

## TRATAMENTOS TÉRMICOS DE LIGAS DE AL

Abstrato de uma conferência por ocasião do Simpósio de Não-Ferrosos, no C.T.A., São José dos Campos, São Paulo, em Dezembro de 1967, por

Otto Weinbaun<sup>(1)</sup>

Introdução: O objetivo destes tratamentos pode ser:

- a) Um alívio de tensões e a recristalização.
- b) Uma solubilização dos elementos de liga como pré-requisito de um endurecimento por precipitação.
- c) A criação de uma solução sólida supersaturada por meio de um esfriamento brusco.
- d) Um envelhecimento para elevar a resistência mecânica.
- e) Uma estabilização das dimensões.
- f) Uma homogenização da estrutura da fundição por meio de um recozimento.

Alívio de Tensões: Este tratamento é executado após deformações a frio que causaram um encruamento tão elevado que não se pode continuar, por exemplo, com a laminação, estiramento ou qualquer outra transformação mecânica.

Este tratamento não exige temperaturas elevadas, quando se permite ainda a existência de baixas tensões residuais. Entretanto, quando é necessário uma remoção completa das tensões, deve-se executar uma recristalização que cria novos grãos de orientação não-preferencial e cujo sucesso depende do tempo e da temperatura aplicados.

A recristalização pode ser encarada como um processo de difusão devido à formação de novos cristalitos, formação essa, que eleva grandemente a

---

(1) Dr. Eng<sup>o</sup> Conselheiro Científico da Metal Leve S/A  
Prof. da Faculdade de Engenharia Industrial da PUC de  
S. Paulo e da Escola de Engenharia Mauá

dutilidade e abaixa a resistência mecânica

O alívio de tensões é também aconselhável, se uma peça de Al comercialmente puro tem de ser submetida, após uma deformação a frio, a um ambiente corrosivo para não facilitar a corrosão, devido à existência de tensões residuais que neste caso podiam aliviar-se e causar fissuras .

Solubilização: Em ligas de Al, os elementos adicionados podem existir:

- a) Em forma de átomos dissolvidos na solução sólida ou
- b) embutidos em forma de cristalitos estranhos ou de compostos intermetálicos na matriz do Al.

Também observam-se estruturas em que as duas maneiras de existência estão combinadas, por exemplo, compostos intermetálicos dentro de uma matriz de solução sólida.

O diagrama binário indica então pela linha do solvus o limite entre uma zona da solução sólida e uma zona heterogênea, bem como a quantidade do elemento adicionado que pode ser absorvida, em relação à temperatura. No caso de haver formação limitada de uma solução sólida e, ainda, diminuição da solubilidade com a diminuição da temperatura, então pode-se obter pela elevação da temperatura acima do solvus a entrada de maiores quantidades de átomos estranhos na rede atômica do Al, do que é possível na temperatura ambiente. A solubilização consiste então nesta elevação da temperatura acima da linha do solvus, temperatura essa que deve ser mantida demoradamente para garantir a dissolução total dos cristalitos precipitados na temperatura ambiente.

Normalmente aplica-se, após a solubilização, um esfriamento brusco em água morna, o que permite manter o estado solubilizado temporariamente. Neste estado, o material não está estabilizado, isto é, uma peça, tratada desta maneira, muda com o tempo as suas dimensões. Isto ocorre na temperatura ambiente em tempo muito demorado, sendo êste processo denominado "envelhecimento natural".

No estado solubilizado, a liga é mole devido à existência de uma só fase (solução sólida) e, por isso, pode ser deformada a frio com facilidade, seja por laminação, forjamento ou estiramento. A deformação a frio eleva a dureza e resistência e superpõe-se ainda ao mecanismo de endurecimento, causado pelo envelhecimento natural.

Envelhecimento artificial: Êste tratamento é executado após solubilização e esfriamento brusco pela elevação da temperatura a um valor constante, ficando entretanto sempre abaixo da linha do solvus e mantendo esta temperatura durante algumas horas. Tempo e temperatura dêste processo variam de liga para liga. Entretanto, em comparação com o envelhecimento natural, um estado essencialmente estável é obtido muito mais rapidamente, que mostra propriedades mecânicas definidas.

Pode-se acompanhar o envelhecimento artificial por meio da determinação da dureza que manifesta um aumento bem pronunciado na primeira hora e atinge em seguida, após um certo intervalo de tempo um máximo. Depois verifica-se uma ligeira queda da dureza, o que indica que o processo deve terminar para não chegar ao equilíbrio.

