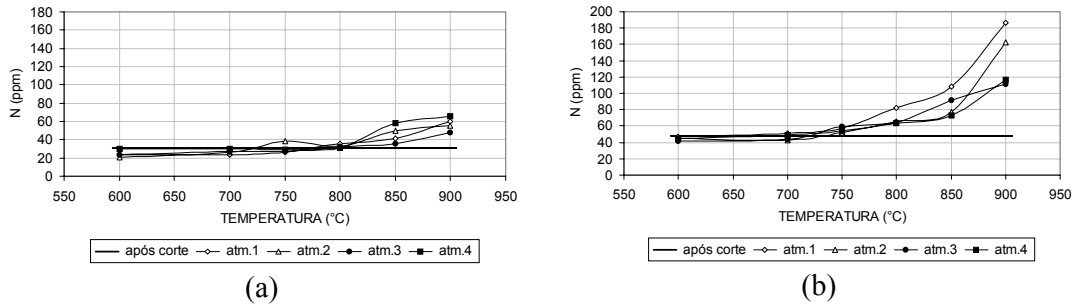


Figura 6. Teor de nitrogênio após corte e após tratamento em função da temperatura para cada atmosfera. (a) Liga A; (b) Liga B.

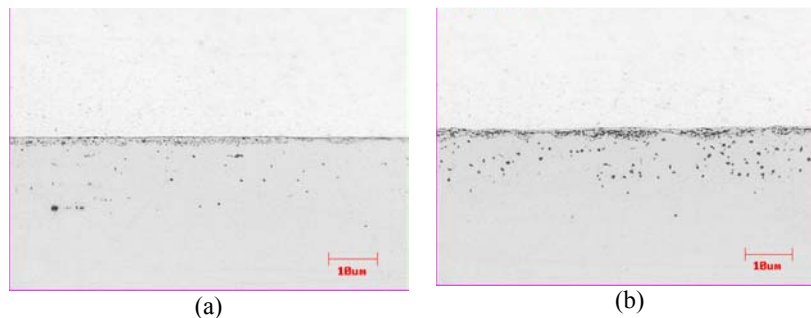


Figura 7. Micrografias evidenciando a camada nitretada (a) Liga A; (b) Liga B.

Observando as Figuras de 4 e 6, referentes a oxidação e nitretação, pode-se concluir que, apesar de temperaturas mais altas serem mais apropriadas para aliviar melhor as tensões, nestas os riscos dos efeitos negativos da atmosfera se tornam muito maiores. Estes efeitos são ainda maiores quanto maior a razão p_{H_2O}/p_{H_2} e maior a pressão parcial de nitrogênio e maiores os teores de silício e alumínio da liga tratada. É recomendável que o tratamento de alívio seja feito fora desta zona de risco, em temperaturas mais baixas, com um tempo o estritamente necessário (uma hora de encharque), mesmo porque grande parte do trabalho de restauração das propriedades já ocorre em temperaturas mais baixas, por volta de $750^{\circ}C^{(2)}$. Em termos de atmosfera, que seja a mais seca possível e com no mínimo, 10% de H_2 . Assim, tira-se, economicamente, o melhor proveito dos aços em estudo.

Quando os requisitos de propriedades são para máquinas que trabalham a 1,0T pode-se tolerar alguma umidade no forno desde que se use no mínimo 10% H_2 , mas somente para a liga A, de menores teores de Si e Al, mas sabendo que os melhores resultados não estão sendo alcançados. Quando se tratar de requisitos de propriedades para máquinas que trabalham em induções de 1,5T ou acima, a umidade é proibida e N_2 puro não é recomendável, principalmente para aços com silício e alumínio mais altos. Revestimentos como o caso do AISI C-4 podem ser indicados como proteção aos efeitos da atmosfera⁽⁸⁾.

O tratamento na temperatura de $900^{\circ}C$, além de oxidação e nitretação intensas, provocou uma mudança estrutural nas amostras dos três aços. Mesmo se oxidação e nitretação não ocorresse, estaria sendo feito algo além do alívio de tensões com conseqüências nas propriedades magnéticas, principalmente, devido ao crescimento de grão provocado nesta temperatura.

5 CONCLUSÕES

O tratamento de alívio de tensões tem objetivos bastante simples de relaxar tensões e recristalizar região deformada, no entanto, os efeitos da atmosfera podem degradar o material devendo o usuário exercer extremo controle das variáveis para evitar oxidação e nitretação, o que o torna uma operação bastante crítica.

A quantidade de oxidação aumenta com a temperatura a partir de 600°C, com o aumento da umidade e redução do hidrogênio na atmosfera. Aços com maiores teores de silício e alumínio apresentam maior propensão a oxidar.

