



La temprabilità degli acciai speciali da costruzione

Marco V. Boniardi
Andrea Casaroli

Gli acciai speciali da costruzione sono una classe di acciai largamente impiegata in molti campi dell'ingegneria industriale, in particolare, nell'ambito dell'industria meccanica e metallurgica, dell'industria chimica e di processo, del settore automotive e dell'energia.

Questa classe di acciai ha elevate caratteristiche meccaniche sia in termini di resistenza a trazione e resistenza a fatica (resistenza alle sollecitazioni statiche e dinamiche) sia per quanto riguarda la loro resilienza e tenacità (resistenza alla frattura fragile). L'insieme di queste proprietà, che devono essere garantite sia su pezzi di piccole dimensioni che su componenti medio - grandi, rende gli acciai speciali da costruzione particolarmente adatti alla realizzazione di alberi di trasmissione di potenza, alberi a camme ed a gomiti, assi per la trasmissione di moto, assili ferroviari, rotor, steli, perni, leveraggi, camme, punterie, valvole, bielle, manovellismi, guide lineari, ruote dentate, colonne per magli e presse, molle ad elica e a balestra, cuscinetti, ecc. (figura 1).



Figura 1: Esempio tipico di pezzi meccanici (alberi a gomiti) sottoposti al trattamento di bonifica.

Cinque sono le principali famiglie degli acciai speciali da costruzione:

- acciai da bonifica,
- acciai autotemperanti,
- acciai per molle,
- acciai da cementazione
- acciai da nitrurazione.

Ciascuna di queste famiglie è caratterizzata da ben precisi campi d'applicazione ed evidenzia specifiche proprietà finalizzate al loro impiego.

L'aspetto caratteristico che accomuna le cinque famiglie degli acciai speciali da costruzione è il trattamento termico che viene eseguito sui pezzi prima che vengano messi in esercizio: tale trattamento prende il nome di bonifica e consta di un trattamento termico di tempra seguito da un trattamento termico di rinvenimento.

Attraverso il trattamento di bonifica (tempra + rinvenimento) l'acciaio assume una particolare microstruttura detta martensite rinvenuta. La martensite rinvenuta è infatti la microstruttura degli acciai che meglio delle altre permette di combinare le proprietà meccaniche-metallurgiche che sono richieste ai componenti industriali, in particolare resistenza e tenacità.

Poiché gli acciai speciali da costruzione sono per la quasi totalità degli acciai ipoeutetoidici (hanno cioè un tenore di carbonio inferiore del valore dell'eutettoide che per il Fe - C vale 0,77%), il trattamento di tempra viene eseguito riscaldando l'acciaio a circa 50°-70° in più della temperatura del suo punto critico A_{c3} . Per effetto di questo riscaldamento la microstruttura dell'acciaio, che prima del trattamento è perlitico - ferritica, si trasforma in austenite (figura 2).

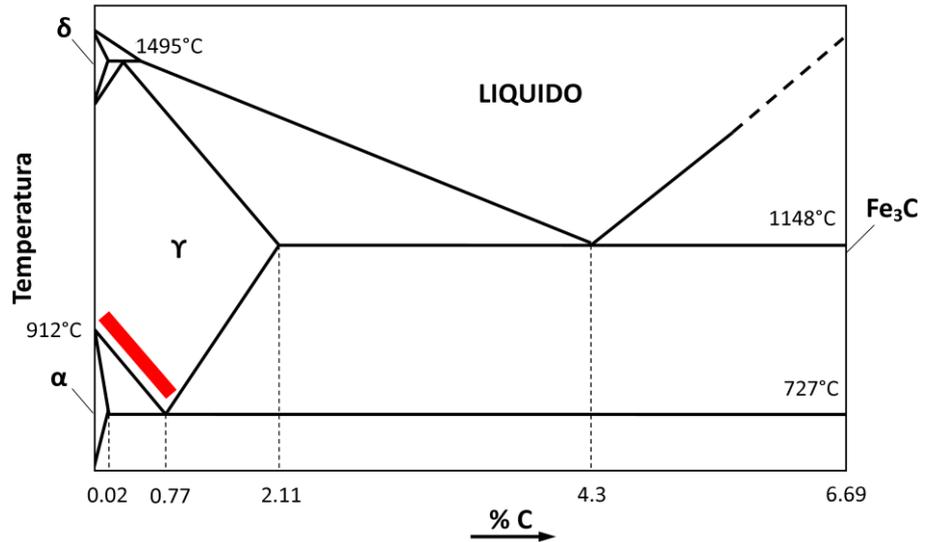


Figura 2: Diagramma di stato schematico ferro-carbonio con l'indicazione della zona di austenitizzazione degli acciai speciali da costruzione