A elevação da dureza é causada pela formação de zonas de Guinier-Preston: os átomos estranhos agrupam-se nestas zonas que possuem uma largura de 10 a 20 Å e um comprimento de aproximadamente 100 Å, e mantêm a coerência com a rede atômica do Al, pelo menos no início dêste tratamento térmico. Entretanto, o parâmetro das células ou o tipo da célula dos átomos estranhos é diferente dos valores do Al, o que provoca distorções da rede. São estas distorções que causam a elevação da dureza e resistência.

Com a continuação do processo, as zonas de Guinier-Preston perdem gradativamente a coerência, o que causa então a queda da dureza acima mencionada. Entretanto, esta queda indica simultaneamente que o material se estabilizou essencialmente, fenômeno êsse que justifica sacrificar ligeiramente a dureza e não terminar o processo, quando foi obtida a dureza máxima. Uma prolongação do tempo resultaria o estado de equilíbrio, em que, a partir das zonas de Guinier-Preston, compostos intermetálicos se formariam e precipitariam em forma de cristalitos separados da matriz de Al. Nêste caso, a diminuição da dureza continuaria, o que contraria o objetivo dêste tratamento.

Recozimento Pleno: Enquanto um alívio de tensões é executado no máximo em uma temperatura de 340 °C, o recozimento pleno aplica temperaturas acima dêste valor até aproximadamente 440 °C para obter os precipitados bem espalhados e uma dureza mínima. Tratando-se de um processo de difusão, a duração na temperatura do recozimento deve ser pelo menos 2 horas. Mais importante do que estas providências

é a velocidade de esfriamento após o recozimento: o esfriamento deve ser muito lento e não mais rápido do que  $25^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ .

Estas indicações permitem geralmente a homogenização para preparar a liga para posteriores deformações, para afastar qualquer efeito de uma deformação anterior e para uniformizar uma estrutura. Entretanto, existem certas ligas, nas quais devem ser aplicadas outras temperaturas .

No caso de ligas que possuem uma camada externa de Al puro (Alclad) , deve-se evitar a penetração de elementos de liga na camada protetora por difusão, facilitada por estas temperaturas elevadas. Por isso, um tratamento térmico pode ser aplicado a estas ligas geralmente só uma vez, no máximo duas vezes, para não prejudicar a resistência à corrosão.

Conclusões: Estas considerações têm de mostrar a complexidade de fenômenos que surgem em tratamentos térmicos de ligas de Al. A execução deles, na realidade, torna-se ainda mais difícil devido a outros fatores que devem ser observados, como o crescimento do grão, a formação de tensões residuais e a distorção que geralmente acompanham estes tratamentos.

TRATAMENTO TÉRMICO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

OTTO WEINBAUN (1)

DEBATE:

Aparteante

- Sôbre alívio de tensões, eu gostaria de ouvir uma experiência do mesmo sob o efeito da usinagem sôbre essa liga.

Weinbaun

- Nós podemos pela usinagem aliviar tensões, mas isso pode ser um problema para o operador, por que as peças se deformam. No momento que se destrói o equilíbrio de tensões de uma peça, o material é deformado. Quer dizer, quando eu estou me referindo ao alívio de tensões, eu quero considerar os tratamentos térmicos como processos de alívio de tensões, quando uma peça foi encruada pela deformação a frio e agora, em temperaturas mais elevadas, atinge outra vez a resistência do estado recozido.

Aparteante

- Agora eu gostaria de saber com a sua experiência de Tratamento Térmico de Alumínio sôbre o problema do crescimento por precipitação. Gostaria de ver um diagrama bastante de talhado para aquela região de super envelhecimento para que não tenha também tensões externas e criar o material mais estável. Agora como o Sr sabe, também existem temperaturas diversas de envelhecimento: uma temperatura mais baixa em que a curva é ascendente e estabiliza; uma curva que aos 250 graus deve atingir o máximo, existem as intermediárias e temos dois máximos. No caso das ligas de alumínio para pistões, qual seria o uso exatamente, o 1º máximo ou o 2º máximo, já que o Sr apresentou um máximo só?

