

# Trattamenti termici per gli acciai

I trattamenti termici sono una serie di riscaldamenti e raffreddamenti a temperatura , velocità e tempo di permanenza controllati cui vengono sottoposti gli acciai allo scopo di conferire loro delle desiderate caratteristiche meccaniche ( resistenza, durezza, resilienza, malleabilità )

I trattamenti termici fondamentali per gli acciai sono:

- Ricottura
- Normalizzazione
- Tempra
- Rinvenimento
- Bonifica ( tempra seguita dal rinvenimento )

A questi si aggiungono i trattamenti termici di indurimento superficiale che si utilizzano per ottenere componenti meccanici con superfici dure e parte interna del metallo meno fragile quindi caratterizzata da una maggiore resilienza.

- Tempra superficiale
- Cementazione
- Nitrazione

La variazione delle caratteristiche meccaniche degli acciai attraverso i trattamenti termici si basa sul principio di ottenere configurazioni cristalline, che sarebbero stabili ad alte temperature, bloccandole a basse temperature ( diciamo fino a 200 °C ) tramite un raffreddamento più o meno rapido.

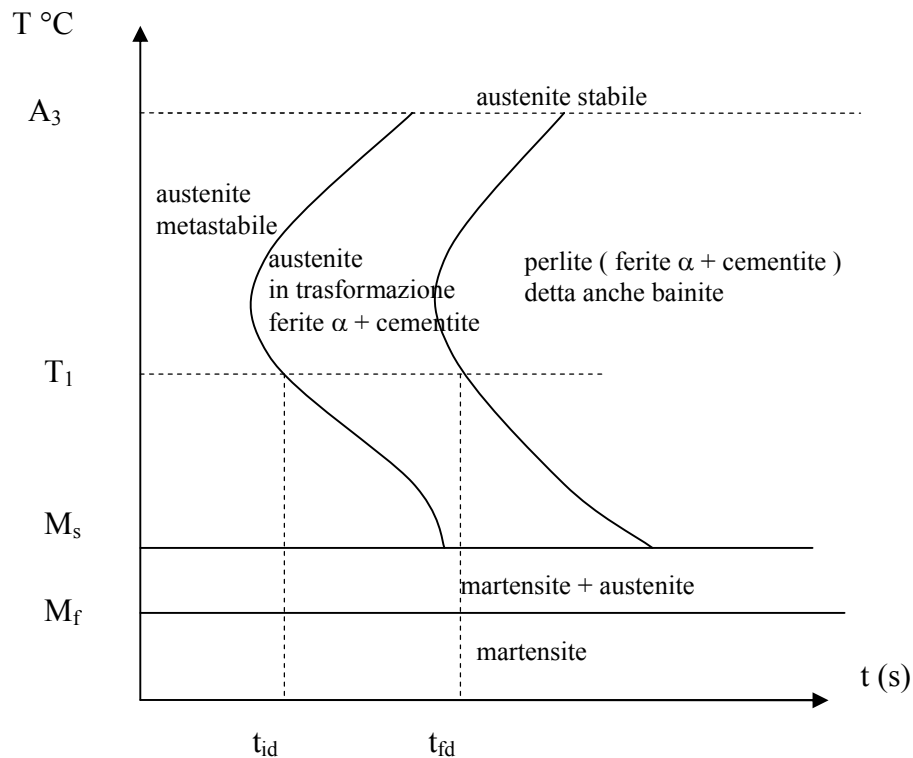
Per ottenere l'aumento di durezza e resistenza, occorre distorcere il reticolo cristallino ( sfruttando il solito principio che per allungare ulteriormente un elastico già tirato è necessaria una forza maggiore rispetto a quello non tirato ). La distorsione nel reticolo si determina portando l'acciaio ad una temperatura in cui presenta il reticolo cristallino a celle cubiche a facce centrate, il quale ha una capacità di ospitare atomi di carbonio superiore a quella del reticolo a celle cubiche a corpo centrato. Per ottenere le celle a facce centrate, occorre riscaldare a temperature che dipendono dalla composizione dell'acciaio così come riportato sul diagramma ferro-carbonio. A tali temperatura, l'acciaio assume la denominazione di austenite come già detto a proposito dello studio del diagramma Fe-C. Raffreddando rapidamente, nel passaggio a cella cubica corpo centrato, gli atomi di carbonio ospitati dalle celle facce centrate non hanno il tempo di uscirne. Il risultato è un reticolo a celle corpo centrato che non potrebbero contenere il carbonio effettivamente presente. Gli atomi di carbonio in eccesso determinano la forte distorsione del reticolo e l'acciaio che ne risulta è più duro e resistente di quanto fosse prima del trattamento termico. La struttura a reticolo di celle cubiche corpo centrato nelle quali sono forzati atomi di carbonio in percentuale superiore a quella che può essere contenuta a quella temperatura si chiama **Martensite**.

