



Spectru Instrumental Científico Ltda

Divisão Metalurgia / Tratamento Térmico / Ensino



Tratamento Térmico dos aços : Recozimento, Normalização, Têmpera e Revenido

Av. Paulo de Frontin, 631 – CEP 20261 – 241 – Rio Comprido – Rio de Janeiro
TELS.: (21) 2293 – 5016 – FAX: (21) 2293 – 3607 – CEL.: (21) 9983 - 4887

www.spectru.com.br

e – mail : spec@spectru.com.br





Índice

Introdução

Fatores que Influem no Tratamento Térmico

Recozimento

Recozimento Pleno ou Total

Recozimento Isotérmico ou Cíclico

Recozimento de Alívio de Tensões

Recozimento Caixa

Esferoídização

Têmpera

Revenido

Fragilidade do Revenido

Transformação da Austenita Retida

Têmpera Superficial

Têmpera Por Chama

Têmpera Por Indução

Revenido dos Aços Temperados Superficialmente

Austêmpera

Martêmpera

1. Introdução

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas.

As propriedades dos aços dependem, em princípio, da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando, em consequência na alteração mais ou menos pronunciada, de suas propriedades.

Cada uma das estruturas obtidas apresentam seus característicos próprios, que se transferem ao aço, conforme a estrutura ou combinação de estrutura ou combinação de estruturas presentes.

Pelo exposto, pode-se perfeitamente avaliar a importância dos tratamentos térmicos, sobretudo nos aços de alto carbono e nos que apresentam também elementos de liga.

De fato, se geralmente muitos aços de baixo e médio carbono são usados nas condições típicas do trabalho a quente, isto é, nos estados forjado e laminado, quase todos os aços de alto carbono ou com elementos de liga, são obrigatoriamente submetidos a tratamentos térmicos antes de serem colocados em serviço.

Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são os seguintes :

- *Remoção de tensões internas (oriundas de esfriamento desigual, trabalho mecânico ou outra causa) ;*

- *Aumento ou diminuição da dureza;*

- *Aumento da resistência mecânica;*

- *Melhora da ductilidade;*

- *Melhora da usinabilidade ;*

- *Melhora da resistência ao desgaste;*

- *Melhora das propriedades de corte;*

- *melhora da resistência à corrosão;*

- *Melhora da resistência ao calor;*

- *Modificação das propriedades elétricas e magnéticas.*

A simples enumeração dos objetivos acima evidencia claramente a importância e a necessidade do tratamento térmico no aço.

Em geral, a melhora de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com prejuízo de outras.

Por exemplo, o aumento da ductilidade provoca simultaneamente queda nos valores de dureza e resistência à tração. É necessário, pois, que o tratamento térmico seja escolhido e aplicado criteriosamente, para que os inconvenientes apontados sejam reduzidos ao mínimo. Não se verifica, pela simples aplicação de um tratamento térmico, qualquer alteração da composição química do aço.

Há casos, entretanto, em que interessa somente uma modificação parcial de certas propriedades mecânicas; por exemplo, melhorar superficialmente a dureza do aço. Esse efeito é conseguido pela alteração parcial da sua composição química.

Os tratamentos em que a combinação de operações de aquecimento e resfriamento é realizada em condições tais que conduzem a uma mudança parcial da composição química. Os tratamentos em que a combinação de operações de aquecimento e resfriamento é realizada em condições tais que conduzem a uma mudança parcial da sua composição química da liga e, conseqüentemente, uma modificação parcial de suas propriedades mecânicas, serão chamados de "tratamentos termo - químicos".

2. Fatores de Influência nos Tratamentos Térmicos

Antes de serem definidos e descritos os vários tratamentos térmicos, será feita uma rápida recapitulação dos diversos fatores que devem ser levados em conta na sua realização. Representando o tratamento térmico um ciclo tempo - temperatura, os fatores a serem inicialmente considerados são: aquecimento, tempo de permanência à temperatura e resfriamento. Além desses, outro de grande importância é a atmosfera do recinto de aquecimento, visto que a sua qualidade tem grande influência sobre os resultados finais dos tratamentos térmicos.

Aquecimento:

O caso mais freqüente de tratamento térmico do aço é alterar uma ou diversas de suas propriedades mecânicas, mediante uma determinada modificação que se processa na sua estrutura. Assim sendo, o aquecimento é geralmente realizado a uma temperatura acima da crítica, porque então tem-se a completa austenização do aço, ou seja total dissolução do carboneto de ferro gama: essa austenização é o ponto de partida para as transformações posteriores desejadas, as quais se processarão em função da velocidade de esfriamento adotada.

Na fase de aquecimento, dentro do processo de tratamento térmico, devem ser apropriadamente consideradas a velocidade de aquecimento e a temperatura máxima de aquecimento.

A velocidade de aquecimento, embora na maioria dos casos seja fator secundário, apresenta certa importância, principalmente quando os aços estão em estado de tensão interna ou possuem tensões residuais devidas a encruamento prévio ou ao estado inteiramente martensítico porque, nessas condições, um aquecimento muito rápido pode provocar empenamento ou mesmo aparecimento de fissuras.

Há casos, contudo, de aços fortemente encruados que apresentam uma tendência para excessivo crescimento de grão quando aquecidos lentamente dentro da zona crítica, sendo então conveniente realizar um aquecimento mais rápido através dessa zona de transformação. Nas mesmas condições estão, certos aços especiais que exigem temperatura final de austenização muito elevada; também nesses casos quando no aquecimento é atingida a zona crítica é necessário que a mesma seja ultrapassada mais ou menos rapidamente para evitar excessivo crescimento de grão de austenita.

