

Trattamenti Termici degli acciai

Indice

Voci

Tempra	1
Rinvenimento	7
Ricottura	8
Carbo cementazione	10
Nitrurazione	12

Note

Fonti e autori delle voci	14
Fonti, licenze e autori delle immagini	15

Licenze della voce

Licenza	16
---------	----

Tempra

Il trattamento di **tempra** o **tempera** ^[1] in generale consiste nel brusco raffreddamento di un materiale dopo averlo portato ad alta temperatura. Questo processo è molto comune per i metalli, ma è utilizzato ad esempio anche per il vetro.

Metallo

L'elevata velocità di raffreddamento inibisce l'azione diffusiva atta al ripristino dell'equilibrio e il numero di vacanze (e quindi di cluster, cioè raggruppamenti di difetti puntuali) che compete alla temperatura di tempra è conservato a temperatura ambiente. 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.

Grazie alla tempra, per esempio, si trasforma la struttura perlitica dell'acciaio in martensitica: si porta la lega da temprare a una temperatura di circa 50 °C sopra quella di austenizzazione e lo si raffredda molto rapidamente fino a temperatura ambiente (non necessariamente essa viene raggiunta); non avendo così il tempo per diffondere, il carbonio rimane intrappolato all'interno della cella gamma, che si trasforma in cella alfa a temperatura ambiente; ciò porta ad avere una struttura tetraedrica, che è appunto la martensite.

Anticamente la tempra veniva effettuata, oltre che in acqua o olio, in orine varie, che erano in grado di fornire una certa quantità di nitrati e nitriti per avere anche una diffusione di atomi di azoto (parziale nitrurazione).

Note sugli acciai legati

L'acciaio con concentrazione di carbonio superiore allo 0,3-0,5% presenta un alto livello di rischio di cricature. La presenza di elementi leganti rallenta la dissoluzione dei carburi durante l'austenizzazione. 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.

Tempra di soluzione o solubilizzazione

Si consideri una lega formata dal soluto B disciolto nella matrice A. Se la si riscalda fino a completa dissoluzione di B e poi la si raffredda bruscamente, di solito in acqua o olio, fino a temperatura ambiente, si paralizzano gli atomi di B in condizioni metastabili, ottenendo una lega più tenera e plastica.

È applicata agli acciai inossidabili austenitici (ad esempio: AISI 304 o X5CrNi1810, AISI 316 o X5CrNiMo1712) per migliorare la resistenza alla corrosione: un raffreddamento lento, infatti, provocherebbe la separazione dei carburi di cromo ai giunti dei grani, con conseguente impoverimento sotto al 12%(limite per la passivazione) e *corrosione intercrystallina*.

Nell'acciaio austenitico il manganese migliora la tenacità. La tempra di soluzione si fa anche su leghe di alluminio da trattamento termico, prima di avviare il processo d'invecchiamento. Su una lega di alluminio, procedere con un trattamento di invecchiamento, sia naturale che artificiale, migliora notevolmente le caratteristiche meccaniche, perché si vanno a formare finissimi precipitati che bloccano il movimento delle dislocazioni. Le leghe d'alluminio sottoposte a invecchiamento vengono riconosciute dalla sigla T6 (invecchiamento artificiale) o T4 (invecchiamento naturale). Per esempio AA-2xxx-T6 (lega d'alluminio della serie 2000 Alluminio+rame da trattamento termico, invecchiata artificialmente)

Tempra di durezza

È un trattamento termico che sopprime la trasformazione eutetoidica e conduce alla formazione di martensite per raffreddamento continuo. Considerando il grafico delle curve CCT, la curva della velocità di raffreddamento in ogni punto del pezzo non deve incrociare le curve CCT, così che si arrivi alla sola formazione di martensite.

Si deve quindi tenere presente che la curva di raffreddamento dipende da

- bagno di tempra
- caratteristiche termiche dell'acciaio
- caratteristiche geometriche del pezzo trattato

mentre le curve CCT dipendono da

- composizione dell'acciaio (ad esempio il carbonio lo sposta a destra)
- dimensioni del grano
- inclusioni non metalliche, carburi, azoturi o segregazioni.

La "profondità di tempra" è rilevabile mediante due metodi, basati sul principio che la durezza dipende unicamente dalla quantità di martensite e dal tenore di carbonio.

- "Diametro ideale". Si misura il *diametro critico* (diametro della barra che dopo tempra ha 50% di martensite al centro), ricavandolo dal *diametro ideale* di una barra temprata in un *bagno ideale di tempra*, con *indice di drasticità H* infinito, grazie al diagramma proposto da Grossmann.
- "Curva di Jominy". Un provino cilindrico viene temprato e raffreddato secondo un metodo standard, segue quindi la misurazione della durezza Rockwell C lungo il suo asse e la costruzione di un grafico durezza - distanza dall'estremo; quest'ultimo consente di valutare e confrontare la temprabilità di diversi acciai (ad esempio il 40CrMo4 è più temprabile del C40); la penetrazione di tempra è ricavabile nel momento in cui si conosce la durezza corrispondente al 50% di martensite.

