

Aços endurecidos por compostos intermetálicos

Este artigo mostra o estudo da cinética das reações que provocam o aumento da resistência em aços endurecidos por compostos intermetálicos, principalmente um aço "Maraging" solubilizado às temperaturas de 1093 e 1198 K por hora e envelhecido por tempos diferentes em temperaturas na faixa de 700 a 850 K. Medidas de atrito interno, resistividade elétrica e dureza apontaram comportamentos diferentes nos casos de envelhecimento por efeito Joule e em forno demonstrados aqui através de gráficos.

* Olavo Bilac dos Santos Victor e Luis Filipe C. P. de Lima

Até 1940 a máxima resistência obtida em um aço temperado e revenido era da ordem de 1250 MPa. Este valor é relativamente baixo se for considerado que o limite de resistência teórico de um cristal de ferro, livre de defeitos, é de cerca de 13000 MPa. Por meio de tratamentos térmicos convencionais obtiveram-se materiais com limite de resistência da ordem de 2200 MPa, pela adição de elementos de liga adequados, que não somente aumentavam a eficiência das transformações envolvidas, mas também davam resistência adicional à deformação, através de processos de precipitação. As ligas martensíticas Fe-Co-W endurecidas pela precipitação de compostos intermetálicos são conhecidas há mais de 50 anos. As ligas Fe-Co-Mo que utilizam esse tipo de endurecimento são mais recentes.

Ultimamente, novos tipos de tratamentos térmicos, alguns dos quais envolvem mudanças mecânicas e térmicas, fizeram surgir aços de resistência elevada. Um desses processos é conhecido como "Maraging" e permite obter aços com resistência de até 3500 MPa. A maioria desses aços se enquadra na família dos citados Fe-Co-Mo, modificada pela adição de Ni e Ti. Obtém-se, assim, uma estrutura CCC própria da martensita de Fe-Ni, com elementos intersticiais em porcentagem mínima. A histerese térmica da transformação $\gamma \rightleftharpoons \alpha$ nestas ligas, ou seja, o fato da temperatura Ms diferir substancialmente da temperatura As,

permite a realização do tratamento térmico de envelhecimento. A liga austenítica pode ser altamente supersaturada com elementos de liga substitucionais. A liga se transforma em martensita em uma temperatura onde não é possível nenhuma precipitação e pode ser reaquecida até outra temperatura maior onde esta precipitação é possível. Isso só ocorre graças à histerese térmica já mencionada, pois, de outra forma, a liga reverteria à austenita.

Q objetivo do presente trabalho é estudar a cinética das relações de envelhecimento, os fatores que a afetam e sua influência sobre as propriedades finais das ligas. Esta cinética, segundo alguns autores, é extremamente rápida. A técnica de atrito interno foi utilizada com sucesso por Miner para este estudo. Peters e Cupp utilizaram como técnica principal a medição da resistividade elétrica, além da medição de dureza e difração de raios-X.

Os dados da literatura evidenciam a

Tab. 1 — Composição química da liga estudada.

Ni	18,10
Mo	4,79
Co	9,43
Ti	0,70
Al	0,10
C	0,003
Fe	restante

existência de três fases distintas: a primeira, que ocorre logo no início do envelhecimento e se caracteriza unicamente pela recuperação da martensita; a segunda fase caracterizada adicionalmente pela precipitação de compostos intermetálicos e a terceira para tempos de envelhecimento longos, pela reversão à austenita.

No estudo que embasou este trabalho foram utilizadas as técnicas de atrito interno, medição da resistividade elétrica e da dureza.

PARTE EXPERIMENTAL

Composição da liga estudada - A composição da liga encontra-se na tabela 1. Ela é aproximadamente igual à do aço conhecido comercialmente como 18 Ni ou "Maraging" 300.

Atrito interno (Q^{-1}) - A técnica de atrito interno consiste em se medir a defasagem entre a tensão cíclica aplicada à amostra e a deformação decorrente, assim como a frequência de vibração (no nosso caso ambas em função da temperatura). Utilizou-se no estudo um pêndulo de torsão invertido e seus periféricos existentes no laboratório de atrito interno do IPEN-CNEN/SP.