A temperatura de aquecimento é mais ou menos um fator fixo, determinado pela natureza do processo e dependendo, é evidente, das propriedades e das estruturas finais desejadas, assim como da composição química do aço, principalmente do seu teor de carbono.

Quanto mais alta essa temperatura, acima da zona crítica, maior segurança se tem da completa dissolução das fases no ferro gama; por outro lado, maior será o tamanho de grão da austenita. As desvantagens de um tamanho de grão excessivo são maiores que as desvantagens de não ser ter total dissolução das fases no ferro gama, de modo que se deve procurar evitar temperaturas muito acima de linha superior (A_3) da zona crítica. Na prática, o máximo que se admite é 500°C acima de A_3 e assim mesmo para os aços hipoeutetóides. Para os hipereutetóides, a temperatura recomendada é inferior à da linha A_{cm} . A razão é óbvia; a linha A_{cm} sobe muito rapidamente em temperatura com o aumento do teor de carbono; para que haja, portanto, completa dissolução do carboneto de ferro no ferro gama, são necessárias temperaturas muito altas com conseqüente e excessivo crescimento de grão de austenita, condição essa mais prejudicial que a presença de certa quantidade de carboneto não dissolvido.

Tempo de permanência à temperatura de aquecimento.:

A influência do tempo de permanência do aço à temperatura escolhida de aquecimento é mais ou menos idêntica à da máxima temperatura de aquecimento, isto é, quanto mais longo o tempo à temperatura considerada de austenização, tanto mais completa a dissolução do carboneto de ferro ou outras fases presentes (elemento de liga) no ferro gama, entretanto maior o tamanho de grão resultante.

Procura-se evitar, pois, permanência à temperatura do estritamente necessário para que se obtenha uma temperatura uniforme através de toda a seção do aço e para que se consigam as modificações estruturais mais convenientes. Tempo muito longo pode também aumentar a oxidação ou descarbonetação do material. Sob o ponto de vista de modificação estrutural, admite-se que uma temperatura ligeiramente mais elevada seja mais vantajosa que um tempo mais longo a uma temperatura inferior, devido à maior mobilidade atômica. De qualquer modo, o tempo à temperatura deve ser pelo menos o suficiente a se ter sua uniformização através de toda a seção.

Resfriamento:

Este é o fator mais importante, pois é ele que determinará efetivamente a estrutura e, em conseqüência, as propriedades finais dos aços. Como pela variação da velocidade de resfriamento pode-se obter desde a perlita grosseira de baixa resistência mecânica e baixa dureza até a martensita que é o constituinte mais duro resultante dos tratamentos térmicos. Por outro lado, a obtenção desses constituintes não é só função da velocidade de resfriamento, dependendo também como se sabe, da composição do aço (teor em elemento de liga, deslocando a posição das curvas em C), das dimensões (seção) das peças, etc.

Os meios de esfriamento usuais são: ambiente do forno, ar e meios líquidos. O resfriamento mais brando é, evidentemente, o realizado no próprio interior do forno e ele se torna mais severo à medida que se passa para o ar ou para um meio líquido, onde a extrema agitação dá origem aos meios de esfriamento mais drásticos ou violentos.

Na escolha do meio de esfriamento, o fator inicial a ser considerado é o tipo de estrutura final desejada a uma determinada profundidade. Não só, entretanto. De fato, a seção e a forma da peça influem consideravelmente na escolha daquele meio. Muitas vezes, por exemplo, a seção da peça é tal que a alteração estrutural projetada não ocorre à profundidade esperada.

Algumas vezes a forma da peça é tal que um resfriamento mais drástico, como em água, pode provocar conseqüências inesperadas e resultados indesejáveis tais como empenamento e mesmo ruptura da peça. Um meio de resfriamento menos drástico, como óleo, seria o indicado sob o ponto de vista de empenamento ou ruptura, porque reduz o gradiente de temperatura apreciavelmente durante o resfriamento, mas não podem satisfazer sob o ponto de vista de profundidade de endurecimento. É preciso, então conciliar as duas coisas: resfriar adequadamente para obtenção da estrutura e das propriedades desejadas à profundidade prevista e, ao mesmo tempo, evitar empenamento distorção ou mesmo ruptura da peça quando

submetida ao resfriamento. Tal condição se consegue com a escolha apropriada do aço.

De qualquer modo, o meio de resfriamento é fator básico no que se refere à reação da austenita e em consequência, aos produtos finais de transformação.

Os meios de resfriamento mais utilizados são : *soluções aquosas, águas, óleo e ar.*

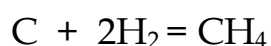
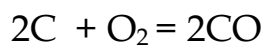
Outro fator que deve ser levado em conta é o da circulação do meio de resfriamento ou agitação da peça no interior, pois ocorrer o empenamento das peças e até mesmo fissuras para isso temos que usar meios menos drásticos como óleo, água aquecida ou ar, são banhos de sal ou banho de metal fundido.

Atmosfera do forno.:

Nos tratamentos térmicos dos aços, deve-se evitar dois fenômenos muito comuns e que podem causar sérios aborrecimentos: a oxidação que resulta na formação indesejada da “casca de óxido” e a descarbonetação que pode provocar a formação de uma camada mais mole na superfície do metal. As reações de oxidação mais comuns são:



Os agentes descarbonetantes usuais são os seguintes:



Tais fenômenos de oxidação e de descarbonetação, são evitados pelo uso de uma atmosfera protetora ou controlada no interior do forno, a qual, ao prevenir a formação da “casca de óxido”, torna desnecessário o emprego de métodos de limpeza

e, ao eliminar a descarbonetação, garante uma superfície uniformemente dura e resistente ao desgaste.