È possibile ricavare i risultati del primo metodo da quelli del secondo, grazie a correlazioni standard codificate in normative ISO.

Ambiente di riscaldamento

Bisogna evitare l'ossidazione e la decarburazione del pezzo temprato. Si può quindi proteggerlo con:

- *sostanze solide* (trucioli di ghisa grigia, carbone), adatte in forni elettrici, per acciai al carbonio, basso-legati fino a 0,6% di C, ad alto cromo (ad esempio X210Cr13) e temperatura di tempra inferiore a 1050 °C;
- *sostanze liquide* (sali fusi) per pezzi pregiati, ad esempio utensili da taglio o parti di macchine, in cui si richieda uniformità e precisione del riscaldamento;
- *sostanza gassose* (CO, CO₂, H₂, N₂, gas inerti) per trattamenti economici su larga scala; un caso particolare è il vuoto.

Velocità di riscaldamento

È necessaria gradualità per evitare criccate e tensioni termiche.

Temperatura di tempra

Bisogna porre attenzione ad alzare eccessivamente la temperatura (per aumentare la velocità di austenitizzazione) in quanto si rischiano surriscaldamento della grana cristallina, bruciatura dei bordi dei grani per l'infiltrazione di ossigeno, ossidazione, decarburazione, eccessiva fragilità della martensite ottenibile, austenite residua. Ciò premesso, la temperatura è di 30 °C, 50 °C, 70 °C maggiore di A_{c3} a seconda che il mezzo di raffreddamento sia acqua, olio, aria.

Permanenza in temperatura

Il tempo di permanenza dipende dal grado desiderato di dissoluzione dei carburi:

- acciai da costruzione, al carbonio e basso-legati: pochi minuti
- acciai da costruzione medio legati: almeno 15 minuti
- acciai per utensili al carbonio e bassolegati: 0,5 minuti per mm di spessore, con un massimo di un'ora
- acciai alto-legati al cromo: 0,8 minuti al mm, con un massimo di un'ora
- acciai per lavorazioni a caldo: mezz'ora al massimo, data la scarsa quantità di carburi
- acciai rapidi: essi sono riscaldati alla più alta temperatura, quindi occorre limitare la permanenza al minimo (tempo dipendente dallo spessore)

Mezzo di tempra

Il fluido ottimale deve assicurare:

- elevata velocità di raffreddamento nell'intervallo $A_1 - M_s$ per evitare la formazione di perlite o bainite;
- modesta velocità nell'intervallo $M_s - M_f$ (comunque non troppo bassa per non creare eccessiva austenite residua); questa proprietà è proporzionale alla differenza tra la temperatura del fluido e il suo punto di ebollizione;
- il fluido non deve decomporsi al contatto con il metallo rovente.

I mezzi più usati sono acqua, olio, sali fusi e aria e sono classificati in base all'*indice di drasticità H*.

Si distinguono 3 stadi di raffreddamento per liquidi soggetti a ebollizione:

1. al primo contatto del mezzo col pezzo si forma una pellicola di vapore (cafeazione), con raffreddamento relativamente lento;
2. nel momento in cui essa si rompe, nuovo liquido tocca il pezzo, assorbe il calore latente di evaporazione e si raggiunge così la massima asportazione di energia;
3. con il passaggio sotto alla temperatura di ebollizione, si ha un calo nell'asportazione di calore.

L'acqua è il mezzo di spegnimento più diffuso, soprattutto per acciai al carbonio e alcuni bassolegati, ma non è il fluido ideale. La sua azione può essere migliorata con l'aggiunta di sostanze che ne innalzano il punto di ebollizione, per esempio con NaCl o NaOH.

L'olio minerale è adatto ad acciai basso e medio legati, cioè suscettibili di formare austenite stabile e quindi trasformabile con bassa velocità critica di tempra. Si avvicina maggiormente al fluido ideale, riducendo le tensioni interne e i difetti di tempra.

L'aria è consigliata per acciai alto legati e quelli basso e medio legati in pezzi complessi.

I sali fusi, adatti a pezzi non troppo grossi e di acciaio ben temprabile, eccellono soprattutto nei trattamenti isoteromici sostitutivi della tempra.

Tempra ad induzione

Un corpo buon conduttore di elettricità, posto entro un campo magnetico alternato, si riscalda per effetto Joule grazie alle correnti indotte: questo fenomeno permette di portare ad alta temperatura, e quindi austenitizzare, un oggetto di acciaio.

A causa dell'effetto pelle della corrente alternata lo spessore dello strato riscaldato varia con la frequenza della corrente (ma dipende anche dalla conducibilità del materiale); industrialmente si utilizzano generatori a bassa frequenza (inferiore a 5 kHz), media frequenza (da 5 a 30 kHz) e alta frequenza (200 kHz); lo strato di materiale interessato dal riscaldamento è inversamente proporzionale alla frequenza generata (bassa frequenza corrisponde a strati più profondi).