Successivamente, dopo un adeguato tempo di mantenimento che è funzione delle dimensioni del pezzo e che serve a rendere uniforme la temperatura all'interno del pezzo stesso, l'acciaio viene bruscamente raffreddato in un fluido, di solito acqua o olio, chiamato fluido temprante.

Il rapido raffreddamento indotto dall'immersione del pezzo nel fluido temprante induce la trasformazione dell'austenite in martensite come si può chiaramente desumere osservando le curve di trasformazione anisoterma dell'austenite, o curve CCT, per l'acciaio trattato.

Le curve CCT, anche dette curve di Bain dal nome del loro autore, permettono di stabilire la microstruttura al termine del processo termico, nota che sia la composizione chimica dell'acciaio sottoposto a trattamento termico e la legge di raffreddamento imposta.

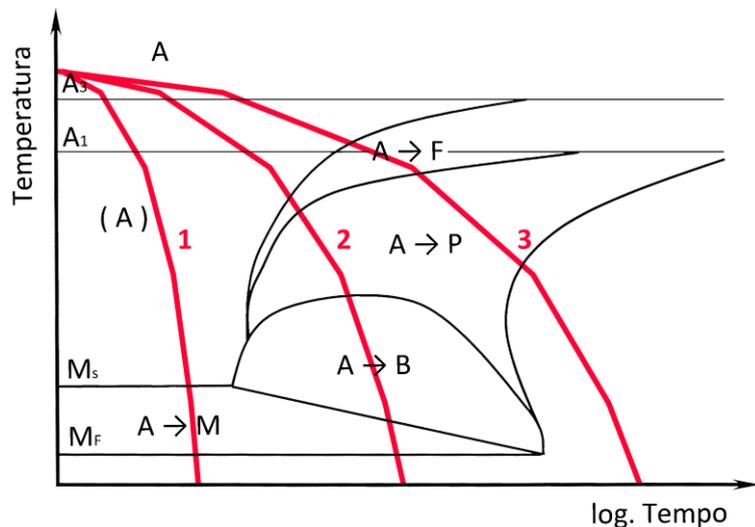


Figura 3: Generica curva di trasformazione anisoterma dell'austenite (o curva di Bain o curva CCT) - (A: austenite stabile; (A): austenite instabile; F: ferrite; P: perlite; B: bainite; M: martensite; M_s : martensite start; M_f : martensite finish).

Considerando ad esempio la generica curva CCT mostrata in figura 3 (ma il lettore dovrebbe considerare che esiste una specifica curva CCT per ogni composizione chimica di acciaio considerato) se la legge di raffreddamento seguita è quella indicata dalla traiettoria 1 la struttura sarà completamente martensitica al termine del raffreddamento. Se, invece, la legge di raffreddamento sarà quella indicata dalla traiettoria 2, l'austenite si trasformerà in parte in ferrite, in parte in perlite, in parte in bainite e in parte in martensite. Quando invece la traiettoria di raffreddamento sarà molto lenta (come nel caso 3) l'austenite si trasformerà completamente in ferrite e perlite. Un esempio di una curva CCT reale relativa ad un acciaio da bonifica tipo 42CrMo4 è mostrato in figura 4.