Escapa à finalidade desta obra uma descrição completa dos vários tipos de atmosfera protetora usada nos tratamentos térmicos do aço.

Às vezes, para obter os mesmos resultados proporcionados pelas atmosferas protetoras, usa-se como meio de aquecimento banhos de sal fundido; o tratamento térmico dos aços rápidos constitui o exemplo mais importante.

Os tratamentos térmicos usuais dos aços são: recozimento, normalização, têmpera, revenido, colascimento e os tratamentos isotérmicos.

3. Recozimento

É o tratamento térmico realizado com o fim de alcançar um ou vários seguintes objetivos: remover tensões devidas ao tratamentos mecânico a frio ou a quente, diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço, alterar as propriedades mecânicas como resistência, ductilidade etc., modificar os característicos elétricos e magnéticos, ajustar o tamanho de grão, regularizar a textura bruta, remover gases, produzir uma microestrutura definida, eliminar enfim os efeitos de quaisquer tratamento térmicos ou mecânicos a que o aço tiver sido anteriormente submetido.

O tratamento térmico genérico recozimento abrange os seguintes tratamentos específicos:

Recozimento total ou pleno:

Que constitui no aquecimento do aço acima da zona crítica, durante o tempo necessário e suficiente para se ter solução do carbono ou dos elementos de liga no ferro gama, seguindo de um resfriamento lento, realizado ou mediante o controle da velocidade de resfriamento do forno ou desligado-se o mesmo e deixando que o aço esfrie ao mesmo tempo que ele.

A temperatura para recozimento pleno é de mais ou menos 50°C acima do limite superior da zona crítica - linha A_3 - para aços hipoeutetóides e acima do limite inferior - linha A_1 - para os hipereutetóides. Para estes aços, não se deve ultrapassar a linha superior A_{cm} porque, no resfriamento lento posterior, ao ser atravessada novamente essa linha, forma-se-ia nos contornos dos grãos de ausência um invólucro contínuo e frágil de carboneto. Os microconstituintes que resultam do recozimento

pleno são: perlita e ferrita para aços hipoeutetóides, cementita e perlita para aços hipereutetóides e perlita para os aços eutetóides.

O recozimento total requer um tempo muito longo de modo que às vezes, é conveniente substituí-lo pelo :

Recozimento isotérmico ou cíclico:

Que consiste no aquecimento do aço nas mesmas condições que para o recozimento total, seguido de um esfriamento rápido do aço nas mesmas condições que para o recozimento total, seguindo de um resfriamento rápido até uma temperatura situada dentro da porção superior do diagrama de transformação isotérmico, onde o material é mantido durante o tempo necessário a se produzir a transformação completa. Em seguida, o resfriamento até a temperatura ambiente pode ser apressado.

Os produtos resultantes desse tratamento térmico são também perlita e ferrita, perlita e cementita ou só perlita . A estrutura final, contudo, é mais uniforme que no caso do recozimento pleno.

Recozimento para alívio de tensões:

Que consiste no aquecimento do aço a temperaturas abaixo do limite inferior da zona crítica. O objetivo é aliviar as tensões originadas durante a solidificação ou produzidas em operações de endireitamento, corte por chama, soldagem ou usinagem . Essas tensões começam a ser aliviadas a temperaturas logo acima da ambiente; entretanto, é aconselhável aquecimento lento até pelo menos 500° C para garantir os melhores resultados. De qualquer modo, a temperatura de aquecimento deve ser a mínima compatível com o tipo e as condições da peça, para que não se modifique sua estrutura interna, assim como não se produzam alterações sensíveis de suas propriedades mecânicas.

Recozimento em caixa

Que é o tratamento utilizado para a proteção de grandes massas ou grande número de peças de aço, de modo a impedir que a superfície acabada das mesmas seja afetada por oxidação ou outro efeito típico de tratamento térmico. As peças - tais como tiras e chapas laminadas a frio, portanto no estado encruado - são colocadas no interior do forno, em recipientes vedados. Geralmente faz-se aquecimento lento a temperaturas abaixo da zona crítica, variando de 600°C.

4. Esferoidização

Que consiste num aquecimento e resfriamento subsequente, em condições tais a produzir uma forma globular ou esferoidal de carboneto no aço. Há várias maneiras de produzir tal estrutura, a saber:

- a) aquecimento a uma temperatura logo acima da linha inferior de transformação, seguindo de esfriamento lento;
- b) aquecimento por tempo prolongado a uma temperatura logo abaixo da linha inferior de zona crítica. Este tratamento é também chamado de “recozimento subcrítico”;
- c) aquecimento e resfriamento alternados entre temperaturas que estão logo acima e logo abaixo da linha de transformação inferior.
- d) A esferoidização objetiva melhorar a usinabilidade de aços de alto carbono.

5. Normalização

Consiste no aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica, seguindo de resfriamento no ar. Para os aços hipoeutetóides, pode-se admitir que a



temperatura de aquecimento ultrapasse a linha A_3 e para os hipereutetóides a linha A_{cm} sem os inconvenientes, neste último caso, no esfriamento ao ar que se seguem da formação do invólucro frágil de carbonetos.

A normalização visa refinar a granulação grosseira de peças de aço fundido principalmente; freqüentemente, e com o mesmo objetivo, a normalização é aplicada em peças depois de laminadas ou forjadas. A normalização é ainda usada como tratamento preliminar à têmpera e ao revenido, justamente para produzir estrutura mais uniforme do que a obtida por laminação.