Segue la fase di raffreddamento, che può avvenire per immersione o spruzzamento; esempi di "tempra localizzata" sono: lame per forbici o falciatrici, taglienti di pinze troncatrici, vomeri, denti di ingranaggi e soprattutto pezzi ruotabili durante il riscaldamento.

La "tempra progressiva" comporta invece lo scorrimento del pezzo rispetto alla bobina e immediato raffreddamento della superficie in uscita. Il metodo è usato per guide di bancali, lame per seghetti, denti di ingranaggi di grandi dimensioni, alberi di trasmissione, steli per attuatori pneumatici, cuscinetti a rotolamento...

Ultima fase del processo è il rinvenimento ad induzione, a 160-200 °C.

Per evitare cricature gli acciai sottoponibili a tale trattamento sono gli acciai al carbonio o poco legati (39NiCrMo3) con $C = 0,30-0,50\%$ (classificabili negli acciai da bonifica) (eccezione: se la tempra deve raggiungere il cuore del pezzo, possono essere usati il 100Cr6 e il 100CrMn4, ad esempio nei cuscinetti a rotolamento). La bonifica serve ad ottenere una struttura di partenza con carburi fini, che si disciolgano presto nell'austenite durante il veloce riscaldamento, e un cuore tenace; per motivi inversi si escludono gli acciai ricotti (carburi grossolani e cuore scarsamente tenace).

Tempra bainitica (austempering)

Essa rientra nei trattamenti di tempra isoterma. In breve, la sosta nel bagno termale, ad una temperatura poco superiore a M_s (temperatura di inizio trasformazione della martensite), porta alla completa trasformazione dell'austenite in bainite inferiore, ottenendo un materiale più tenace, meno tensionato e senza necessità di rinvenimento. Si può dire che la bainite inferiore che si ottiene da questo processo è la struttura dalle migliori caratteristiche meccaniche rispetto a tutte le altre strutture ottenibili dai diversi trattamenti termici. Ovviamente questo è anche un concetto relativo, infatti dipende da cosa richiede il progetto. Comunque se ci mettessimo nella logica di potere e volere classificare le caratteristiche meccaniche ottenibili dalle diverse strutture, la bainite inferiore sarebbe sul primo gradino del podio. Tuttavia il processo termico per ottenerla deve essere obbligatoriamente isoterma e, data la complessità, diventa costoso e quindi ancora poco diffuso. Si va spesso sull'alternativa più vicina alla bainite inferiore, ovvero la sorbite che si ottiene da un rinvenimento (generalmente a $T \approx 550\text{ °C} - 600\text{ °C}$) preceduto, ovviamente, da una tempra di durezza (si ricordi che tempra + rinvenimento = bonifica).

Patentamento

È una variante dell'austempering, consistente nel far passare con movimento continuo un filo di acciaio armonico all'interno di un bagno termale di piombo fuso a 500 °C. Si ottiene perlite fine, adatta alla trafilatura.

Martempering

Il rinvenimento a bassa temperatura non elimina sempre adeguatamente cricche e distorsioni. Conviene ricorrere allora al martempering, cioè alla pausa isoterma a temperatura leggermente superiore a M_s , in un bagno di sali, per il tempo strettamente necessario a uniformare la temperatura del pezzo ma non sufficiente alla formazione di bainite. Segue il raffreddamento in aria e il rinvenimento.

Vantaggi: formazione contemporanea di martensite, nessuna ossidazione o decarburazione se il raffreddamento finale avviene in atmosfera protettiva, maggiore tenacità a scapito di un po' di durezza.

Svantaggi: maggiori costi di impianto, più austenite residua

Da ricordare che il martempering è spesso utilizzato nei casi in cui sia necessario temprare pezzi di grosse dimensioni (ad esempio ingranaggi di motori marini, stampi per le materie plastiche) che arrivano ad occupare volumi nell'ordine dei metri cubi. Dato le dimensioni del pezzo, è immediato immaginare come la differenza di temperatura fra superficie e cuore del pezzo possa assumere valori molto elevati qualora venga effettuato un trattamento di tempra tradizionale (senza la pausa isoterma del martempering). Gli stati tensionali quindi assumerebbero valori molto elevati e di conseguenza pericolosi per l'integrità del pezzo.

Stato tensionale di un oggetto temprato

Le tensioni residue sono dannose in quanto possono provocare la cricatura e variazioni geometriche. Causa ne è sempre il gradiente termico.

Tensioni termiche

Sono determinate dalla contrazione non contemporanea di strato interno e strato esterno di un pezzo. Sono proporzionali alla drasticità del raffreddamento, alla temperatura di tempra e allo spessore, mentre sono inversamente proporzionali alla resistenza del metallo; particolarmente evidenti sono nei metalli privi di trasformazione di fase solida, come acciai al carbonio extradolci, inossidabili ferritici e austenitici.