Esta técnica é utilizada extensivamente há longo tempo, principalmente para o estudo de fenômenos de relaxação devidos à redistribuição de átomos intersticiais na rede cristalina, induzida pela

(*Os autores são do IPEN/CNEN, de São Paulo (SP). O título original deste trabalho é "Contribuição ao estudo da cinética das reações de envelhecimento em aços martensíticos endurecidos por intermetálicos".

Dimensionamento das instalações elétricas de acordo com a NBR 5410/revisão

Conferencista:

ADEMARO A.M.B. COTRIM

engenheiro eletrícista, professor da Escola de Engenharia Mauá, diretor da MHC Engenharia e Consultoria, membro da Comissão Técnica CT-64 do Cobei/ABNT, encarregada da revisão da NBR 5410.

Dias

11 e 12/11/87
das 8h30 às 18h00

Local:

Augusta Boulevard Hotel
Rua Augusta, 843
São Paulo, SP

Taxa de inscrição:

Cz\$ 7.200,00 até 30/10/87
Cz\$ 8.300,00 após 30/11/87

OBS: Este valor inclui almoço, serviço de café, pasta, apostila e certificado de participação. Empresas com mais de três participantes terão direito a 10% de desconto.

PROGRAMA

1. FUNDAMENTOS — Normalização; Conceitos básicos; O projeto de instalações elétricas; Setores de uma instalação; Equipamentos de utilização; Tensões; Influências externas.

2. INTRODUÇÃO À PROTEÇÃO — Generalidades; Aterramentos; As funções e os dispositivos de comando e proteção.

3. PLANEJAMENTO DA INSTALAÇÃO — Demanda e curva de carga; Fatores de projeto; Potência de alimentação; Roteiro de projeto.

4. LINHAS ELÉTRICAS — Condutores elétricos; Maneiras de instalar; Eletrodutos; Outros componentes de linhas; Linhas pré-fabricadas.

5. PROTEÇÕES (1: Parte) — Os efeitos da corrente elétrica sobre o corpo humano; Fundamentos da proteção contra choques elétricos; As isolações; A proteção contra contatos diretos; A proteção contra contatos indiretos; Esquema TT; Esquema TN, Esquema IT; Compa-

ração entre os esquemas; O condutor de proteção, Condições de utilização dos componentes em função das medidas de proteção contra choques elétricos.

6. PROTEÇÕES (2: Parte) — A proteção contra sobrecorrentes; A proteção contra sobretensões; A proteção contra efeitos térmicos em serviço normal.

7. DIMENSIONAMENTOS — Cálculo das correntes de projeto; O critério do aquecimento normal; O critério da queda de tensão; Os critérios das proteções; O critério da proteção contra contatos indiretos; Dimensionamento dos condutores de proteção; Outros dimensionamentos.

Peço anotarem minha inscrição no seminário "Dimensionamento das instalações elétricas de acordo com a NBR 5410/revisão". Para tanto estou enviando cheque nominal à MM Editora Ltda.: Rua Dona Elisa, 167, CEP 01151, São Paulo, SP.

Cheque nº do Banco

Nome (s)

Cargo

Empresa

Endereço

Tel.:

Cidade

Estado CEP

CPF

CGC

Insc. Est.

Inscrições e maiores informações: tel.: (011) 826-4511
ou através do cupom ao lado