Weinbaun

- A êsse respeito no gráfico tridimensional mos tra-se agora a relação entre tempo, temperatura e dureza Brinell. Não sei, se isso foi claro para o Sr., pode-se pensar que a dureza é como um bico que sai normal a êsse plano do quadro e que levanta muito bruscamente para depois cair lentamente para tempos maio res. Quer dizer, que devo aplicar temperatura certa e providenciar uma subida brusca da dureza e não trabalhar nem acima nem abaixo dela. Quer dizer, não posso aplicar temperaturas muito baixas, vamos dizer a  $120^{\circ}$  nem posso aplicar  $250^{\circ}$ , dependendo além disso da liga, no nosso caso uma liga de 1% Cobre; 1% Magnésio; 1% Níquel e 12% Silício. Para esta liga precisamos justamente  $200^{\circ}$ , e depois de 4 hs obtemos relativa estabilidade das dimen sões.

Agora isto não quer dizer que o material está completamente estabilizado.

Bondesan (2)

- Prof., em geral nos compêndios nós lemos sempre sôbre a parte teórica, nunca sôbre a parte prá tica dos tratamentos térmicos; a minha pergunta é justamente quanto à parte prática dos tratamentos térmicos. O contrôle da temperatura num forno de alumínio é essencial: para a solubilização, qual a faixa utilizada mais ou menos; segundo, qual o tipo de par termoe létrico que deve ser usado; terceiro, como controlador, serve um controlador galvanométrico ou nós devemos ter um controlador poten ciométrico.

Weinbaun

- A temperatura que nós aplicamos para solubili zação, é de  $500^{\circ} \pm 5^{\circ}$ ; com maior precisão nós não conseguimos manter a temperatura, agora após êsse aquecimento a  $500^{\circ}$  tem que se es friar bruscamente, em banho de água de  $60$  a  $70^{\circ}$  ou por meio de jatos de ar comprimido, is

to é suficiente para obter uma solubilização bastante elevada, agora o tempo na temperatura de 500° é aproximadamente 1:00 h. Outras, são perguntas que não posso responder completamente mas posso dizer que nossos fornos possuem ainda ventiladores internos para forçar o ar a passar dentro do sistema. No forno existe então um ventilador no topo que força o ar para baixo; dentro do forno temos cestas carregadas com pistões uma em cima da outra de uma maneira irregular tanto quanto possível não colocando bem uma ao lado da outra, o que não permitiria uma circulação suficiente.

Bondesan

- Como é que o Sr. controla a peça: só medindo a resistência à tração, ou faz um exame micrográfico ?

Weinbaun

- A resistência à tração não é sempre determinada e também seria difícil de aplicar em uma produção em massa, mas a dureza podemos examinar. Podemos examinar em amostras retiradas de cada cesta; também foram feitos ensaios de cada cesta uma vez, tirando numa só posição da peça, de acordo com sua colocação observamos que a dureza varia muito pouco após a aplicação do envelhecimento de 4 horas. Temos variações da dureza Brinell entre 115-125 Kg/mm<sup>2</sup>.

Lino Rodighiero (3)

- No caso de envelhecimento, o Sr usa tempo e temperatura diferentes. Também nas normas muitas vezes com uma mesma liga, fala-se de temperatura, de tempo, e com a mesma liga temos temperatura e tempo diferentes. Eu queria saber, como o Sr. descreve esse tempo e essa temperatura.

Weinbaun

- Existe uma publicação minha no boletim da Associação Brasileira de Metais, em que se com

bina tempo e temperatura dentro de um parâmetro, semelhante ao parâmetro de Larzon e Miller. Agora pode-se modificar temperaturas e tempos, obtendo o mesmo parâmetro e com isso a mesma dureza final. Quer dizer, eu posso traçar uma curva mestra que dá a relação entre êsse parâmetro e a dureza Brinell. Se aplico um determinado valor para "T", quer dizer aplicando uma temperatura e um certo tempo eu vou obter uma certa dureza.

Rodighiero

- Isso só tem validade para o caso da liga do aço ou para liga de alumínio também?

Weinbaun

- Isso pode-se também, pelo menos com certos cuidados aplicar às ligas de alumínio.

Rodighiero

- Isso deveria ser experimentado

Weinbaun

- Isso foi experimentado, e encontrou-se para "C" um valor diferente do C válido para aço. Para alumínio o valor de C varia de liga para liga. Para essa liga mencionada, o Sr. tem um valor de 7,7, para outras ligas laminadas, o Sr. chega a valores de 12-14, mas isso ainda está em experiências.

Stênio (4)

- Sobre as observações feitas pelo Prof. Weinbaun, foi particularizada muito quanto ao problema de pistões. Qual a composição da liga utilizada para a confecção dos pistões?