Os constituintes que se obtêm na normalização são ferrita e perlita fina ou cementita e perlita fina. Eventualmente, dependendo do tipo de aço, pode-se obter a bainita.

6. Têmpera

Consiste no resfriamento rápido do aço de uma temperatura superior à sua temperatura crítica (mais ou 50°C acima da linha A_1 os hipereutetóides) em um meio como óleo, água, salmoura ou mesmo ar).A velocidade de resfriamento, nessas condições, dependerá do tipo de aço, da forma e das dimensões das peças.

Como na têmpera o constituinte final desejado é a martensita, o objetivo, o objetivo dessa operação, sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, é o aumento da dureza deve verificar-se até uma determinada profundidade.

Resultam também da têmpera redução da ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição), da tenacidade e o aparecimento de apreciáveis tensões internas. Tais inconvenientes são atenuados ou eliminados pelo revenido.

Para que a têmpera seja bem sucedida vários fatores devem ser levados em conta.

Inicialmente, a velocidade de esfriamento deve ser tal que impeça a transformação da austenita nas temperaturas mais elevadas, em qualquer parte da peça que se deseja endurecer.

7. Revenido

O revenido é o tratamento térmico que normalmente sempre acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta; além de aliviar o remover as tensões internas, corrige as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductibilidade e resistência ao choque.

O aquecimento na martensita permite a reversão do reticulado instável ao reticulado estável cúbico centrado, produz reajustamento internos que aliviam as tensões e, além disso, uma precipitação de partículas de carbonetos que cresce e se aglomeram de acordo com a temperatura e o tempo .

Conforme a temperatura de revenido, verificam-se as seguintes transformações:

- Entre 25° e 100°C , ocorre segregação ao uma redistribuição do carbono em direção a discordância; essa pequena precipitação localizada do carbono pouco afeta a dureza. O fenômeno é predominante em aços de alto carbono;

- Entre 100° a 250°C , as vezes chamado primeiro estágios do revenido - ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo epsilon, de fórmula $Fe_{2-3}C$, e reticulado hexagonal; este carboneto pode estar ausente em aços de baixo carbono e de baixo teor em liga; a dureza Rockwell começa a cair, podendo chegar a 60;

- Entre 200° a 300°C, as vezes chamado de segundo estágio do revenido - ocorre transformação de austenita retida em bainita; a transformação ocorre somente em aços-carbono de médio e alto teor de carbono; a dureza Rockwell continua a cair ;

- Entre 250° a 350°C, as vezes é chamado de terceiro estágio do revenido - forma-se um carboneto metaestável, de fórmula Fe_5C_2 ; quando ocorre esta transformação, verifica-se em aços de alto carbono; a estrutura visível ao microscópio



é uma massa escura, que era chamada “troostita” , denominação não mais utilizada; a dureza Rockwell continua caindo, podendo atingir valores pouco acima a 50;

- Entre 400° a 600°C, ocorre uma recuperação da subestrutura de discordância; os aglomerados de Fe₃C passam a uma esferoidal, ficando mantida uma estrutura de ferrita fina acicular; a dureza Rockwell cai para valores de 45° a 25°;

- Entre 500° a 600°C, somente no aço contendo Ti, Cr, Mo, V, Nb ou W, há precipitação de carboneto de liga; a transformação é chamada “endurecimento secundário” ou quarto estágio do revenido;

- Finalmente, entre 600° a 700°C , ocorre recristalização de crescimento de grão; a cementita precipitada apresenta forma nitidamente esferoidal; a ferrita apresenta forma equi-axial; a estrutura é freqüentemente chamada “esferoidita” e caracteriza-se por ser por muito tenaz e de baixa dureza, variando de 5 a 20 Rockwell C.

Pelo que acaba de ser exposto, percebe-se que a temperatura de revenido pode ser escolhido de acordo com a combinação de propriedades mecânicas que se deseja no aço temperado.

Fragilidade do revenido.:

Diversos aços, principalmente aço-liga de baixo teor em liga, caracterizam-se por adquirirem fragilidade, quando são aquecidos na faixa de temperaturas 375-575°C, ou quando são resfriados lentamente através dessa faixa . Este fenômeno é conhecido com o nome de “fragilidade de revenido”. A fragilidade ocorre mais rapidamente na faixa 450-475°C. Os aços-carbono comuns contendo manganês abaixo de 0,30% não apresentam o fenômeno. Contudo, aços contendo apreciáveis quantidades de manganês, níquel e cromo, além de uma ou mais impurezas tais como antimônio, fósforo, estanho ou arsênio, são suscetíveis ao fenômeno.

Não se tem uma explicação clara desse fato, embora se tenha observado concentração de impurezas nos contornos dos grãos o que comprova que é necessária a presença dessas impurezas, juntamente com um elemento de liga, para provocar esta fragilidade.

Esta é somente revelada no ensaio de resistência ao choque, pois as outras propriedades mecânicas e própria microestrutura não são afetadas.

A não ser que se utilize matérias -primas muito puras, os aços Cr-Ni são mais suscetíveis ao fenômenos.

Aparentemente, o molibdênio, em teores 0,5 a 1,0% retarda a suscetibilidade à fragilidade de revenido.

Os aços que se tornaram frágeis, devido às causas apontadas, podem voltar ao seu normal e ter a tenacidade por assim dizer restaurada, pelo aquecimento em torno de 600°C ou acima, seguido de resfriamento rápido, abaixo de aproximadamente 300°C.