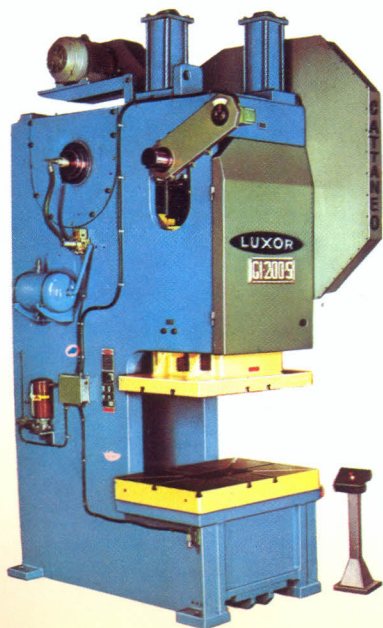


LUXOR

qualidade e tecnologia que sua empresa merece

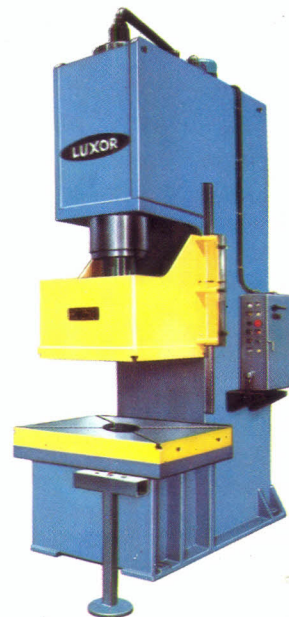


Prensa para ajuste de moldes



Prensa tipo "C" mecânica

**FABRICAMOS
MÁQUINAS SOB ENCOMENDA**



Prensa tipo "C" hidráulica

U.M. CIFALI construções mecânicas Ltda.

ESCRITÓRIO E FÁBRICA (1): Rua Pico Negro, 207 — CEP 03346 — PABX: 296-0777 — Telex: (011) 23218 UMCM BR — São Paulo — SP — Brasil
FÁBRICA (2): Av. das Nações, 2.387 — CEP 13320 — PABX: 483-3000 — Telex: (011) 33873 UMCM BR — Salto — SP — Brasil

Tab. 2 — Tratamentos térmicos aplicados às amostras.

Tratamento	T (K)	t (min)	Atmosfera	Aquecimento	Resfriamento
Solubilização	1093	60	Vácuo $\sim 10^{-3}$ Pa	Forno (radiação)	Circulação de argônio
	1198				
Envelhecimento	723	1/2, 5, 50, 500	Ar	Forno	Água, ar
	758			Resistivo	
	823			(efeito Joule)	

tenção, que dá origem a um pico de atrito interno. Os trabalhos relacionados à presença de elementos substitucionais não são tão abundantes quanto os anteriores mas podem ser encontrados com facilidade na literatura técnica.

Um exemplo clássico é o estudo feito por Damask e Nowick na liga Al-Ag, na qual estudaram o pico que ocorre devido à precipitação durante o envelhecimento. No trabalho de Miner, relacionado com aços "Maraging", o envelhecimento das amostras foi realizado no próprio pêndulo, aquecendo-as por efeito Joule. Este procedimento já tinha sido utilizado por Ang e Wert para o estudo do amortecimento em certas ligas de Au-Ni.

Como no pêndulo existente em nosso laboratório a amostra é aquecida de maneira convencional (forno resistivo) até uma temperatura de 700 K, optamos por um procedimento especial. Este se constitui em realizar o envelhecimento aquecendo-se separadamente as amostras por efeito Joule e fazendo-se o resfriamento rápido, de forma a congelar-se a estrutura existente à temperatura do envelhecimento. Um cálculo do número de saltos efetuados pelos defeitos pontiformes durante o resfriamento mostrou que a água é um meio adequado para este fim.

As medidas de atrito interno e da frequência foram realizadas em decaimento livre à frequência aproximada de 1 ciclo por segundo e num intervalo de temperatura entre 123 e 573 K. A amplitude de deformação máxima na superfície da amostra foi de 2×10^{-5} e a velocidade de aquecimento de 0,02 K/s. Para cada amostra foram realizadas duas medidas: a primeira após a montagem e a segunda após o recozimento linear a 573 K, realizado durante a medida precedente.

Preparação de amostras - A liga foi fabricada pelo processo de fusão em forno de indução a vácuo (processo VIM) com dupla refusão em forno a vácuo (processo VAR). Após a fabricação foi forjada e laminada a quente, cortada em tiras que foram trefiladas. Após a trefilação o seu diâmetro era de 1,5 mm, não sendo adequado para ensaios de atrito interno, que requerem amostra com 1,2 mm de diâmetro. Foi então submetida a um processo de estiramento adicional em um dispositivo construído para este fim, que consta de furos calibrados com diâme-

tros consecutivos variando de 0,05 mm desde 1,45 mm até 1,20 mm. Os corpos de prova para dureza constaram de tiras de $2 \times 1 \times 100 \text{ mm}^3$. Para os testes de resistividade foram utilizadas as mesmas amostras preparadas para ensaios de atrito interno, com 50 mm de comprimento.

Tratamentos térmicos - Os tratamentos previstos para as amostras são os constantes da tabela 2. Para a realização de tratamentos térmicos de solubilização na faixa de 1070 a 1200 K, é bastante indicada que seja usada uma atmosfera protetora para evitar os problemas de oxidação. Optamos por realizar estes tratamentos térmicos em um tubo de quartzo em cujo interior se fez um vácuo de 10^{-3} Pa.

