

# 3.25 Trattamenti termici

## 3.25.1 Trattamenti termici

I trattamenti termici consistono di operazioni successive di riscaldamento e raffreddamento secondo cicli e norme ben definiti che, senza provocare alterazioni sensibili nella composizione chimica del materiale, creano e regolano le strutture cristalline secondo le quali sono disposte le particelle di metallo.

In questo modo, i trattamenti termici conferiscono al materiale trattato particolari proprietà strutturali, meccaniche e tecnologiche.

Qui di seguito si intende fornire una panoramica sui trattamenti termici più diffusi per gli acciai utilizzati sulla bulloneria ed in generale, sui componenti da costruzione.

### Tempra

Il trattamento di tempra consiste in un brusco raffreddamento del metallo dopo averlo portato ad una temperatura elevata, ben definita, allo scopo di aumentarne la durezza. Le modifiche apportate alla struttura cristallina del metallo sottoposto a tempra variano significativamente in dipendenza dei seguenti fattori:

- composizione dell'acciaio, e, nello specifico, il tenore di carbonio;
- velocità del raffreddamento.

Le modalità con cui il tenore di carbonio influenza il processo di tempra sono illustrate in tabella seguente:

% di C	Effetto sul materiale temprato
< 0,3%	<b>Tempra di Omogeneità:</b> Omogeneizzazione della distribuzione del carbonio all'interno del reticolo cristallino del metallo e riduzione della grossezza dei grani
0,3 ÷ 0,9%	Omogeneizzazione della grana; Ottenimento maggior durezza
> 0,9%	<b>Tempra di durezza:</b> Ottenimento maggior durezza

Più in generale si può dire che la tempra, inibendo i processi diffusivi necessari alla stabilizzazione termodinamica, trasferisce a temperatura ambiente uno stato termodinamicamente competente a temperatura maggiore. Un monocristallo così trattato ha resistenza meccanica maggiore rispetto al monocristallo raffreddato lentamente.

Le temperature a cui si porta il materiale da temprare sono di circa 50°C sopra quella di Austenizzazione, temperatura alla quale si ha una trasformazione della struttura cristallina dell'acciaio: gli atomi del carbonio si dispongono alla guisa di un ottaedro, formando una struttura che prende il nome di austenite (soluzione solida primaria di tipo interstiziale di carbonio nel ferro). Nella pratica del trattamento, le temperature di tempra variano tra i 770° C ed i 900° C. La permanenza nel forno dipende dagli spessori del pezzo.

In seguito, quando tutta la massa metallica si è termicamente stabilizzata, l'acciaio è raffreddato molto rapidamente fino a temperatura ambiente; non avendo così il tempo per diffondere, il carbonio rimane intrappolato all'interno della struttura reticolare, che a temperatura ambiente si trasforma in una struttura tetraedrica (martensite).

L'acciaio con concentrazione di Carbonio superiore allo 0,3-0,5% presenta un alto livello di rischio di cricature. L'uso di acciai legati in organi sollecitati a fatica o a flessione può essere pericoloso per il rischio di cricature ed è quindi sconsigliato se non indispensabile.

Le fasi di riscaldamento e di raffreddamento sono cruciali per il processo in quanto, se non condotte con tutte le cautele del caso, possono rendere inutilizzabile il pezzo trattato.

Il riscaldamento viene effettuato per mezzo di forni che possono essere:

- ad aria (rischio di ossidazione e di decarburazione per la superficie del metallo caldo a contatto con l'aria);
- a bagni di sale (vantaggio della elevata precisione della temperatura di riscaldamento, uniformità di riscaldamento, protezione dalle alterazioni superficiali).

I mezzi di raffreddamento sono svariati e vanno applicati in base al materiale da trattare ed al grado di durezza richiesto:

- acqua, il più comune ed il più rapido;
- liquidi refrigeranti a base di sali disciolti in acqua, che migliorano le condizioni di raffreddamento in quanto limitano la formazione delle pellicole stabili di vapore che si comportano da isolante rallentando e limitando il raffreddamento;
- bagni di acqua ed oli emulsionabili, che costituiscono un mezzo refrigerante meno energico;
- olio minerale appositamente preparato (olio da tempra);
- bagni caldi formati da sostanze riscaldate o fuse;
- aria;
- cenere, il mezzo meno drastico in termini di velocità di raffreddamento.