Mencione-se, mais uma vez, o fato de que a eliminação de impurezas indutoras do fenômeno evita a fragilidade. Como o antimônio é aparentemente o elemento mais prejudicial ele deve ser evitado a qualquer custo. Na prática, tanto o antimônio como o arsênio não estão comumente presentes. Desse modo, a maior atenção de ser dirigida ao estanho e ao fósforos, cujas quantidades não devem ultrapassar 0,005% e 0,001% respectivamente.

Uma última prática para reduzir a severidade da fragilidade de revenido e manter o aço por longo tempo numa faixa de temperaturas entre Ac_1 e Ac_3 . Contudo, esse tratamento, também chamado “inter-crítico” , só deve ser aplicado em caso específico.

Transformação da austenita retida:

Como já se viu, dependendo da composição do aço, pode-se ter à temperatura ambiente uma certa de quantidade “austenita retida” ou “austenita



residual” que, ao se transformar posteriormente, pode ocasionar o fenômeno de instabilidade.

A transformação dessa austenita residual é realizada por intermédio de diversos procedimentos.

Um deles é o revenido. Como se viu, o chamado “segundo estágio de revenido” - entre 200° e 300°C - transforma a austenita retida em bainita. Esta reação do revenido prevalece somente em aços de médio ou alto carbono. Na realidade, no revenido, para a obtenção de um certo grau de estabilidade dimensional, seria necessário emprega-se a máxima temperatura de aquecimento permissível, tendo em vista a dureza desejada, de modo a desenvolver-se a contração máxima possível. Em alguns tipos complexos de aços - como os aços rápidos - surge a necessidade de mais de uma revenido, visto que no resfriamento posterior ao primeiro revenido, forma-se martensita que deve, em conseqüência, ser revenida, o que se faz através de um segundo aquecimento do aço.

Outro método para transformar a austenita retida seria um artifício que se poderia chamar de “sazonamento”, ou seja, manutenção das peças tratadas em estoque por um determinado período de tempo ou submetendo-as repetidamente aos extremos de temperaturas esperadas em serviço.

Procura-se, assim, forçar a ocorrência das modificações dimensionais antes de se utilizar as peças, o que, entretanto, raramente se consegue.

Outro método que possibilita a transformação da austenita retida é a promoção de um certo grau de encruamento nas peças, o que, obviamente, não serve para garantir a estabilidade dimensional.

Choque mecânico tem sido usado como o mesmo objetivo com resultados limitados, contudo, devido à dificuldade do seu controle.

Finalmente, freqüentemente têm sido usados ciclos acelerados de envelhecimento, com resultados aproximadamente idênticos aos obtidos do revenido comum.

8. Têmpera Superficial

O endurecimento superficial dos aços, em grande número de aplicações de peças de máquinas, é, freqüentemente, mais conveniente que seu endurecimento total pela têmpera normal, visto que, nessas aplicações objetiva-se apenas a criação de uma superfície dura e de grande resistência ao desgaste e à abrasão.

O endurecimento superficial pode ser produzido por vários métodos, a saber :

- a) Tratamento mecânico da superfície mediante o qual se obtém uma superfície encruada, com resistência e dureza crescente, em função da sua intensidade;
- b) Tratamento químico da superfície do aço, mediante métodos como cromeação dura, siliconização e outros;
- c) tratamentos termo-químicos, tais como cementação, nitretação e carbonitretação ;
- d) têmpera superficial .

Os tratamentos a e b não possuem nada em comum com os tratamentos térmicos, motivo pelo qual não serão abordados na presente obra.

A têmpera superficial consiste em produzir-se uma têmpera localizada apenas na superfície das peças de aço, que assim adquirirá as propriedades e características típicas da estrutura martensítica . Vários são os motivos que determinam a preferência do endurecimento superficial em relação ao endurecimento total:

- ♦ dificuldade, sob os pontos de vista prático e econômico, de tratar-se de peças de grandes dimensões nos fornos de tratamento térmico convencional;
- ♦ possibilidade de endurecer-se apenas na áreas críticas de determinadas peças, como por exemplo, dentes de grandes engrenagens, guias de máquinas operatrizes, grandes cilindros, etc;
- ♦ e vários outros motivos.

Por outro lado, as propriedades resultantes da têmpera superficial são:





- ♦ superfícies de alta dureza e resistência ao desgaste;
- ♦ boa resistência à fadiga por dobramento,
- ♦ boa capacidade para resistir cargas de contato;
- ♦ resistência satisfatória ao empenamento.

Algumas recomendações são necessárias para obtenção dos melhores resultados:

- ♦ procurar obter camadas endurecidas pouco profundas; de fato, profundidades maiores, desnecessárias podem provocar o empenamento ou fissuras de têmpera ou desenvolver tensões residuais excessivamente altas, sob a camada endurecida;

- ♦ levar em conta que a espessura da camada endurecida depende de cada caso específico, tendo em vista as resistências ao desgaste e à fadiga desejadas, a carga de serviço das peças, as dimensões destas e, inclusive o equipamento disponível; como exemplo deve-se lembrar que se a camada endurecida corresponder a uma fração significativa da espessura da peça, podem resultar tensões residuais de compressão de pequeno valor nessa camada endurecida, de modo a ter-se melhora insignificante na resistência à fadiga.

As temperaturas de aquecimento devem proporcionar a autenitização do aço, pois somente assim obtém-se no resfriamento posterior a martensita.