As amostras foram limpas com detergente neutro e água desmineralizada e submetidas a limpeza por ultra-som. De-

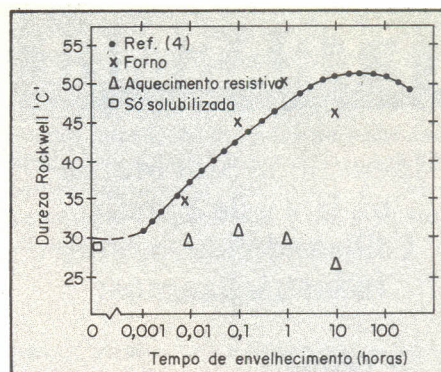
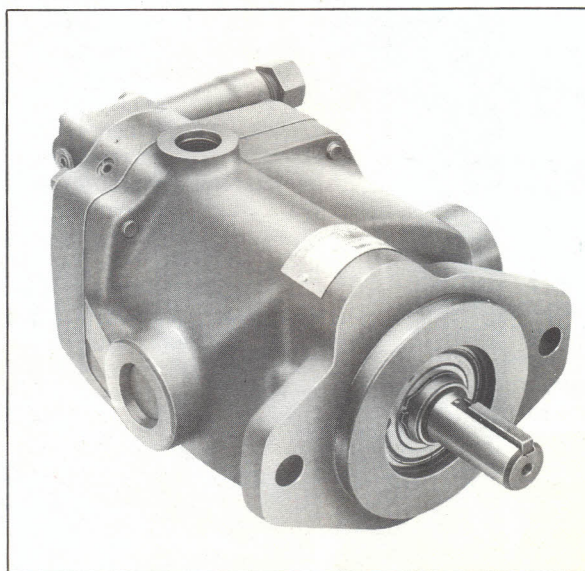


Fig. 1 — Medidas da dureza em função do tempo de envelhecimento para amostras solubilizadas a 1093 K e envelhecidas a 758 K.

pois foram desgaseificadas em alto vácuo e, finalmente, aquecidas até a temperatura adequada. Esta última etapa foi realizada na instalação existente no Departamento de Processos Especiais do IPEN-CNEN/SP.

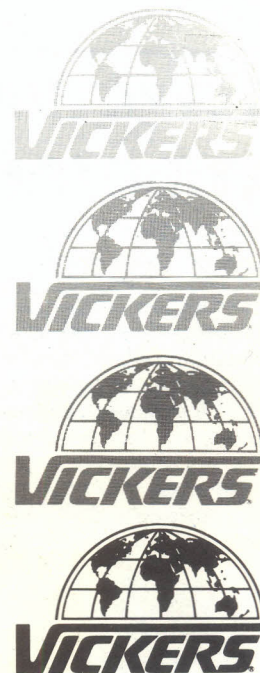
O tratamento térmico de envelhecimento foi feito de duas formas. A primeira utilizou aquecimento por efeito Joule através de uma fonte estabilizada da Tectrol. O controle de temperatura dentro de uma faixa de ± 2 K é feito através de controle fino. A temperatura é medida na



Bomba de pistões axiais série PVB

AEROQUIP VICKERS DO BRASIL S/A
DIVISÃO VICKERS
Rua Darnilo Martins Pereira, 49
CEP 03189 - Moóca - São Paulo - Capital
Telex: (011) 23.865 - Cx. Postal 30.511
Tel.: (011) 272-2477

GRUPO TRINHOVA



LETRASMOL

Identifique Sua Marca
na Hora de Fundir
Utilizando Letrasmol
Industrializamos:

- Letras
- Números
- Plaquetas
- Emblemas
- Logotipos em alto relevo, ótimo grau de moldagem

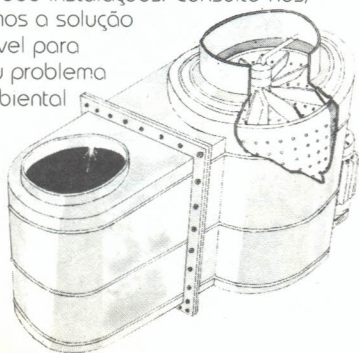
Em Diversos Tamanhos
CONSULTE-NOS

Rua Estela Borges Morato, 435
CEP 02722 - Vila Siqueira
Bairro do Limão - São Paulo, SP
Fone: (011) 266-1346

DESPOLUIDOR ATMOSFÉRICO

Elimina gases, poeiras, odores,
fumaças, óleos etc.