Tensioni strutturali

La trasformazione dell'austenite in martensite, bainite o perlite comporta l'aumento del volume; dato che cuore e superficie non si trasformano contemporaneamente, nascono delle tensioni di trazione e compressione.

La situazione più favorevole vede la sollecitazione a compressione del guscio esterno e a trazione del cuore, attuando una sorta di "deformazione sferica" che non solo non presenta motivi di pericolo, ma anzi favorisce la resistenza a fatica e a flessione (dato che si sommano algebricamente ai carichi esterni).

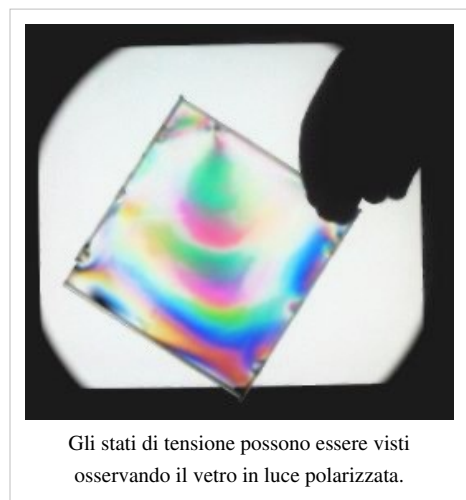
Si considerino gli acciai legati: le loro curve CCT sono molto spostate a destra rispetto alle curve di raffreddamento e questo facilita la creazione di tensioni elastiche residue non adeguatamente distribuite. Pertanto il loro uso nel caso di organi sollecitati a fatica o a flessione deve essere adeguatamente valutato. Di solito migliore distribuzione delle tensioni residue risulta negli acciai al solo carbonio.

Si pone infine l'attenzione su ulteriori elementi da valutare al fine del contenimento delle tensioni di tempra: velocità di riscaldamento, percentuale di carbonio superiore allo 0,3 - 0,5%, ambiente di riscaldamento che possa provocare ossidazione o decarburazione, temperatura di tempra eccessiva che renda fragile la martensite prodotta, velocità di raffreddamento, austenite residua, bagno di tempra che non assicuri uniformità di temperatura (per gli acciai alto legati si consiglia l'aria calma).

Vetro

Procedimento

Il pezzo deve essere tagliato alle dimensioni richieste e ogni lavorazione (come levigatura degli spigoli o foratura e svasatura) deve essere effettuata prima della tempra. Il vetro è quindi posto su un tavolo a rulli su cui scorre all'interno di un forno che lo riscalda alla temperatura di tempra di 640 °C. Quindi è rapidamente raffreddato da getti di aria. Questo processo raffredda gli strati superficiali causandone l'indurimento, mentre la parte interna rimane calda più a lungo. Il successivo raffreddamento della parte centrale produce uno sforzo di compressione sulla superficie bilanciato da tensioni distensive nella parte interna. Gli stati di tensione possono essere visti osservando il vetro in luce polarizzata.



Gli stati di tensione possono essere visti osservando il vetro in luce polarizzata.

Vantaggi e svantaggi

Il **vetro temperato**^[2] è circa sei volte più resistente del vetro *float*, questo perché i difetti superficiali vengono mantenuti chiusi dalle tensioni meccaniche compressive, mentre la parte interna rimane più libera da difetti che possono dare inizio alle crepe.

Uno dei principali vantaggi del vetro temperato riguarda l'uso per porte, piani e ante destinate all'uso civile e abitativo. La tempra impedisce che, in caso di rottura, porzioni più o meno grandi della lastra di vetro possano procurare ferite o mettere in pericolo l'incolumità degli utilizzatori o di chi casualmente potrebbe trovarsi nelle vicinanze in occasione di una rottura che potrebbe essere causata dai più disparati motivi: urti violenti con carrelli, utensili, cadute, o cose simili.

D'altro canto queste tensioni hanno degli svantaggi. A causa del bilanciamento degli sforzi, un eventuale danno sul bordo della lastra causa la frantumazione del vetro in molti piccoli frammenti. Questo è il motivo per cui il taglio deve essere effettuato prima della tempra e nessuna lavorazione può essere fatta dopo.

Voci correlate

- Trattamenti termici degli acciai

Collegamenti esterni

- **(IT)** A proposito del riscaldamento ad induzione ^[3]
- **(EN)** Trattamento termico ^[4]
- **(IT)** Tempra diretta ^[5]

Note

[1] Ambedue i termini sono corretti anche se il secondo è meno frequente. Usato ad esempio per il vetro temperato.