As temperaturas, os meios de resfriamento recomendados e as durezas resultantes para aços-carbono são os seguintes:

0,30%C- 900/975^o C - água - 50 RC

0,35%C- 900^oC - água - 52 RC

0,40%C- 870/900^o C - água - 55 RC

0,45%C- 870/900^o C - água - 58 RC

0,50%C- 870^oC - água - 60 RC

0,60%C- 850/875^o C - água - 64 RC

óleo - 62 RC



9. Os processos usuais de têmpera são

Têmpera por chama

Neste processo aquece-se rapidamente, acima da temperatura crítica, a superfície a ser endurecida, por intermédio de uma chama de oxiacetileno, seguindo-se um jato de água, em forma de borrifo, de modo a produzir uma camada endurecida até a profundidade desejada.

Existe em inúmeros dispositivos utilizados na operação. No caso mais simples de formas cilíndricas, leva-se a efeito o tratamento mediante a utilização de um dispositivo semelhante ao torno, entre as pontas do qual é colocada a peça, sendo a torcha de oxiacetileno e o bocal de água colocados no *carro* do torno.

A peça gira a uma velocidade periférica determinada, ao mesmo que a torcha, dimensionada de modo a abranger a área que se deseja endurecer, aquece sucessivamente a superfície, seguindo-se imediatamente o resfriamento pela água. Com esta disposição, há probabilidade de se formarem faixas mais moles com alguns milímetros de largura. Para evitar esse inconveniente, prefere-se aquecer a superfície com uma tocha de chama múltipla e formar anular, que se movimenta ao longo de peça girando rapidamente. O bocal de resfriamento apresenta também uma forma anular. A espessura da camada endurecida pode variar desde apenas uma casca superficial até cerca de 10 mm.

O dispositivo descrito, adaptado em máquina do tipo de um torno, dá uma idéia da maneira de realizar-se a têmpera superficial por chama. A figura 65 mostra mais claramente três métodos de aplicação desse tipo de endurecimento superficial .

Além desses, o método mais simples é o chamado *estacionário*, em que se aquecem apenas localmente áreas selecionadas da peça, com subsequente resfriamento, ou por borrifo ou até mesmo por imersão.

Este método mais simples, porque não exige equipamento elaborado, além evidentemente do dispositivo de chama e, eventualmente, dispositivo de fixação e de controle do tempo para permitir um aquecimento mais uniforme.

As velocidades de aquecimento por chamas de oxiacetileno, variam de 5 a 30 cm/minutos e, normalmente, o meio de resfriamento é água à temperatura ambiente, ou eventualmente quando se deseja uma têmpera menos severa, ar.

O método “giratório” é empregado em peças de secção circular ao semicircular, tais como rodas, cames e pequenas engrenagens na sua forma mais simples utiliza-se um mecanismo para girar a peça num plano horizontal ou vertical, ficando sua superfície sujeita à ação da chama.

Desde que se consiga um aquecimento uniforme, a velocidade de rotação é relativamente pouco importante.

Depois que a superfície da peça tiver sido aquecida - por intermédio de um ou mais cabeçotes de chamas - a chama é extinta ou retirada e a peça é resfriada por imersão, borrifo ou por uma combinação de ambos os métodos.

Em contraste com o método progressivo, em que o gás combustível usado e geralmente acetileno - devido sua elevada temperatura de chama e rápido aquecimento - no método giratório, resultados satisfatórios são obtidos com gás natural (metana), propana, além de gás fabricado .

Finalmente, o método “combinado progressivo - giratório” alia os dois anteriores: a peça é girada, como no método giratório ao mesmo tempo que a chama se movimenta de uma extremidade à outra. Somente uma faixa estreita de circunferência é aquecida progressivamente, à medida que a chama se move de uma extremidade à outra da peça. O resfriamento segue imediatamente atrás da chama.

Vários gases combustíveis podem ser usados na têmpera por chama.

Têmpera por indução:

O calor para aquecer uma peça pode ser gerado na própria peça por indução eletromagnética. Assim se uma corrente alternada flui através de um indutor ou bobina de trabalho, estabelece-se nesta um campo eletromagnético altamente concentrado, o qual induz um potencial elétrico na peça a ser aquecida envolvida pela bobina e, como a peça representa um circuito fechado, a voltagem induzida provoca o fluxo de corrente. A resistência da peça ao fluxo da corrente induzida causa aquecimento por perdas I^2R .



O modelo de aquecimento obtido por indução depende da forma da bobina de indução que produz o campo magnético, do número de voltas da bobinas, da frequência de operação e da forma elétrica da corrente alternada.

A velocidade de aquecimento obtida com bobinas de indução depende da intensidade do campo magnético ao qual se expõe a peça. Nesta, a velocidade de aquecimento é função das correntes induzidas e da resistência ao seu fluxo. Quando se deseja aquecimento a pequena profundidade ou seja camada endurecida de pequena espessura, adota-se geralmente corrente de alta frequência; baixa ou intermediárias são utilizadas em aplicações onde se deseja aquecimento a maior profundidade.

Do mesmo modo a maioria das aplicações de têmpera superficial exige densidade de força (KW/cm^2) relativamente alta e ciclos de aquecimentos curtos, de modo a restringir o aquecimento à área superficial.

Camadas endurecidas da ordem de 0,25 mm são obtidas, mediante a aplicação de correntes de frequência elevada - 100hKz a 1Mhz - alta densidade de força e tempo reduzido. Camadas mais espessas, de 12 mm ou mais, são obtidas por correntes de frequência baixa - 3 a 25khz - e períodos de tempo mais longos.

Em resumo, o controle da profundidade de aquecimento é conseguido, jogando-se com as seguintes variáveis:

- forma da bobina;
- distância ou espaço entre a bobina de indução a peça;
- taxa de alimentação de força;
- frequência;
- tempo de aquecimento.