O precipitador hidrodinâmico Centricap apresenta dimensões compactas, reduzindo consumo de energia, menor custo e maior eficiência na retenção de contaminantes, comprovadas em mais de 600 instalações. Consulte-nos, temos a solução viável para seu problema ambiental



Capmetal Ltda.
Rua Idalina Senra, 45
CEP: 20941 - Rio de Janeiro - RJ
Tel.: (021) 284-5445
Tlx.: (021) 36 957 APCI

TRATAMENTO TÉRMICO III

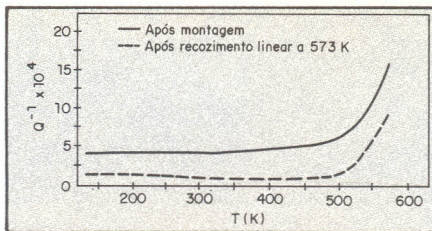


Fig. 2 — Espectros de atrito interno de uma amostra solubilizada a 1093 K por uma hora e envelhecida por efeito Joule a 758 K, por 5 minutos, seguido de resfriamento na água.

amostra por meio de termopar de ferro-constantan. Foi projetado um dispositivo especial que evita as perdas por condução nas extremidades da amostra e permite a elevação da temperatura até 780 K em dois minutos, com 30 A de corrente de aquecimento. Após um certo tempo à temperatura de envelhecimento a amostra é mergulhada em água fria.

Foi projetado um sistema que permite a liberação das amostras no instante desejado. O sistema consta basicamente de dois tubos de quartzo de 7 mm de diâmetro interno, no interior dos quais são mantidos dois fios de aço "Maraging" com 0,6 mm de espessura ligados a conectores de bronze. A amostra é conectada ao dispositivo com os tubos de quartzo dispostos de forma a permitir somente a passagem do termopar. Assim, as perdas térmicas por convecção são diminuídas. O calor gerado no fio de 0,6 mm deverá compensar as perdas por condução nas extremidades da amostra. Todo o dispositivo é mergulhado na água, causando o desejado resfriamento rápido. Para fins de comparação realizou-se também o envelhecimento convencional em forno, com resfriamento ao ar ou em água.

Após o resfriamento a amostra foi seca e lixada para remover qualquer oxidação que pudesse dar leituras erradas nas medidas de resistividade. A mesma amostra foi utilizada para obtenção dos espectros de atrito interno e frequência em função da temperatura.

RESULTADOS OBTIDOS

a) Nas amostras submetidas a um aquecimento rápido por efeito Joule, seguido de resfriamento extremamente rápido, foram observados valores de dureza muito baixos, sendo alguns inferiores aos das amostras submetidas somente ao tratamento de solubilização (figura 1). Os espectros do atrito interno e da frequência em função da temperatura obtidos com estas amostras estão mostrados nas figuras 2 e 3. Pode-se notar a variação importante provocada nos mesmos pelo recozimento a 573 K em relação à condição após montagem.

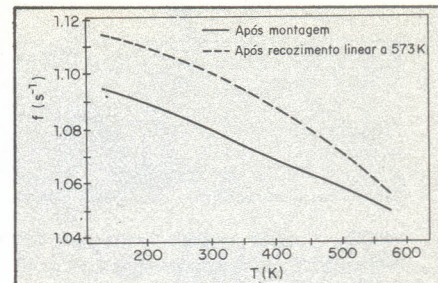


Fig. 3 — Espectros de frequência de uma amostra solubilizada a 1093 K por uma hora e envelhecida por efeito Joule a 758 K, por 5 minutos, seguido de resfriamento na água.