Individuato il principio spiegato sopra, la questione diventa la seguente:  
dato un acciaio di una certa composizione , bisogna individuare a che temperatura riscaldarlo , a temperatura raffreddarlo e con quale velocità raffreddarlo per ottenere la struttura cristallina e quindi le caratteristiche meccaniche desiderate per l'impiego di quell'acciaio nella costruzione di un componente meccanico.

Ciò si stabilisce con l'aiuto di grafici ottenuti da dati sperimentali, vediamoli nel seguito.

Le curve tracciate di solito sono le cosiddette curve di Bain

Sono ottenute portando un campione di acciaio allo stato di austenite, lo si raffredda fino ad una certa temperatura in un tempo teoricamente nullo, lo si mantiene a tale temperatura costante nel tempo, si osserva la sua struttura al trascorrere del tempo. Sul piano tempo  $t$  - temperatura  $T$  si traccia il punto ( cioè l'istante di tempo ) al quale l'austenite comincia a trasformarsi in ferrite  $\alpha$  + cementite ed il punto al quale l'austenite termina di trasformarsi in ferrite  $\alpha$  + cementite. Queste operazioni di raffreddamento e tracciatura dei punti si effettuano per diverse temperature via via decrescenti, unendo i punti si ottengono le curve dette di Bain



Il grafico è relativo ad un solo acciaio di una certa composizione. Un acciaio di altra composizione darà un grafico diverso.

$A_3$  è la temperatura al di sopra della quale l'acciaio in questione è completamente austenite ( facce centrate ) . Per acciaio di composizione eutettoidica, tale temperatura è  $723^{\circ}\text{C}$  altrimenti è superiore come riportato sul diagramma ferro-carbonio.

$T_1$  è la temperatura alla quale si porta il provino di acciaio raffreddandolo in un tempo teoricamente nullo a partire dalla  $A_3$ . A questa temperatura l'acciaio ha ancora la struttura dell'austenite, occorrerà del tempo ( pochi secondi ) affinché cominci a modificarsi la sua struttura.

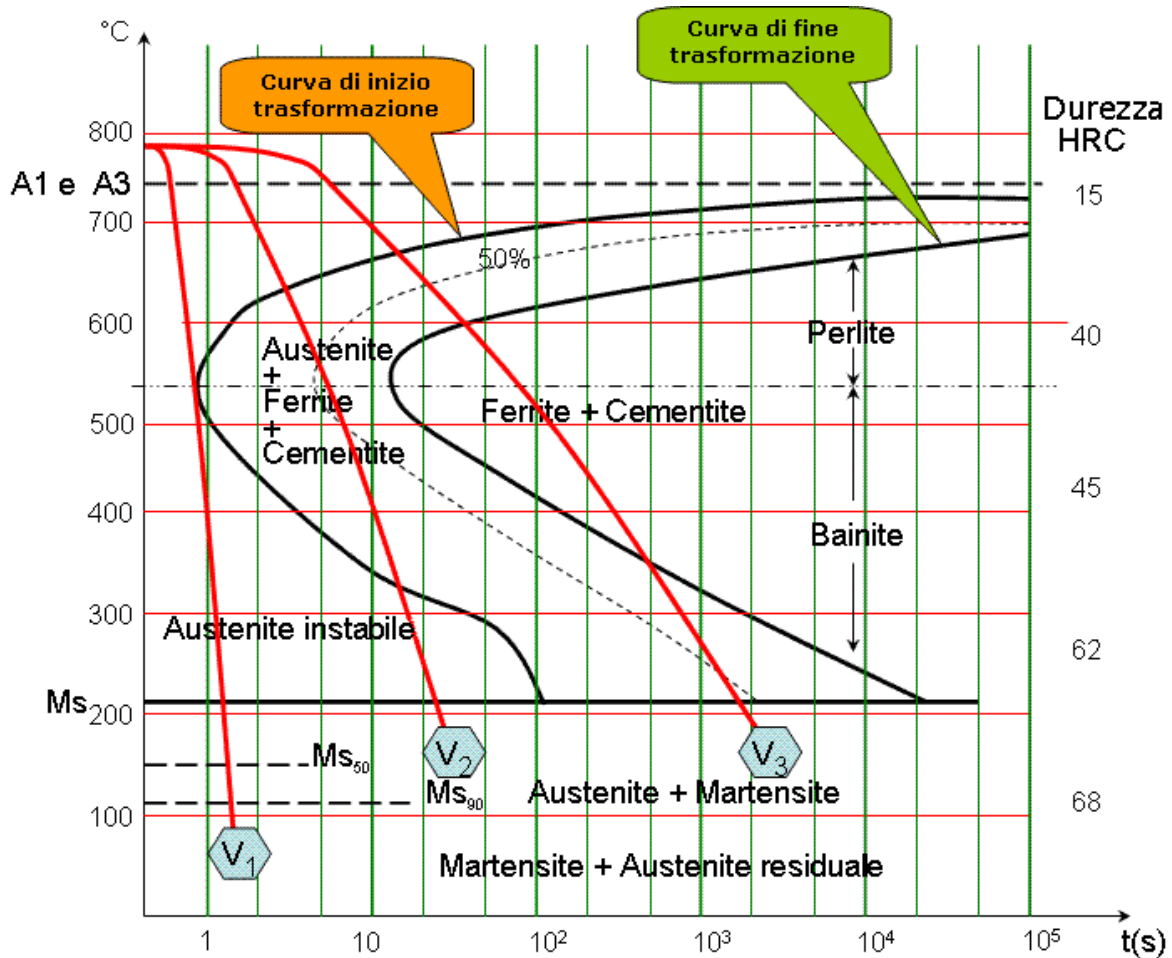
$t_{id}$  è il tempo al quale l'austenite comincia a trasformarsi in perlite ( ferrite alfa + cementite )