Nós temos vários tipos de bobinas de indução para alta frequência, um dos tipos consiste solenóide para aquecimento externo; entre os vários tipos temos vários e diferentes processos aplicados no aquecimento superficial por indução, pode se citar:

a) Têmpera simultânea, em que a peça a ser temperada é feita girar dentro da bobina; uma vez atingindo o tempo necessário para o aquecimento, a força é desligada e a peça imediatamente resfriada por um jato de água;

b) têmpera contínua, em que a peça, ao mesmo tempo que gira no interior da bobina de indução, move-se ao longo do seu eixo, de modo a se ter uma aplicação progressiva de calor. O dispositivo de resfriamento está montado a certa distância da bobina.

10. Outros métodos de têmpera superficial - entre eles podem ser citados.:

- ♦ - raios laser e raios eletrônicos, os quais podem ser dirigidos a zonas muito pequenas e precisamente localizadas. Consegue-se assim um aquecimento de grande intensidade. O aquecimento eletrônico, contudo exige uma câmara de vácuo, onde a peça é colocada;
- ♦ - aquecimento por resistência de alta frequência, por exemplo em peças com forma de barras longas.

11. Revenido de aços temperados superficialmente

Após a têmpera superficial, as peças são submetidas a um revenido, pois qualquer que tenha sido o tratamento de têmpera adotado, é necessário revenir a martensita. Geralmente, este revenido é levado a efeito a temperaturas baixas, objetivando-se sobre tudo o alívio das tensões originadas.

Considerando que os processos de têmpera superficial são adotados devido a características dimensionais das peças ou por outros motivos, pode-se também concluir se deve igualmente preferir os métodos de chama ou por indução para revenir o material.

No caso, por exemplo da têmpera superficial por chama em peças de grandes dimensões, através do método progressivo, o revenido é realizado imediatamente após o resfriamento, pelo reaquecimento da superfície temperada com uma chama colocada a pequena distância do dispositivo de resfriamento.

Em peças grandes, temperadas até uma profundidade de cerca de 6 mm ou mais, o calor residual presente depois do resfriamento, como já foi mencionado, pode ser suficiente para aliviar as tensões da têmpera, tornando-se desnecessário um revenido subsequente, como operação à parte.

12. Aços recomendados na têmpera superficial

Esse assunto já foi abordado. Os aços-carbono comuns, na faixa de 0,30 a 0,60% de carbono, são os mais usados nas aplicações de têmpera por chama, podendo ser endurecidos inteiramente em seções até aproximadamente 12,5 mm. O mesmo pode-se dizer em relação à têmpera superficial por indução.

freqüentemente usam-se aços ligas, quando se deseja maior resistência do núcleo e porque os aços-carbono não são adequados para obtenção dessa resistência em determinadas seções, ou ainda porque, devido ao peso e à forma da peça e possibilidade de empenamento ou fissuração, não se recomenda o uso de aço-carbono resfriado em água.

Finalmente, os aços de granulação fina devem ser preferidos, visto que a granulação grosseira é mais suscetível de fissuração, durante o resfriamento posterior.

13. Austêmpera e Martêmpera

Austêmpera

Este tratamento tem substituído, em diversas aplicações, a têmpera e o revenido. Baseia-se no conhecimento das curvas em C e aproveita as transformações da austenita que podem ocorrer a temperatura constante. Por esse motivo a austenita é considerada um *tratamento isotérmico* .

O constituinte que se origina na austêmpera, pelo esfriamento da austenita a uma temperatura constante é a *bainita*, que como se viu, tem propriedades idênticas,

senão mesmo superiores, às das estruturas martensíticas revenidas . Como nesse tratamento evita-se a formação direta da martensita, eliminam-se os inconvenientes que essa estrutura apresenta quando obtida pela têmpera direta e que são somente eliminados pelo revenido posterior.

O aço é austemperado mediante a seguinte seqüência de operações e transformações:

- a) aquecimento a uma temperatura dentro da faixa de austenitização - geralmente de 785°C a 870°C;
- b) resfriamento em um banho mantido a uma temperatura constante, geralmente entre 260°C e 400°C ;
- c) permanência no banho a essa temperatura, para ter-se, isotermicamente, a transformação da austenita em bainita;
- d) resfriamento até a temperatura ambiente, geralmente em ar tranqüilo.

As estruturas bainíticas obtidas na austêmpera, caracterizam-se pela excelente ductilidade e resistência ao choque, com durezas elevadas.

Para assegurar uma completa transformação da austenita em bainita, o material deve ser resfriado a partir da temperatura de austenização até a temperatura do banho de austêmpera muito rapidamente para evitar que outra transformação da austenita em bainita.

A grande vantagem de austêmpera e o revenido comuns reside no ato que, devido à estrutura bainítica forma-se diretamente da austenita a temperatura que mais alta que a martensita, as tensões internas resultantes são muito menores; conseqüentemente, não há praticamente distorção ou empenamento e do mesmo modo a possibilidade de aparecimento de fissuras de têmpera é quase que completamente eliminada.

Entretanto, nem todos os tipos de aço, assim como nem todas as seções de peças, apresentam resultados positivos da austêmpera.

No que se refere aos tipos de aço, os mais convenientes para a austêmpera são, em linhas gerais, os seguintes.:

- a) aços-carbono comuns, contendo (0,50 a 1,00% de carbono e um mínimo de 0,60% de manganês;

b) aços-carbono de alto-carbono, contendo mais do que 0,90% de carbono e, possivelmente, um pouco menos do que 0,60% de manganês;

c) certos aços-carbono (como, por exemplo, o 1041), com carbono abaixo de 0,50%, mas com manganês na faixa 1,00 a 1,65%;

d) certos aços-liga, de baixo teor em liga (tais como a série 5100) contendo carbono acima de 0,30% os aços das série 1300 a 4000 com teores de carbono acima de 0,40%; e outros aços como 4140, 6145 e 9440.