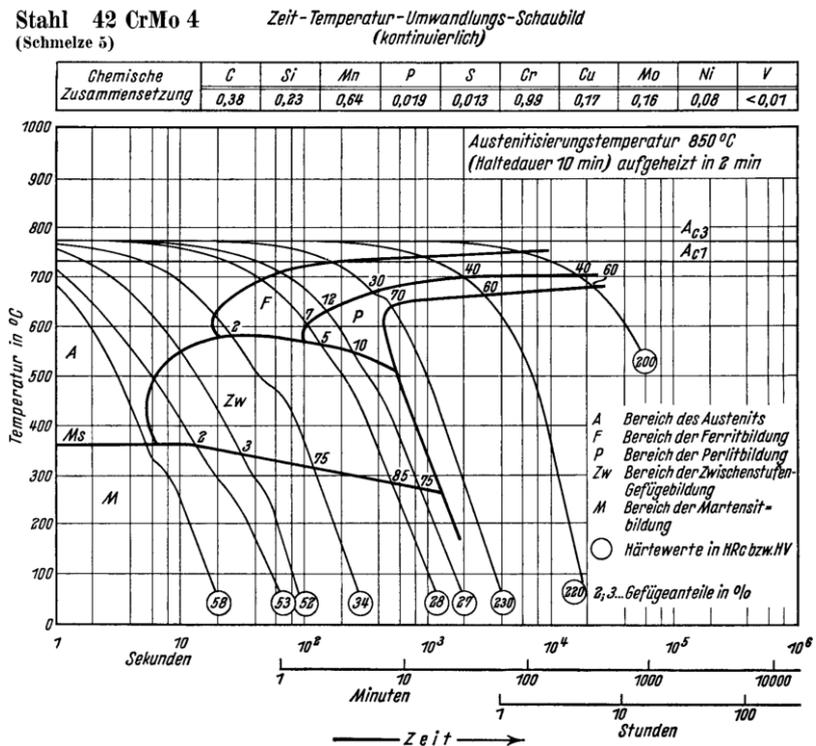


Figura 4: Esempio di una tipica curva CCT reale relativa ad un acciaio 42CrMo4 (Temperatura di austenitizzazione: 850°; tempo di mantenimento: 10 min.; riscaldamento: 2 min.).

La martensite, che si forma durante il brusco raffreddamento di tempra, è una struttura tetragonale in cui il carbonio, ben solubile nell'austenite, è rimasto intrappolato nel reticolo cristallino senza avere la possibilità di dare origine, per diffusione allo stato solido, alle tipiche strutture d'equilibrio quali la ferrite e la perlite o di non equilibrio, quali la bainite.

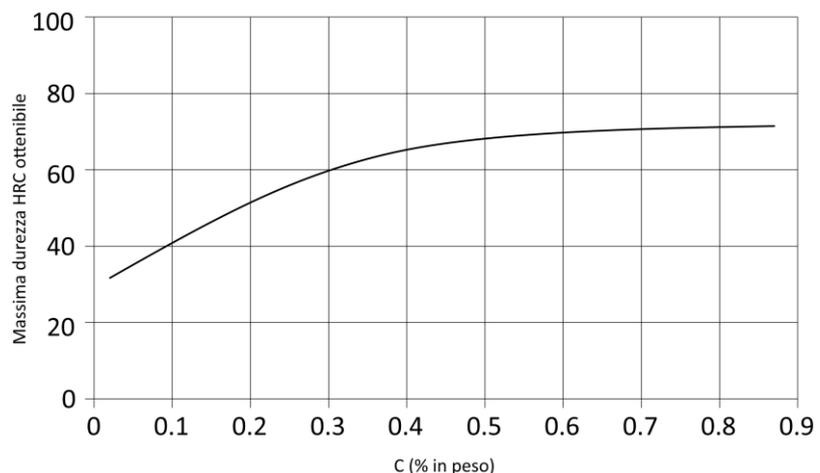


Figura 5: Andamento indicativo della durezza della struttura martensitica degli acciai al variare del tenore di carbonio (adattato da W. Nicodemi, Metallurgia - principi generali, Zanichelli, Bologna, 2000).

Il carbonio presente nella martensite distorce il suo reticolo e rende la struttura molto dura: maggiore è la quantità di carbonio maggiore sarà la durezza della martensite che si forma per quel dato acciaio (vedi figura 5). L'aspetto tipico di una struttura martensitica dopo tempra è mostrato in figura 6.