Observou-se também um aumento substancial da dureza em amostra tratada de forma idêntica e submetida à mesma taxa de aquecimento utilizada no pêndulo. Em uma amostra solubilizada a 1093 K por uma hora e envelhecida a 758 K por 5 minutos verificou-se um aumento de 60% da dureza.

b) Nas amostras envelhecidas no forno e submetidas tanto a um resfriamento lento quanto a um resfriamento mais rápido as durezas observadas, mesmo para curtos períodos de tempo de envelhecimento, são muito mais altas do que a dureza das amostras na condição solubilizada, sendo maiores nas amostras com resfriamento em água. Nos dois casos, observa-se que o recozimento linear a 573 K não provoca alteração sensível dos espectros de atrito interno e da frequência, sendo as duas curvas praticamente coincidentes (figuras 4 e 5).

c) Variando-se as velocidades de aquecimento, e mantendo-se o resfriamento rápido, verificou-se que nas velocidades mais lentas há quase que uma coincidência nas curvas após montagem e após recozimento linear tanto para Q^1 quanto para a frequência.

d) Em um resfriamento imperfeito, ou seja, retardando-se algum tempo o resfriamento após o aquecimento por efeito Joule, não se notou diferenças significativas na variação dos espectros devido ao recozimento linear em relação às amostras em que o resfriamento foi feito o mais rápido possível.

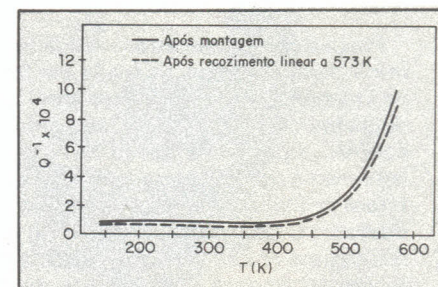


Fig. 4 — Espectros de atrito interno de uma amostra solubilizada a 1093 K por uma hora e envelhecida em forno a 758 K, por 5 minutos, seguido de resfriamento na água.

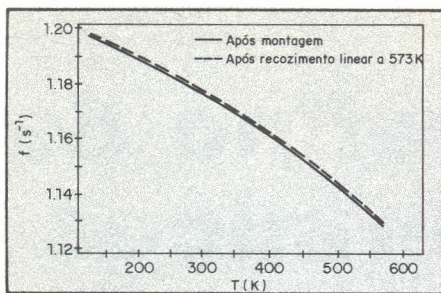


Fig. 5 — Espectros de frequência de uma amostra solubilizada a 1093 K por uma hora e envelhecida em forno a 758 K, por 5 minutos, seguido de resfriamento na água.

e) Nas figuras 1 e 6 estão apresentados os valores de dureza e da resistividade elétrica obtidos em amostras envelhecidas tanto por aquecimento resistivo como no forno, seguido de resfriamento em água, respectivamente. Estes valores podem ser comparados aos obtidos por Peters e Cupp apresentados na mesma figura.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

As curvas de atrito interno e da frequência mostram claramente a potencialidade da técnica para o estudo em questão. No caso do aquecimento por efeito

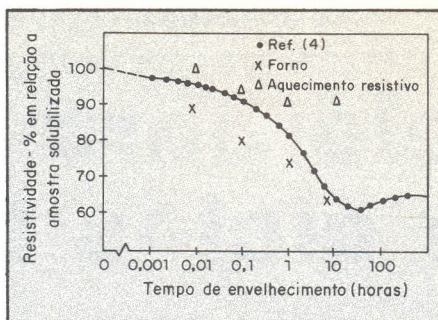


Fig. 6 — Medidas de resistividade em função do tempo de envelhecimento para amostras solubilizadas a 1093 K e envelhecidas a 758 K.