O banho de austêmpera mais indicado e usado é sal fundido, constituído essencialmente de nitratos de sódio e de potássio, e eventualmente nitrato de sódio porque transfere calor rapidamente; sua viscosidade é uniforme numa larga faixa de temperatura, elimina virtualmente o problema de uma barreira de vapor durante o estágio inicial do resfriamento, permanece estável às temperaturas de operação e é completamente solúvel em água facilitando assim as operações subseqüentes de limpeza.

A aplicação do tratamento de austêmpera é feita em peças fabricadas a partir de barras de pequeno diâmetro ou de tiras e chapas de pequena espessura. Aplica-se em particular em peças de pequena seção de aço-carbono exigindo uma tenacidade excepcional uma dureza média próxima de 50 RC. Entretanto, deve-se entender que, muitas vezes, é mais importante que a austêmpera produza nas peças as desejadas e esperadas propriedades mecânicas, do que uma estrutura inteiramente bainítica.

A bainita apresenta algumas variações estruturais. A chamada “bainita superior”, em aços hipoeutetóides, apresenta-se como uma pilha de tiras ou agulhas de ferrita; o excesso de carbono que resulta da transformação da austenita, fica acumulado nesta austenita, sendo que uma parcela desta, enriquecida de carbono da austenita, na forma de cementita, resultando um agregado não lamelar de ferrita e cementita, o qual constitui a “bainita”.

A chamada “bainita inferior” forma-se a temperaturas abaixo de aproximadamente 350° C. Sua estrutura difere da correspondente à bainita superior. No lugar de tiras de ferrita, surgem placas. A fase carboneto que se forma inicialmente é epsilon e não propriamente a cementita. Contudo, durante o tempo que o aço fica na temperatura de formação da bainita, esse epsilon muda para cementita. Essa mudança depende do teor de liga presente nos aços.

Martêmpera

É esse tratamento usado principalmente para diminuir a distorção ou empenamento que produz durante o resfriamento rápido de peças de aço. Compreende a seguinte seqüência de operações.:

- a) aquecimento a uma temperatura dentro da faixa de austenização;
- b) resfriamento em óleo quente ou sal fundido mantido a uma temperatura correspondente parte superior (ou ligeiramente acima) da faixa martensítica;
- c) manutenção no meio de resfriamento até que a temperatura através de toda a seção do aço se torne uniforme;
- d) resfriamento (geralmente no ar) a velocidade moderada, de modo a prevenir qualquer grande diferença de temperatura entre a parte externa e a parte interna da seção.

Tem-se assim formação da martensita de modo bastante uniforme através de toda seção da peça, durante o resfriamento até a temperatura ambiente, evitando-se e conseqüência, a formação de excessiva quantidade de tensões residuais.

A martêmpera é usada principalmente para diminuir a possibilidade de empenamento das peças. Quando a endurecibilidade do aço é adequada aplicação da martêmpera resulta em controle dimensional melhor do que mediante resfriamento convencional por têmpera, visto que as variações dimensionais são mais uniformes. Do mesmo modo, desenvolve-se menor quantidade de tensões residuais do que na têmpera convencional, possui as maiores variações térmicas ocorrem enquanto o aço ainda está na condição austenítica relativamente plástica e porque a transformação final e as modificações térmicas ocorrem através de toda a seção aproximadamente no mesmo tempo.

Como na austêmpera, na martêmpera também se deve levar em conta a espessura ou seção das peças a serem tratadas. Entretanto, para algumas aplicações não é absolutamente necessária uma estrutura inteiramente martensítica, aceitando-se uma dureza central 10 unidades Rockwell C abaixo da máxima que se pode obter, para um determinado teor de carbono.

O processo de martêmpera depende - como, aliás, qualquer outro tipo de tratamento térmico - de um número de variáveis, que devem ser rigorosamente controladas, tais como, a temperatura de austenitização, que - entre outros fatores -



Spectru Instrumental Científico Ltda

Divisão Metalurgia / Tratamento Térmico / Ensino

afeta a própria temperatura correspondente a M_i ; atmosfera controlada durante a austenização, pois casca de óxido pode representar como que a barreira para o resfriamento uniforme no banho de óleo ou de sal fundido; temperatura dos banos de martêmpera, que depende da espessura da seção, etc.

Há um processo de martêmpera, que é chamado martêmpera modificada, o qual difere da martêmpera convencional pelo fato da temperatura do banho de martêmpera ser baixa - variando desde pouco abaixo M_i , até cerca de 93°C . Por esse processo, conseguem-se velocidades de resfriamento mais rápidas, o que é importante para aços de endurecibilidade inferior. Nessas condições, a martêmpera modificada é aplicada a uma maior quantidade de composições de aço.

O processo da martêmpera é freqüentemente chamado também de "têmpera interrompida".

Conclusão

Nosso trabalho teve por objetivo mostrar a importância do tratamento térmico e suas aplicações, visando sempre a integração de processos adequados para que tenhamos um bom resultado do tratamento aplicado.



Av. Paulo de Frontin, 631 – CEP 20261 – 241 – Rio Comprido – Rio de Janeiro
TELS.: (21) 2293 – 5016 – FAX: (21) 2293 – 3607 – CEL.: (21) 9983 - 4887

www.spectru.com.br

e – mail : spec@spectru.com.br