## Rinvenimento

Il rinvenimento si definisce come un riscaldamento a temperatura inferiore all' intervallo critico di un prodotto siderurgico, effettuato dopo la tempra. Lo scopo del rinvenimento è quello di ridurre la fragilità e le tensioni interne generate dal processo di tempra. Per contro, l'aumento di tenacità si accompagna ad una notevole diminuzione della durezza.

Il massimo rendimento dell'operazione di tempra si ottiene con il successivo trattamento di rinvenimento; l'insieme di questi due trattamenti si chiama appunto bonifica.

Per la maggior parte degli impieghi, l'acciaio temprato risulterebbe troppo fragile, quindi per mezzo di un successivo riscaldamento (o rinvenimento) viene favorita la diffusione degli atomi di carbonio che abbandonano lentamente il reticolo martensitico per assumere la normale forma della cementite. Durante il rinvenimento la struttura della martensite subisce una trasformazione continua e progressiva.

Quando nel materiale vi è presente una quantità sensibile di austenite residua, il rinvenimento può determinare un aumento di durezza.

## Bonifica

E' un trattamento termico applicato agli acciai da costruzione che consiste in una tempra martensitica seguita da un opportuno rinvenimento a 550° C- 600°C

Si utilizza per ottenere un compromesso tra tenacità e durezza.

La struttura dell'acciaio da costruzione bonificato dipende sia dalla temperatura di rinvenimento adottata, ma anche dalla struttura più o meno grossolana della martensite di tempra quindi, è necessario adottare una temperatura di tempra più bassa possibile.

Inoltre è necessario che la tempra martensitica abbia raggiunto il cuore, cioè la temprabilità dell'acciaio prescelto sia sufficiente per le dimensioni del pezzo da temprare.

In conclusione, la bonifica degli acciai è un complesso di operazioni che richiedono una attenta valutazione di tutte le condizioni: tipo di acciaio; composizione dell'acciaio; dimensioni del pezzo; natura del mezzo temprante; temperatura e durata del rinvenimento; ecc....

Un errore di valutazione o di esecuzione può condurre a risultati scarsamente soddisfacenti.

## Distensione

La distensione consiste in un riscaldamento e permanenza adeguata a temperatura notevolmente inferiori a quelle del passaggio da ferrite ad austenite, seguita da raffreddamento generalmente lento.

La distensione di un acciaio cementato ha lo scopo di ridurre le tensioni interne senza degradare sensibilmente la durezza.

In generale, il trattamento di distensione viene fatto a 150-180°C per gli acciai al carbonio o debolmente legati, ed a 170-210°C per gli acciai da cementazione più ricchi in lega.

Ricordiamo tuttavia che, specie nei pezzi cementati sottoposti a sollecitazioni di flessione alternata, non è sempre opportuna la eliminazione completa dello strato di compressione superficiale, in quanto questo può migliorare le caratteristiche di resistenza a fatica del materiale.

## Normalizzazione

La normalizzazione consiste in un riscaldamento di austenitizzazione seguito da un raffreddamento in aria calma o mossa. Generalmente condotto su pezzi di lavorazioni a caldo, tale processo ha lo scopo di affinare ed uniformare il grano ma soprattutto predisporre l'acciaio ai successivi trattamenti termici con un maggiore contenimento delle deformazioni. La normalizzazione annulla gli effetti della tempra e dell'incrudimento non pregiudicando la durezza superficiale.

La normalizzazione è anche praticata come trattamento preliminare di preparazione alla tempra.

## Ricottura

La ricottura di una lega metallica consiste nel riscaldamento ad una temperatura solitamente inferiore a quella di fusione, seguito dalla permanenza di durata opportuna e da un lento raffreddamento. Deve conseguire uno o più dei seguenti obiettivi:

- riduzione delle tensioni interne, dell'incrudimento conseguente alle lavorazioni meccaniche, o dell'indurimento da trafilatura, fucinatura, laminazione;
- addolcimento per le lavorazioni meccaniche successive;
- rigenerazione del grano ed omogeneizzazione della struttura;
- annullamento degli effetti nocivi della tempra e degli altri trattamenti termici.

Nel caso dell'acciaio, si riscalda sino ad una temperatura poco superiore a quella di austenitizzazione (pressoché uguale a quella indicata per la tempra) e si mantiene a tale temperatura per un tempo sufficiente a trasformare il materiale completamente in austenite; segue un lento raffreddamento in forno. Il raffreddamento finale a temperatura ambiente, può essere più o meno rapido.