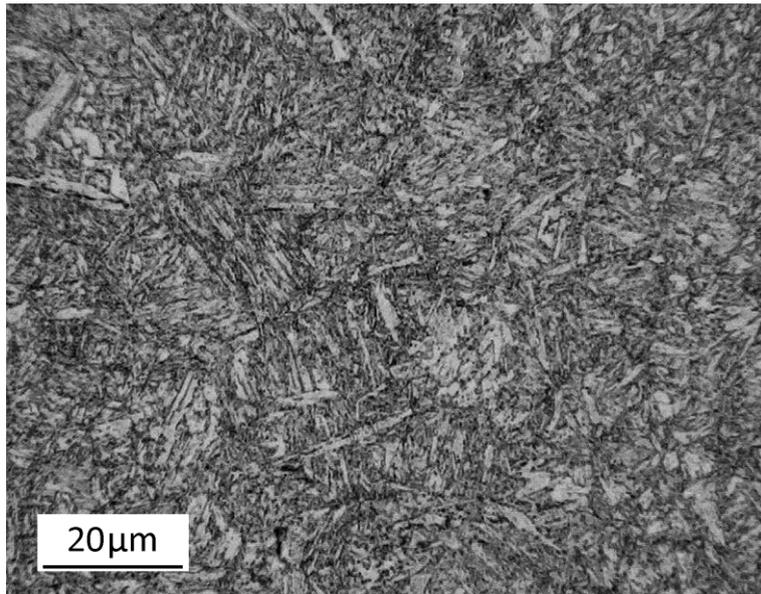


Figura 6: Tipico aspetto microstrutturale della martensite allo stato rinvenuto (500x; nital 2%; acciaio 30NiCrMo12 - fonte: Marco Boniardi - Laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano).

Un ulteriore elemento da considerare è l'insorgenza di tensioni residue indotte dal brusco raffreddamento di tempra. Poiché la trasformazione dell'acciaio in martensite induce sempre un aumento del volume specifico e poiché la trasformazione strutturale austenite → martensite interessa prima la superficie e poi il cuore dei pezzi, ciò provoca la nascita di tensioni residue di trazione sulla superficie dei pezzi e di compressione a cuore dei medesimi.

IL TRATTAMENTO DI RINVENIMENTO

La martensite ottenuta dopo tempra, anche detta martensite di piena tempra, è certamente una struttura molto dura ma presenta anche una notevole fragilità. Il pezzo così trattato avrà quindi un'elevata resistenza meccanica ma, per contro, evidenzierà notevoli problemi in termini di tenacità. Inoltre si consideri che la presenza di tensioni residue di trazione sulla superficie dei componenti può penalizzare di molto la loro resistenza meccanica in esercizio. Si rende quindi necessaria l'esecuzione di un ulteriore trattamento termico, detto rinvenimento, la cui principale funzione è quella di attenuare la durezza della martensite aumentando nel contempo la tenacità dell'acciaio. Attraverso il riscaldamento dell'acciaio si favorisce la diffusione del carbonio che, fuoriuscendo dal reticolo cristallino della martensite ne riduce la sua distorsione: ciò provoca la summenzionata riduzione di durezza e l'incremento di resistenza alla frattura fragile.

Al crescere della temperatura di rinvenimento o del tempo di mantenimento a detta temperatura diminuisce progressivamente la durezza dell'acciaio ma aumenta contemporaneamente la sua tenacità (vedi figura 7).

Alle medesime temperature si assiste anche alla riduzione progressiva delle tensioni residue indotte dal trattamento di tempra, con una progressiva omogeneizzazione lungo tutta la sezione resistente del pezzo.

In relazione alla famiglia di acciai speciali da costruzione considerata, sono previste differenti temperature di rinvenimento: 600°C per gli acciai da bonifica e per gli acciai da nitrurazione, 450°C per gli acciai per molle, 200°C per gli acciai autotemperanti e 150°C per gli acciai da cementazione.