$t_{fd}$  è il tempo al quale l'austenite termina di trasformarsi in perlite ( ferrite alfa + cementite )

$M_s$  ( martensite start ) è la temperatura alla quale viene raffreddato l'acciaio partendo dalla  $A_3$ , al di sotto della quale l'acciaio comincia a presentare dei grani di martensite assieme a quelli di austenite.

$M_f$  ( martensite finisch ) è la temperatura alla quale viene raffreddato l'acciaio partendo dalla  $A_3$ , al di sotto della quale l'acciaio presenta completamente la struttura della martensite.

Una curva di Bain di un acciaio reale , è la seguente



Sulla destra è riportata la durezza secondo la scala Rockwell C, HRC che indica la durezza che avrà l'acciaio se raffreddato alla temperatura sulla stessa ordinata della HRC desiderata. Ad esempio, se si raffredda da A<sub>3</sub> rapidissimamente fino a 400 °C, temperatura che leggo a sinistra del grafico, la durezza risulterà 45HRC che leggo sulla scala di destra.

### Ricottura

La ricottura completa consiste in un riscaldamento dell'acciaio ad una temperatura generalmente di 50 °C superiore al punto A<sub>3</sub>, lo si fa permanere a tale temperatura in modo che si trasformi tutto in austenite. Il raffreddamento lo si realizza molto lentamente in aria calma o in un forno a temperatura decrescente in maniera controllata. L'acciaio ricotto ha una struttura perlitica ( ferrite  $\alpha$  + cementite ). Tutta l'operazione è eseguita in un forno con atmosfera non ossidante ( non c'è ossigeno ) per evitare che la % di carbonio possa diminuire bruciando con l'ossigeno.

La ricottura si esegue per eliminare eventuali trattamenti termici precedenti di tempra o bonifica, oppure per ingrandire i grani dopo una lavorazione per deformazione plastica. In quest'ultimo caso la temperatura di riscaldamento può essere più bassa di A<sub>3</sub> cioè A<sub>1</sub> = 723°C.

### Normalizzazione

E' come la ricottura ma la temperatura di riscaldamento è inferiore , il raffreddamento è fatto avvenire in aria calma. Si esegue sui semilavorati ottenuti per deformazione plastica. Barre, piatti, profilati, allo scopo di ingrandirne i grani ed eliminare le tensioni interne ( parti del materiale che tirano o spingono all'interno di esso ).

## **Tempra**

Consiste in un riscaldamento dell'acciaio ad una temperatura generalmente di 50 °C superiore al punto  $A_3$ , lo si fa permanere a tale temperatura per un tempo sufficiente ad avere la trasformazione in austenite, ma non troppo lungo da far ingrandire i grani. Il tutto avviene in un forno ad atmosfera riducente per evitare decarburazione del metallo. Successivamente l'acciaio viene raffreddato molto rapidamente, in acqua oppure olio. Nella tempra vera e propria si ottiene una struttura completamente martensitica.