Weinbaun

- Eu mencionei uma liga, que contém 12% Si; 1% Cu; 1% Mg; e 1% Ni. Agora, além dessa liga, nós usamos para pistões a liga que tem 18% Si; enquanto o resto é praticamente a mesma coisa, 1% Cu, 1% Mg, 1% Ni, como valores nominais. Além disso uma liga altamente enriquecida em Si que contém 24% de Si, e contém ainda Cu, Mg e Ni, também. E agora, de acordo com êstes teores diferentes de Si mudam natural-



mente as propriedades. Quanto maior o teor de Si, menor a expansão térmica, o que é uma grande vantagem. Mas também mais duro é o material: com essa porcentagem de Si não posso mais forjar o pistão. Eu posso forjar o pistão com 12 a 18% de Si, mas com teores mais altos o forjamento é extremamente difícil. Os pistões para a Aeronáutica que possuem 12 a 18% de Si não são fundidos, mas são forjados.

Stênio

- Um outro ponto que eu gostaria de abordar, é o seguinte: os constituintes endurecedores. O Sr. se referiu nessas ligas usada na confecção dos pistões  $\text{CuAl}_2$  e o constituinte formado pelo Ni, enquanto que na liga Duralumínio, 2024, nós não temos Ni, e evidente não temos esse endurecedor. Temos apenas dois :  $\text{CuAl}_2$  e o Al-Cu-Mg.

Weinbaun

- Sim e além disso existe o siliceto de Magnésio.

Stênio

- O  $\text{Mg}_2\text{Si}$  é um ponto controvertido, o que ela apresenta diz que não é um constituinte endurecedor. Gostaria de ouvir a opinião do Sr.

Weinbaun

- Eu considero qualquer composto intermetálico que se forma aqui e especificamente o  $\text{Mg}_2\text{Si}$  como um elemento que vai endurecer e fortalecer a matriz.

Stênio

- Agradeço os esclarecimentos do Sr.

Barilli (5)

- Prof. Otto, o Sr. de certa forma falou que as propriedades mecânicas, nas ligas fundidas podem ser medidas pela dureza. Eu queria saber se essa afirmação é válida para ligas trabalhadas, me parece que a dureza só não basta.

Weinbaun

- Certo; a dureza não basta, mas o Sr. pode pela dureza se orientar quanto à resistência à tração do material. No nosso caso aqui numa liga fundida ou forjada que tem uma dureza Brinell, vamos dizer de 120-130 unidades, o Sr. obtém uma resistência à tração de 36-38 Kg/mm<sup>2</sup>. No momento que uma liga é laminada, como essa 2024, e depois envelhecida artificialmente e deformada a frio, o Sr. tem valores de 42-45 Kg/mm<sup>2</sup> sem dificuldade. Naturalmente, lá a resistência e a relação entre dureza e resistência são completamente diferentes.

Aparteante

- Eu gostaria de saber dos 3 tipos de liga que o Prof. Weinbaun citou qual é a mais utilizada na confecção dos pistões.

Weinbaun

- A liga com 12% Si: esta liga representa a liga eutética do ponto de vista do Si. Existe aqui uma pequena solubilidade de Silício no Al que é mínima. Esta liga de 12%, com maior precisão, 11,6% Si, é a liga eutética. Quer dizer a liga que permite a fundição e o vazamento na temperatura mais baixa possível. E por isso o perigo da absorção de gases é menor. Agora no momento que o Sr. usa 18 ou 24% de Si, então o intervalo entre Líquidos e Sólidos é maior, aumentando assim o perigo da formação de óxido.

- (1) Richard Martin Otto Weinbaun  
Dr Eng Conselheiro Científico da Metal Leve S/A  
Prof. da Faculdade de Engenharia Industrial da PUC  
de São Paulo e da Escola de Engenharia Mauá
- (2) Ciro Bondesan dos Santos  
Pesquisador do Depto. de Aeronaves - IPD/CTA  
S. José dos Campos
- (3) Lino Rodighiero  
Engº da Cia Brasileira de Alumínio
- (4) Oswaldo Stênio Cardoso de Souza  
Membro da ABM - Cap Av Eng Industrial e de Metalurgia - IPD/CTA  
S. José dos Campos
- (5) Norberto Victor Barile  
Gerente Depto. Metalúrgico da ALCAN - Alumínio do Brasil S/A