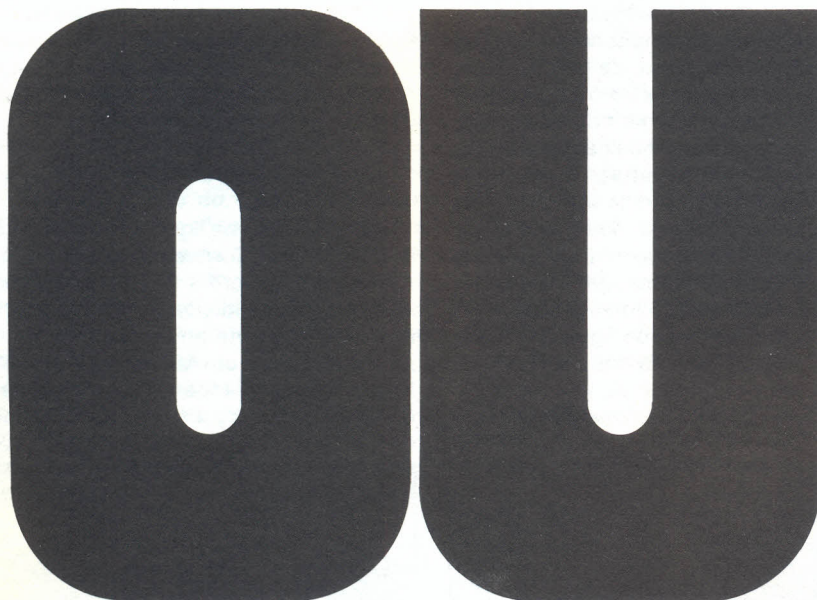
Joule e resfriamento rápido, a comparação das figuras 2 e 3 mostra que o material, nas condições utilizadas, não é imune às variações de temperatura até 573 K, o que, segundo a literatura, não era de se esperar. Nas figuras 4 e 5, a pequena variação dos espectros com o recozimento linear a 573 K é uma evidência de que há uma diferença sensível entre os dois tipos de tratamentos térmicos. A mesma discrepância é observada nas figuras 1 e 6 em relação à resistividade elétrica e à dureza. Quanto às propriedades mecânicas, sem dúvida o tratamento térmico no forno com resfriamento em água é mais adequado, como pode ser visto na

figura 1. Nota-se também que, no caso do envelhecimento por efeito Joule, não foram observadas as três fases de envelhecimento citadas na literatura.

Com relação às medidas de atrito interno ainda não foi possível associar os comportamentos distintos a pré-tratamentos específicos, e isto é objeto de pesquisa em andamento.

BIBLIOGRAFIA

- Ang, C. and Wert, C. - A Torsional pendulum of low thermal inertia. J. Applied Physics, 25: 1061, 1954.
- Cias, W.W. - Phase transformations kinetics of four 18% Nickel maraging steels on continuous cooling. Metallurgia and metal forming, 38: 356-359, December, 1971.
- Damask, A.C. and Nowick, A.S. - Internal friction peak associated with precipitation in an Al-Ag Alloy. J. Applied Physics, 26: 1665-1172, 1955.
- Floreen, S. - The physical metallurgy of maraging steels. Met. Reviews, 13: HS-128, 1968 (Review 126).
- Miner, R.E., Jackson, J.K. and Gibsons, D.B. - Internal friction in 18 Pct Ni maraging steels. Trans. Met. Soc. AIME, 236: 1965-1970, 1966.
- Nicholson, R.B. - In: Strengthening methods in crystals, ed. by Kelly, A. and Nicholson, R.B., Applied Science Publishers Ltd, London, p.535-613, 1971.
- Peters, D.T. and Cupp, C.R. - The kinetics of aging reactions in 18 Pct Ni maraging steels. Trans. Met. Soc. AIME, 236: 1429-1440, 1966. ■



ELETRICIDADE
ELETRÔNICA
MECÂNICA
PRODUÇÃO
INFORMÁTICA

GENTE DE FORA
FAZ CURSOS
NA FUPAI.

DESCUBRA
POR QUE.

A Fupai sabe como transformar engenheiros e técnicos em experts. Ou aumentar ainda mais o potencial administrativo de empresários e profissionais de todos os níveis. São mais de 80 cursos, com metodologia avançadíssima e um corpo docente de renome internacional.

E a partir da inscrição, você já desconta tudo em dobro no seu Imposto de Renda. Faça o que profissionais de todas as partes do mundo têm feito: inscreva sua empresa ou seus funcionários nos cursos da Fupai. Quando uma coisa é boa, ela faz sucesso em qualquer idioma.

Serviço de Consultas n° 1256

NOSSOS CURSOS SÃO RECONHECIDOS INTERNACIONALMENTE

FUPAI
Tecnologia Ensino e Pesquisa

FUPAI
Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria
EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Rua Coronel Rennó, 07
Fone (035) 622-3477
Telex (031) 3514 FPAI BR
CEP 37500 ITAJUBÁ - MG

Márcion

EPC - ENGENHARIA PRO ETO CONSULTORIA LTDA.
CIT - CENTRO DE INOVAÇÕES TÉCNICAS