I mezzi per raffreddare l'acciaio nell'operazione di tempra sono, in ordine di velocità di raffreddamento realizzabile:

- Acqua
- Soluzioni acquose
- Olio
- Bagni salini fusi
- Bagni metallici fusi

La tempra si esegue su pezzi quasi finiti, l'unica operazione che si esegue dopo la tempra è la rettifica che può avvenire in quanto le mole sono molto più dure anche dell'acciaio temprato.

Lo scopo della tempra è quello di conferire all'acciaio una elevata durezza e resistenza; d'altra parte diminuiscono drasticamente l'allungamento percentuale, la strizione e la resilienza. In altri termini diminuiscono i parametri relativi alla possibilità di deformare plasticamente l'acciaio.

Gli inconvenienti ai quali va incontro un componente meccanico durante l'operazione di tempra sono le distorsioni e le cricche. Questi problemi sono legati al fatto che la trasformazione da austenite in martensite avviene con aumento di volume. Lo strato esterno dell'acciaio si raffredda prima trasformandosi in martensite, man mano che si va verso l'interno la trasformazione in martensite avviene in istanti successivi. Accade che la trasformazione degli strati interni avvengano avvolti dallo strato esterno già rigido in seguito al raffreddamento. Ciò determina delle tensioni interne che possono creare delle fessure (cricche) nel metallo. Più il componente meccanico ha una geometria complessa, esempio parti sottili e parti spesse o forti variazioni di diametro, più il pericolo che si possa criccare è alto.

Per evitare il pericolo di cricche si ricorre a diverse tecniche di tempra che non approfondiamo.

## **Rinvenimento**

Lo scopo di questo trattamento è ridurre le tensioni interne nell'acciaio dovute al brusco raffreddamento della tempra e conferire all'acciaio del componente temprato un desiderato livello di compromesso fra durezza e resistenza da un lato e resilienza, allungamento dall'altro. Il punto di compromesso si regola con la temperatura di riscaldamento che comunque è inferiore al punto  $A_1$  (723 °C). Più bassa è la temperatura di riscaldamento, più duro e resistente sarà l'acciaio, l'effetto della tempra risulterà meno ridotto. Il raffreddamento è rapido come quello della tempra. Per ogni acciaio si può tracciare una tabella o un grafico che indica le caratteristiche meccaniche medie in relazione alla temperatura di riscaldamento del trattamento di rinvenimento.

Il riscaldamento avviene in forni a temperatura ed atmosfera controllata, una tecnologia più recente è la cosiddetta tempra ad induzione che consiste nel riscaldare il componente di acciaio inducendo in esso correnti parassite attraverso una bobina attraversata da corrente alternata ad alta intensità ed alta frequenza

## **Bonifica**

Consiste nel sottoporre l'acciaio di un componente meccanico prima al trattamento di tempra e successivamente a quello di bonifica.

## Trattamenti termici di indurimento superficiale

Si utilizzano per ottenere superfici dure principalmente allo scopo di resistere all'usura dovute allo strisciamento con altre parti meccaniche e parte interna del metallo meno fragile quindi caratterizzata da una maggiore resilienza.

### Tempra superficiale

Consiste nel riscaldare rapidamente il componente meccanico in acciaio in modo che soltanto lo strato superficiale, più o meno profondo, superi la temperatura  $A_3$  di austenizzazione. Il riscaldamento si esegue o con una fiamma o con l'induzione elettrica. Il raffreddamento rapido si ottiene attraverso un getto di acqua. L'acciaio adatto a a questo tipo di trattamento termico deve avere una percentuale di carbonio almeno dello 0,5%, i grani devono essere piccoli per consentire una rapida austenizzazione dello strato superficiale in modo che la temperatura non abbia tempo sufficiente per propagarsi all'interno del componente.

### Cementazione

Consiste nell'arricchire di carbonio lo strato superficiale, pochi decimi di mm, di un acciaio a bassa percentuale di carbonio max 0,2%, tramite un riscaldamento ad una temperatura superiore al punto di austenizzazione  $A_3$ , in presenza di sostanze carburanti che possono essere gassose, liquide o solide. L'austenite assorbe facilmente il carbonio dalle sostanze carburanti. Successivamente all'assorbimento del carbonio viene eseguita una tempra che può essere seguita da un debole rinvenimento. Lo strato superficiale del componente meccanico di acciaio risulterà indurito, la parte interna rimarrà tenace a causa della bassa percentuale di carbonio.

La percentuale di carbonio dello strato superficiale deve essere intorno allo 0,8%, una percentuale maggiore creerebbe troppa differenza con la parte interna. Potrebbe verificarsi lo sfogliamento dello strato superficiale.