Tramite la ricottura viene alterata la microstruttura del materiale, causando mutamenti nelle sue proprietà quali la flessibilità e la durezza. Il risultato tipico è la rimozione dei difetti della struttura cristallina. Può avere anche lo scopo di uniformare la composizione chimica dell'acciaio, in tal caso il riscaldamento è eseguito ad una temperatura più elevata e per tempi più lunghi.

## Ricottura di lavorabilità

Consiste in un riscaldamento a temperatura leggermente al di sotto dell'intervallo critico di austenizzazione, seguito da un mantenimento prolungato ed un raffreddamento lento. Gli scopi sono quelli di eliminare le eventuali tensioni interne, rendere l'acciaio più facilmente lavorabile alle macchine utensili, ma anche un addolcimento tale da favorire una migliore deformabilità a freddo.

## 3.25.2 Trattamenti termo-chimici

### Cementazione

Con il termine cementazione si tende ad indicare tutti i trattamenti termochimici di diffusione, che prevedono un apporto di carbonio sulla superficie di un acciaio legato e non con basso tenore di carbonio.

Il ferro e l'acciaio, portati ad una temperatura adatta, acquistano infatti l'importante proprietà di assorbire, rimanendo però allo stato solido, gli elementi chimici con cui hanno affinità: carbonio, azoto, alluminio, zolfo etc. Tali elementi creano una modifica nella composizione chimica degli strati superficiali del materiale assorbente, mutando di conseguenza anche le proprietà meccaniche e tecnologiche degli strati interessati.

Lo scopo è quello di creare uno strato superficiale, variabile a seconda delle richieste, con durezza e resistenza all'usura elevate, mantenendo invariate la composizione del nucleo e di conseguenza le caratteristiche di tenacità, duttilità e di resistenza agli urti.

Il trattamento consiste nel riscaldare e mantenere per un tempo sufficiente un acciaio a una temperatura maggiore della temperatura critica di austenizzazione, in un mezzo polverulento, pastoso, liquido o gassoso di particolare composizione chimica, dal quale il materiale trattato possa prelevare carbonio.

Lo scopo del trattamento è quello di ottenere un arricchimento superficiale di carbonio in modo da poter conseguire un'elevata durezza (60-62 HRC) con il successivo trattamento di tempra, conservando al nucleo la resilienza originaria.

Il trattamento è pertanto destinato agli organi meccanici che debbono accoppiare durezza superficiale e resistenza all'usura con la resistenza a fatica (l'aumento di volume dello strato cementato e temprato legato alla trasformazione martensitica dell'acciaio arricchito di carbonio induce tensioni di compressione dello strato superficiale incrementando notevolmente il limite a fatica).

I materiali da cementazione richiedono una composizione chimica e delle caratteristiche strutturali in grado di favorire l'assorbimento di carbonio e la penetrazione di tempra: i più adatti sono pertanto gli acciai extra-dolci con percentuale di carbonio inferiore allo 0,25%, affinché la tempra non provochi un'elevata durezza del nucleo.

I mezzi cementanti possono essere di varia natura; i più comuni sono:

- Cementi solidi: carbone di legna e da altre sostanze che hanno la funzione di attivare la produzione di ossido di carbonio;
- Cementi liquidi: sali costituiti da miscele di cloruri e carbonati alcalini o alcalino-terrosi;
- Cementi gassosi: gas composto da ossido di carbonio, idrocarburi e gas illuminante.

Mezzo	Vantaggi	Svantaggi
Solido	- Basso costo del mezzo cementante; - semplicità del processo	- Variazione notevoli nello spessore di cementazione; - grande dimensione di ingombro degli impianti; - laboriosa manutenzione dei forni e delle cassette.
Liquido	- Regolazione fine della profondità di penetrazione; - rapidità del processo.	
Gas	- Qualità migliore in assoluto	

A seconda del mezzo impiegato, varia la rapidità di diffusione del carbonio negli strati superficiali:

Mezzo	Velocità di diffusione
Cementi solidi	0,12-0,15 mm/ora
Cementi liquidi	1 mm/ora
Cementi gassosi	0,3 mm/ora

Si tenga presente che le velocità riportate sono indicative.