[2] Nel caso del vetro è molto più frequente l'uso del termine "temperato" che non del termine "temprato"

[3] <http://it.ambrell.com/aboutinduction.php>

[4] http://www.ameritherm.com/overview_hardening.html

[5] <http://www.youtube.com/watch?v=W6Yy2bMQYo0>

Rinvenimento

Il **rinvenimento** è un trattamento termico di un metallo eseguito al fine di ridurre gli effetti negativi della tempra sul materiale, nel caso questo presenti eccessiva durezza e quindi fragilità.

Nel rinvenimento si riscalda a temperatura $T < A_{c1}$ sufficiente a ripristinare la diffusività di un elemento presente in minore quantità nel metallo, in modo che tale elemento possa separarsi dalla matrice in forma finemente dispersa.

Un'applicazione tipica è la trasformazione della martensite e dell'eventuale austenite residua per riscaldamento di un acciaio. Gli stadi di questo processo, per un acciaio al solo carbonio, sono elencati di seguito.

- *Primo stadio* 80-160 °C: la martensite con $C < 0,2\%$ non ha trasformazioni di fase, ma solo un addensamento del C presso le dislocazioni; se $C > 0,2\%$, la martensite si porta a una concentrazione di C dello 0,2% grazie alla precipitazione del carburo ϵ di composizione $Fe_{2,4}C$, riducendo così le sue distorsioni reticolari e quindi la fragilità.
- *Secondo stadio* 100-300 °C: l'austenite residua si trasforma in bainite inferiore, con aumento del volume dell'acciaio.
- *Terzo stadio* 250-400 °C: la martensite con $C = 0,2\%$ e il carburo ϵ cominciano a trasformarsi in ferrite e cementite, formando la **troostite di rinvenimento** (simile alla Bainite) dove avviene il completo recupero dell'Austenite residua.
- *Quarto stadio* 400-700 °C: gli sferoidi minori di cementite accrescono quelli maggiori, dando origine alla **sorbite di rinvenimento**, e, continuando oltre i 600 °C, la ferrite ricristallizza in cristalli equiassici: si ottiene la **perlite globulare**, la struttura più stabile e lavorabile alle macchine utensili.

Per un acciaio legato si può avere un *quinto stadio*: per temperature di rinvenimento oltre i 500 °C e tenori elevati di elementi si ha la precipitazione di carburi dei soli elementi metallici M (ad esempio MC o M_2C), con conseguente nuovo aumento della durezza.

Esistono casi particolari in cui il rinvenimento può portare a fragilità:

- *Fragilità a 250-400 °C*, irreversibile: ne risentono gli acciai al carbonio e quelli bassolegati
- *Fragilità a 450-550 °C*, reversibile: è nota anche come malattia di Krupp e si ipotizza causata dalla formazione di un precipitato ai giunti dei grani, che abbassa la coesione intercrystallina.

Il fenomeno della fragilità al rinvenimento si ha quando nel passaggio lento nel campo di temperatura critico (circa tra i 300 e 500 °C) durante il rinvenimento avviene che per alcuni acciai diminuisce molto la resilienza, l'acciaio risulta ancora più fragile della martensite. Sono soggetti a questo fenomeno gli acciai a grana grossa (rispetto a quelli a grana fine) e gli acciai al cromo, cromo-nichel, manganese, cromo-manganese. Per eliminare il fenomeno della fragilità al rinvenimento ci sono tre possibilità:

- 1- Raffreddamento veloce dell'acciaio in modo che la caduta ai bordi dei cristalli non avvenga;
- 2- Rinvenimento eseguito a temperature inferiori all'intervallo critico (questo però non ci permette di ottenere la struttura sorbite, cioè quella tipica degli acciai da costruzione);
- 3- Aggiunta di elementi di alligazione (Molibdeno, Tungsteno) nell'acciaio in grado di eliminare questo fenomeno.

Rinvenimento multiplo

Il trattamento di rinvenimento deve sempre essere eseguito immediatamente dopo la tempra o addirittura prima che il pezzo si raffreddi sotto gli 80 °C, così da evitare (o ridurre di molto) la formazione delle cricche.

Lo svantaggio di questa procedura è che si rischia di stabilizzare una certa quantità di austenite non ancora trasformata in martensite. Se però il rinvenimento è portato ad alta temperatura, per esempio fino 500 °C negli acciai rapidi, non si trasforma più l'austenite in bainite, tuttavia la si impoverisce di carbonio, ne si innalza M_s e M_f e se ne favorisce infine la trasformazione in martensite.

Risulta quindi necessario un successivo rinvenimento, che tenacizza l'ultima martensite formatasi. Su acciai rapidi e

alto legati si può arrivare fino a quattro rinvenimenti successivi.

Voci correlate

- Trattamenti termici degli acciai

Ricottura

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

- *equilibrio chimico*: riduzione della segregazione minore;
- *equilibrio strutturale*: trasformazione delle fasi metastabili;
- *equilibrio meccanico*: riduzione delle tensioni residue interne, incrudimento compreso.