### Nitrurazione

Il procedimento consiste nel portare l'acciaio a 520-540 °C circa, mantenendo tale temperatura, relativamente bassa rispetto ad altri trattamenti termici, ma per un tempo maggiore, allo scopo di introdurre azoto atomico, il quale viene assorbito dalla ferrite superficiale del metallo e forma nitruri, prevalentemente  $Fe_4N$ , molto duri e che distorcono il reticolo cristallino.

Lo spessore dello strato indurito è minore di quello ottenuto per carbocementazione, ma in compenso la sua durezza, che varia a seconda della composizione dell'acciaio, può (con certi tipi di acciaio) raggiungere 1200 HV e rimane stabile fino a temperature di 600-700 °C.

Non è possibile utilizzare l'azoto molecolare, per la dimensione molecolare relativamente grande, per cui si utilizza l'azoto atomico ottenuto dalla dissociazione termica dell'ammoniaca o dalla diffusione da bagni di sale. In tali condizioni la diffusione dell'azoto atomico nell'acciaio e l'assorbimento dalla ferrite hanno tempi ragionevoli.

Vantaggi della nitrurazione rispetto ad altri trattamenti:

- più elevata durezza superficiale e resistenza all'usura;
- stabilità al rinvenimento e quindi elevata durezza a caldo;
- resistenza alla fatica e agli intagli;
- resistenza alla corrosione, (i nitruri conferiscono sensibile "inossidabilità" superficiale).
- stabilità dimensionale. I pezzi possono essere sottoposti al trattamento completamente finiti perché il processo, avvenendo a minore temperatura, provoca minime tensioni, deformazioni ed alterazioni superficiali.

Considerato il costo piuttosto elevato, si nitrurano solo acciai dove il risultato sia tale da compensare la spesa: quindi quelli contenenti cromo, molibdeno e alluminio ( $< 1\%$ ), che formano nitruri più efficaci di quelli di ferro. Si preferiscono inoltre acciai bonificati perché è necessaria tenacità al cuore del pezzo e perché la struttura finale creata con la bonifica facilita la diffusione dell'azoto. Ne sono esempi il 41CrAlMo7 e il 42CrMo4.

Esempi di utilizzo più frequente della nitrurazione: calibri, riscontri, ingranaggi di precisione, fasce elastiche, alberi a camme e a gomiti dei motori, utensili di acciaio rapido a profilo costante (creatori, maschi, pettini, punte), acciai inossidabili o per valvole austenitici.

E' sconsigliato nitrurare pezzi sottoposti a elevata compressione.

La dissociazione termica dell'ammoniaca, catalizzata dall'acciaio, produce:  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ . L'azoto atomico diffonde nel ferro. Superati i limiti di solubilità dell'azoto nel ferro, l'azoto atomico si lega agli atomi di ferro originando nitruri. Il primo nitruro che si forma è quello a minor contenuto di azoto  $\text{Fe}_4\text{N}$ , con cella cubica a facce centrate, contenente al suo interno l'atomo di azoto, mentre nelle altre posizioni reticolari sono presenti atomi di ferro. All'aumentare del tenore di azoto assorbito si forma il nitruro  $\text{Fe}_2\text{N}$ , che però non conferisce la durezza fornita da  $\text{Fe}_4\text{N}$ . La durezza e la profondità dello strato sono legate alle variabili che regolano tale processo, quindi:

- composizione dell'acciaio;
- potenziale nitrurante (legato al grado di dissociazione dell'ammoniaca);
- temperatura di trattamento (influenza il grado di dissociazione);
- tempo di permanenza.

Il **Potenziale Nitrurante**  $N_p$  (grado di dissociazione dell'ammoniaca) influenza lo spessore e la morfologia della **coltre bianca** (strato di  $\text{Fe}_2\text{N}$  e  $\text{Fe}_4\text{N}$ ) presente sulla superficie del pezzo; tale strato cede l'azoto all'acciaio sottostante per generare la diffusione dell'azoto nella matrice metallica. Lo strato di coltre bianca può essere eliminato con la rettifica; altrimenti, con l'introduzione di una fase a potenziale nitrurante ridotto (si aumenta il grado di dissociazione) prima della fine del processo si può ridurre o eliminare totalmente la coltre bianca.

Affinché il trattamento abbia effetto, il trattamento di dissociazione deve essere eseguito in un fornello dissociatore, in modo tale che all'inizio del processo di nitrurazione la percentuale delle componenti sia quella voluta. Infatti dal rapporto tra ammoniaca e idrogeno molecolare presente durante il trattamento si stabilisce quanto azoto atomico si dovrà originare, attraverso lo spostamento a destra o a sinistra della reazione  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ ; questo influisce notevolmente sia sui composti formati, sia sullo spessore e durezza dello strato superficiale.