A nitretação começa a acontecer somente a partir de 750°C para as duas ligas e aumenta com o aumento da temperatura, com a quantidade de nitrogênio na atmosfera. Aços com maiores teores de alumínio têm maior propensão a nitretar.

À medida que a temperatura aumenta os riscos dos efeitos negativos da atmosfera aumentam. O tratamento deve ser executado fora desta zona de risco para evitar degradação microestrutural e magnética.

Os efeitos negativos da atmosfera são mais sentidos nas propriedades medidas a 1,5T, mostrando que para máquinas que trabalham nesta indução ou maior o tratamento de alívio de tensões de seus núcleos deve ser realizado com rigoroso controle da atmosfera. Isto vale também para tratamentos de ligas mais ricas em silício e alumínio.

O tratamento economicamente ideal recomendável, que atenderia à maioria dos requisitos, seria aquele realizado numa atmosfera com 10%H₂ e 90%N₂ com ponto de orvalho abaixo de -10°C, onde a oxidação seria reduzida e numa temperatura de 750°C, onde a nitretação seria inibida e o trabalho de restauração estaria quase que 100% realizado. Revestimentos protetivos poderiam inibir os efeitos negativos da atmosfera e aumentar os ganhos com este tratamento. O tempo de encharque deve ser o mínimo necessário (1h) para evitar degradação microestrutural e perda de produtividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Novikov, I – **Theory of Heat Treatment of Metals** – MIR, Moscou, 1978.
- 2 Paolinelli, S.C. " **Influência da Temperatura de Alívio de Tensões Sobre a Perda e Permeabilidade Magnética de um Aço Silício de Grão não Orientado 2,0% Si Totalmente Processado**". 55º Congresso anual ABM jul/2000.
- 3 Schoppa, A., Schneider, J., Wuppermann, C. D., "**Manufacturing Steps of Electromagnetic Components and Their Influence on the Magnetic Properties, One-Day-Seminar, Stress, Magnetostriction and Losses in Magnetic Materials**", 23.02.00, Orb Electrical Steels, Newport, UK.
- 4 Schneider, J., "**Non Oriented Electrical Steels: Present Status and Trends**" Soft Magnetic Materials 98 - Barcelona Apr. 1998 - Gorhem/Intertech Consulting.
- 5 Lyudkovsky, G. et alli, "**The Influence of Annealing Conditions on the Internal Oxidation and Magnetic Properties of Silicium-Aluminum Bearing Electrical Steel**" - J. Appl. Phys. 53(3) March 1982.

- 6 Lyudkovsky, G. et alli, "**Effect of Annealing Cycles on the Internal Oxidation and Magnetic Properties Steels and Their Influence on Motor Performance**" - Proc. 26th Mech. Working and Steel Processing Conf. 197-206 - 1984.
- 7 Geiger, A. L. et alli, "**Effects of Oxidation and Nitration on the Magnetic Properties of Non Oriented Electrical Steels**". - J. Appl. Phys. 50(3), March 1979.
- 8 Paolinelli, S.C.e Torres, A. "**Influência da Nitretação Sobre as Propriedades Magnéticas do Aço GNO 2,3%, 0,47mm C-0 Rugoso**" - RAT- IQM-Si - 098, 23-03-1990, Interno Acesita S/A.
- 9 Chernavtseva, G. A. et alli "**Nitriding of Silicon Iron (~ 3,0% Si) in an Atmosphere Dissociated Ammonia**" - Russian Metallurgy, nº 4, p 116-118 - 1983.
- 10 Paolinelli, S.C.e Torres, A. "**Verificação da Propensão a Nitretar do aço GNO 2,3% Si 0,47mm C-0 Rugoso**". RAT-IQM-Si - 099, 30-03-1990 - Interno Acesita S/A.

EFFECT OF STRESS RELIEF ANNEALING ATMOSPHERE ON MICROSTRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF FULLY PROCESSED NON ORIENTED SILICON STEEL ⁽¹⁾

Sebastião da Costa Paolinelli ⁽²⁾

Abstract

Stress relief anneal in different temperature and atmosphere conditions was carried out on bare fully processed non oriented silicon steel 0,50mm samples with different silicon and aluminium contents in order to check their effects on the microstructure and stress relief annealing performance. The magnetic properties potential can be changed as a function of atmosphere and the adequate properties could be very difficult to be achieved under certain atmosphere conditions. The benefit with the stress relief could be lost and worse values than as sheared condition could be obtained. The oxidation and nitration was pointed as the main reasons for the bad magnetic results.

Key-words: Stress relief; Oxidation; Nitration; Magnetic properties.

⁽¹⁾ 60^o International Annual ABM Congress - Belo Horizonte - July 2005

⁽²⁾ Researcher - Research Centre, Acesita S/A