Si utilizza prevalentemente su acciai e su rame per prepararli alle fasi successive della lavorazione, rendendo il materiale più dolce e più omogeneo.

Nel caso dell'acciaio, si riscalda sino ad una temperatura poco superiore a quella di austenitizzazione e si mantiene a tale temperatura per un tempo sufficiente a trasformarlo completamente in austenite; segue poi un lento raffreddamento in forno.

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.

I processi che portano alle modifiche del reticolo cristallino durante la ricottura hanno ispirato la **ricottura simulata** (o *simulated annealing*) che è una metaeuristica simile agli algoritmi genetici.

Ricottura completa o profonda

Detta anche genericamente *ricottura*, essa è eseguibile sugli acciai dotati di punti di trasformazione e consiste in:

- riscaldamento fino a $A_{c3} + 25-50\text{ °C}$ oppure $A_{c1} + 50-70\text{ °C}$;
- sosta in tale condizione per circa 1 ora ogni 50 mm di spessore;
- raffreddamento lento in forno (50-100 °C/h) fino alla formazione stabile di ferrite, perlite o carburi: per acciai al carbonio o debolmente legati vuol dire fino a 600 °C, per acciai molto legati anche 300 °C; in seguito si può raffreddare il pezzo più rapidamente in aria.

La struttura perlitica così raggiunta comporta l'addolcimento massimo e quindi un'ottima lavorabilità a freddo. Lo svantaggio è costituito dal lungo tempo di trattamento e della formazione struttura grossolana

Ricottura di omogeneizzazione

A differenza della precedente, non necessita di acciai con punti di trasformazione; essa raggiunge risultati simili, ma si sottolinea soprattutto la sua necessità per sciogliere eventuali fasi fragili presenti, ad esempio carburi eutectici grossolani, che, sopravvivendo alle successive lavorazioni a caldo, infragilirebbero pezzi in esercizio, come il tagliente di utensili in acciaio rapido o superfici di attrito di cuscinetti.

Essendo costosa, si deve valutarne attentamente la necessità, di solito evidente solo per acciai di elevata qualità per applicazioni critiche (unico caso di acciaio al carbonio che viene così ricotto è quello *automatico*, per evitare che le segregazioni di zolfo ai giunti dei grani provochino fragilità al rosso).

Il processo prevede una permanenza di parecchie ore a $T = A_{c_3} + 100-200$ °C: questo comporta notevoli perdite per ossidazione e, negli acciai ipoeutectoidici, ingrossamento della grana cristallina (surriscaldamento), a cui porre rimedio con la normalizzazione.

Ricottura isotermica o incompleta

Volendo velocizzare la ricottura profonda o di globulizzazione, si può optare per la ricottura isotermica, la quale prevede:

- austenitizzazione ad una temperatura maggiore di A_{c_3} (acciai ipoeutectoidici) o di A_{c_1} (acciaio ipereutectoidici) per ottenere l'*equilibrio strutturale*;
- sottoraffreddamento fino a T_{iso} non troppo inferiore ad A_1 (650-700 °C);
- permanenza fino alla completa trasformazione dell'austenite (vedi curve TTT di Bain);
- raffreddamento in aria o altro, dato che la velocità di raffreddamento non influenza più la trasformazione.

La T_{iso} determina la struttura finale dell'acciaio e quindi la sua durezza, scelta in base alla desiderata deformabilità o lavorabilità alle macchine utensili. Si ottiene così ferrite e/o perlite lamellare strutturalmente molto uniformi, grazie alla sosta a temperatura costante.

Ricottura di coalescenza o di globulizzazione

Detta anche **ricottura pendolare**, conferisce alla cementite una conformazione nettamente *sferoidale* e una distribuzione uniforme. La perlite globulare ha una configurazione stabile, in quanto l'energia superficiale diminuisce rispetto alla configurazione lamellare: questo trattamento aumenta quindi la tenacità e duttilità. Si opera con un tempo di riscaldamento molto lungo (circa 30 ore) o oscillando la temperatura di 20-30 °C attorno ad A_1 .

Il risultato tecnologico è un acciaio ben truciolabile e stampabile anche a freddo, costituito da ferrite interrotta da globuli di cementite. Lo svantaggio consiste in una ritardata dissoluzione della cementite nell'austenite nella successiva tempra.

Ad esempio l'acciaio 100Cr6, per la costruzione di cuscinetti a rotolamento, è così trattato.

Voci correlate

- Trattamenti termici degli acciai
- Incrudimento

Collegamenti esterni

- Forni industriali di ricottura Tentorio ^[1]

Note

[1] <http://www.tentorio.com/english.html>

Carbocementazione

La **carbocementazione** è un processo metallurgico utilizzato per aumentare la resistenza all'usura degli acciai, sviluppata presso i laboratori del Regio Politecnico di Torino dal prof. Giolitti.