A titolo di esempio, si riporta la descrizione del processo di cementazione con cementi solidi:

i pezzi finiti di lavorazione meccanica vengono racchiusi in cassette metalliche (a chiusura ermetica) ma disposti in modo che siano completamente circondati dal materiale cementante per uno spessore di almeno 3-4 cm. In tali condizioni, l'acciaio e la massa cementante sono portati gradualmente ad una temperatura di circa 900°C, dove permangono per un tempo proporzionato alla profondità di penetrazione del carbonio che si intende far raggiungere al materiale trattato. Le profondità di uso comune variano da pochi decimi di mm a fino 1 mm circa. Con temperature inferiori la solubilità del carbonio nel ferro diminuisce, per cui i tempi di trattamento si allungano e i costi aumentano.

Lo spessore efficace di cementazione deve corrispondere ad una delle classi sottoelencate:

Simbolo della classe	Spessore efficace dello strato carbocementato [mm]
Cm1	da 0,05 fino a 0,15
Cm2	oltre 0,15 fino a 0,25
Cm3	oltre 0,25 fino a 0,4
Cm5	oltre 0,4 fino a 0,6
Cm7	oltre 0,6 fino a 0,8
Cm9	oltre 0,8 fino a 1,1
Cm13	oltre 1,1 fino a 1,4
Cm15	oltre 1,4 fino a 1,7
Cm20	oltre 1,7 fino a 2,2

Nella pratica del processo di cementazione, è fondamentale tenere presente i seguenti aspetti:

- **deformazione di cementazione;** i pezzi sottoposti a questo trattamento subiscono un aumento di volume (i diametri esterni crescono, mentre i fori si restringono). Di ciò bisogna tenere conto in fase di progettazione, adottando opportune modifiche dimensionali;
- **zone non cementate;** le zone dei pezzi che devono mantenere inalterate le caratteristiche originarie devono essere protetti dalla penetrazione del carbonio, con accorgimenti di varia natura:
  - ricopertura della superficie non interessata alla cementazione con protezioni adeguate, quali paste o vernici anticementanti;
  - progettazione di sovrametallo pari alla profondità di cementazione, da asportare nella successiva fase di finitura.

### Trattamenti Termici dopo la Cementazione

Dopo il trattamento di cementazione vero e proprio i pezzi devono essere temprati allo scopo di conferire alla superficie le necessarie doti di durezza e resistenza all'usura ed al cuore una soddisfacente tenacità e resistenza a fatica. La tempra viene effettuata all'uscita dal mezzo cementante; ad essa conviene sempre far seguire un processo di rinvenimento di distensione.

### Nitrurazione

La nitrurazione è un processo industriale termochimico di indurimento superficiale sugli acciai speciali.

Il procedimento consiste nell'espore i pezzi da trattare, preventivamente riscaldati in forno elettrico a temperature comprese in un range di 450 – 580°C, ad una lenta corrente di ammoniac gassosa.

L'elevato costo della nitrurazione suggerisce l'applicazione del trattamento ai soli acciai dove il risultato sia tale da giustificare la spesa elevata, ossia acciai contenenti carbonio (0,3% circa), cromo, molibdeno, alluminio, vanadio. I nitruri che si originano da questi elementi combinati con azoto sono infatti molto più efficaci di quelli del ferro. Durante il trattamento, l'azoto atomico dell'ammoniaca viene assorbito dalla ferrite superficiale del metallo, formando una durissima crosta superficiale di nitruri. Si preferiscono inoltre acciai bonificati perché è necessaria tenacità al cuore del pezzo e perché la struttura fine creata con la bonifica facilita la diffusione dell'azoto. Ne sono esempi il 41CrAlMo7.

La penetrazione dell'azoto è molto lenta (0,1 mm in circa 10 ore di trattamento) ed è limitata a spessori ridottissimi, dell'ordine di pochi decimi di mm. I tempi di trattamento sono pertanto lunghi, se confrontati con quelli di un trattamento di cementazione.

Lo spessore dello strato indurito è minore di quello ottenuto per cementazione, ma per contro possiede una durezza molto superiori e rimane stabile fino a temperature di 600-700°C.

I vantaggi del trattamento di nitrurazione sono i seguenti:

- elevata durezza superficiale (ordine di grandezza di 70 HRC);
- elevata resistenza all'usura, alla fatica, agli intagli, alla corrosione;
- stabilità al rinvenimento e quindi durezza a caldo;
- stabilità dimensionale, assenza di deformazioni durante il trattamento;
- non necessari trattamenti termici successivi, né di normalizzazione, né di tempra.