L'arricchimento superficiale in carbonio, e la conseguente formazione di carburi, è utile per conferire resistenza all'usura e rafforzamento grazie al meccanismo di Orowan in superficie, unite a tenacità interna (per esempio per denti di ingranaggi). Conviene eseguirlo su acciaio dolce portato oltre Ac_3 , in quanto l'austenite solubilizza meglio il carbonio.

Il carbonio migra oltre la superficie per diffusione, quindi la legge che ne regola il meccanismo è la seconda legge di Fick; importanti sono inoltre parametri come la temperatura, il tipo di reticolo metallico, la differenza di concentrazione tra ambiente esterno e interno (quindi si usa acciaio dolce con $C < 0,2\%$, così che la forza motrice dovuta al gradiente di concentrazione sia la massima possibile) e l'estensione dei giunti dei grani (attraverso i quali gli atomi diffondono meglio).

Esistono diversi metodi di carbocementazione, in base alla sostanza cementante, ma si sottolinea che l'ambiente è sempre gassoso, in quanto vi è sempre la necessità del trasporto operato dall'ossido di carbonio.

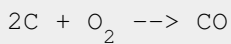
Prodotti di solito cementati: ingranaggi.

Esempio di acciaio cementabile: 18CrMo4.

Carbocementazione solida

Il pezzo è introdotto in una cassetta e ricoperto di cemento solido (85% carbone vegetale e 15% di carbonato di bario e agenti catalizzatori), quindi portato a una temperatura accettabile in considerazione della necessaria velocità di esecuzione e del non eccessivo ingrossamento della grana cristallina. È un processo semplice ma non particolarmente efficace.

La sostanza cementante è il CO, che viene prodotto per reazione del carbone con l'ossigeno:



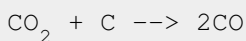
Il CO fornisce carbonio secondo la reazione



Il C prodotto diffonde in modo interstiziale nell'acciaio. Spesso il processo viene accelerato con l'aggiunta di carbonato di bario:



La CO_2 prodotta reagisce con il carbone per produrre CO:

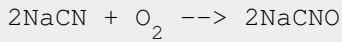


Il trattamento avviene a circa 900 °C, quando l'acciaio è in campo γ . Se alcune zone non devono essere cementate, vengono ricoperte con rame elettrodepositato o con argilla.

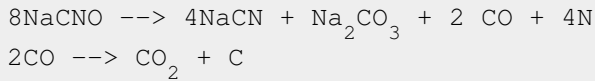
Carbocementazione in bagno di sali

Si circonda il pezzo di cemento liquido (miscela di NaCl, NaCN e Na₂CO₃) ad una temperatura compresa tra 870 e 950 °C; vi è anche dell'azoto che, se in modesta quantità, aiuta a indurire lo strato superficiale.

Il cianuro tende ad ossidarsi alla superficie per dare cianato:



Il cianato tende a decomporsi alla superficie:



Oltre al C si ha diffusione di azoto (nitrurazione).

È un processo più veloce, preciso e meno influenzante la dimensione della grana cristallina e l'aspetto superficiale del pezzo trattato. Si usa per ingranaggi di biciclette e motociclette, catene, parti di computer, armi, strumenti di precisione.

Carbocementazione in fase gassosa

È il metodo di cementazione più diffuso e più facile da controllare, nonché l'unico utilizzato attualmente.

L'agente cementante è ossido di carbonio creato dalla combustione di gas naturale, metano, etano, propano, butano o carbone a circa 900 °C, secondo la reazione:



Altro carbonio deriva dalla pirolisi degli idrocarburi saturi.

Il potenziale di carbonio dell'atmosfera deve essere sempre maggiore della concentrazione di tale elemento nel pezzo trattato, altrimenti prevale la decarburazione promossa da CO₂, H₂O e H₂. Inizialmente esso è pari a quello di saturazione dell'austenite alla temperatura di processo (fase di cementazione attiva). In seguito si abbassa la concentrazione di C dell'atmosfera al valore che si vuole avere sulla superficie del pezzo, così che l'eccesso di C diffonda verso l'interno (periodo di diffusione).

Trattamento termico dei pezzi cementati

L'ottenimento di buone proprietà meccaniche necessita di un trattamento termico separato per il cuore e per la superficie.

Trattamento termico del cuore

Essendo il contenuto di carbonio basso, il cuore viene portato in campo austenitico, a circa 880 °C, e successivamente temprato in acqua. Si ottiene una miscela di ferrite, bainite e martensite, a grano fine.

Trattamento termico della superficie

Nel corso del primo trattamento, la superficie viene completamente trasformata in martensite. Per questo si procede ad un trattamento a circa 760 °C, in cui la superficie si trasforma in austenite, seguito da tempra in acqua, con l'ottenimento di martensite fine.

Un rinvenimento a circa 200 °C completa il ciclo.

Voci correlate

- Carbonitrurazione
- Nitrurazione

Nitrurazione

La **nitrurazione** è un processo industriale di indurimento superficiale dell'acciaio.

Il procedimento consiste nel portare il metallo a 550 °C circa (il tempo di trattamento è quindi lungo) per introdurre azoto atomico, il quale viene assorbito dalla ferrite superficiale del metallo e forma nitruri, prevalentemente Fe₄N, molto duri e che distorcono il reticolo cristallino. Il meccanismo di rafforzamento che quindi interviene è quello di Orowan.

Lo spessore dello strato indurito è minore di quello ottenuto per carbocementazione, ma in compenso la sua durezza è molto maggiore e rimane stabile fino a temperature di 600-700 °C.

Non è possibile utilizzare l'azoto molecolare, eccessivamente ingombrante, per cui si ricava l'azoto atomico dalla dissociazione termica dell'ammoniaca o dalla diffusione da bagni di sale.

Vantaggi:

- durezza superficiale e resistenza all'usura;
- stabilità al rinvenimento e quindi durezza a caldo;
- resistenza alla fatica e agli intagli;
- resistenza alla corrosione;
- stabilità dimensionale
- i pezzi possono essere sottoposti al trattamento completamente finiti perché il processo, avvenendo a bassa temperatura, non provoca tensioni e deformazioni.

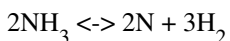
Considerato il costo elevato, si nitrurano solo acciai dove il risultato sia tale da compensare la spesa: quindi quelli contenenti cromo, molibdeno e alluminio (< 1%), che formano nitruri più efficaci di quelli di ferro. Si preferiscono inoltre acciai bonificati perché è necessaria tenacità al cuore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

Utilizzi più frequenti: calibri, riscontri, ingranaggeria di precisione, fasce elastiche, alberi a camme e a gomiti per la nitrurazione in fase gassosa; utensili di acciaio rapido a profilo costante (creatori, maschi, pettini, punte), acciai inossidabili o per valvole austenitici, alcuni acciai per stampi per la nitrurazione in bagno di sale.

Si sconsiglia di nitrurare pezzi sottoposti a elevata compressione.

Nitrurazione in fase gassosa

La dissociazione termica dell'ammoniaca, catalizzata dall'acciaio, produce:



quindi azoto atomico che diffonde nel ferro. Superati i limiti di solubilità dell'azoto nel ferro si formano i nitruri di ferro. Il primo nitruro che si forma quello a minor contenuto di azoto Fe₄N, all'aumentare del tenore di azoto assorbito si forma il nitruro Fe₂N. 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 Nitruante N_p (grado di dissociazione dell'ammoniaca) influenza lo spessore e la morfologia della **coltre bianca** (strato di Fe_2N e Fe_4N) 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 nitruante ridotto (si aumenta il grado di dissociazione) prima della fine del processo si può ridurre o eliminare totalmente la coltre bianca.

Voci correlate

- Carbonitrurazione
- Carbo cementazione

Fonti e autori delle voci

Tempra *Fonte:* <http://it.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31900529> *Autori:* Adfc, Agentilini, Ary29, Aushulz, Avesan, Bartolomio, Basilicofresco, Bumba, Ermanon, Frack, Gianpietro72, Gleridis, Itisverdi, Jacopo, Madaki, Marika Tiemersma, Mars79, Midnight bird, Paginazero, Piero, Piero Montesacro, Qualc1, Quelbravoragazzo, Retaggio, Sbisolo, Simone, Square87, Tiesse, Towerman, Twice25, Vomitron, 30 Modifiche anonime

Rinvenimento *Fonte:* <http://it.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30418180> *Autori:* Adfc, Aushulz, Avesan, Bumba, Hellis, Jacopo Werther, Marcol-it, Massimiliano Lincetto, Mau db, Salvatore Ingala, Senpai, Tiesse, 4 Modifiche anonime

Ricottura *Fonte:* <http://it.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28879665> *Autori:* Adfc, Archenzo, Aushulz, Avesan, Bggoldie, Bumba, CarloV, Cellax, ChemicalBit, Dariospartaco, Fiaschi, Frieda, Lanerossi, M7, Madaki, Raggiante, Senpai, Tiesse, Tujo, 13 Modifiche anonime

Carbocementazione *Fonte:* <http://it.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30301914> *Autori:* Adfc, Aushulz, Avesan, Buggia, Bumba, CavalloRazzo, Cisco79, Dommac, Francisco83pv, Piero Montesacro, Tiesse, 4 Modifiche anonime

Nitrurazione *Fonte:* <http://it.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31169723> *Autori:* Adfc, Aushulz, Avesan, Buggia, CavalloRazzo, Francisco83pv, Guam, Mancusoantonio, Montreal, Rojelio, Tiesse, 2 Modifiche anonime

Fonti, licenze e autori delle immagini

Immagine:Photoelasticimetry1_bis.JPG **Fonte:** http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Photoelasticimetry1_bis.JPG **Licenza:** Public Domain **Autori:** Ripounet

Licenza

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>