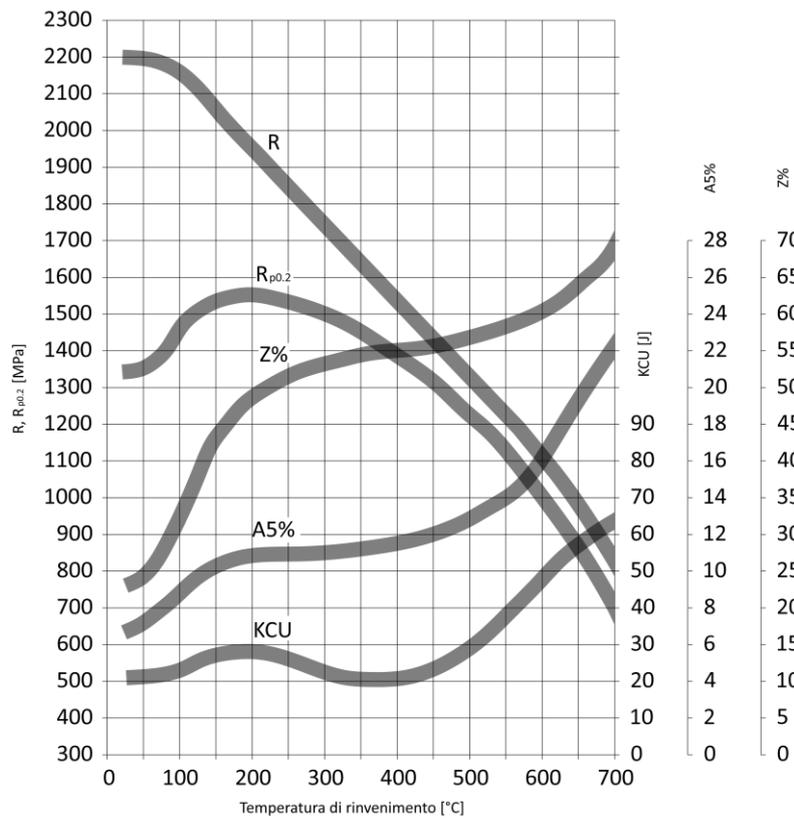


Figura 7: Andamento delle proprietà meccaniche di un acciaio 39NiCrMo3.

In tabella 1 sono mostrati alcuni tra gli acciai speciali da bonifica più utilizzati unitamente alle caratteristiche meccaniche ottenibili dopo tempra e rinvenimento a 600°C.

| Designazione alfanumerica | Designazione alfanumerica | R _e [MPa] min. | R _m [MPa] | A [%] min. | Z [%] min. | KV [J] min. |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|------------|------------|-------------|
| C30 | 1.1178 | 350 | 550-700 | 20 | 45 | 40 |
| C40 | 1.1186 | 400 | 630-780 | 18 | 40 | 30 |
| 25CrMo4 | 1.7218 | 600 | 800-950 | 14 | 55 | 50 |
| 42CrMo4 | 1.7225 | 750 | 1000-1200 | 11 | 45 | 35 |
| 36NiCrMo4 | 1.6511 | 800 | 1000-1200 | 11 | 50 | 40 |
| 34NiCrMo6 | 1.6582 | 900 | 1100-1300 | 10 | 45 | 45 |
| 36NiCrMo16 | 1.6773 | 1050 | 1250-1450 | 9 | 40 | 30 |

Tabella 1: Alcuni tipici acciai speciali da costruzione (da bonifica) e loro caratteristiche meccaniche ottenibili dopo tempra e rinvenimento a 600°C; sezione di riferimento da 16mm a 40mm (tratto dalla norma UNI EN 10083-1).

Al termine del trattamento di rinvenimento il pezzo ha raggiunto le caratteristiche adeguate per essere posto in esercizio: possiede tenacità e resistenza alla frattura fragile adeguate all'impiego pur mantenendo una buona resistenza alle sollecitazioni statiche (carico unitario di rottura e carico unitario di snervamento) e dinamiche (limite a fatica) unitamente ad una discreta durezza.

Quanto fin qui descritto, in particolare per ciò che concerne il trattamento di tempra, è certamente corretto se applicato al caso di un pezzo di piccole dimensioni, ossia ad un pezzo in cui si può ragionevolmente ritenere che la legge di raffreddamento sia pressoché omogenea in tutti i punti della sua sezione. Se consideriamo invece pezzi di media o grande dimensione si deve necessariamente affrontare il problema della differente legge di raffreddamento che esiste tra la superficie e il cuore del pezzo stesso: la superficie tenderà a raffreddarsi piuttosto rapidamente per effetto del contatto diretto con il fluido temprante mentre il cuore, a causa della massa termica del pezzo, avrà una legge di raffreddamento molto più blanda rispetto a quella della superficie. Quali sono gli effetti di tale differenza in termini di velocità di raffreddamento e di microstruttura ottenibile?

Riconsideriamo le curve CCT precedentemente descritte e supponiamo di voler trattare un pezzo di medie dimensioni, temprandolo in olio. Indichiamo con dei numeri (da 1 a 7, 1 la superficie 7 il cuore) i vari punti lungo la sezione del pezzo che subiscono una legge di raffreddamento differenziata; sovrapponiamo quindi tali leggi di raffreddamento e valutiamo le microstrutture che si ricavano (vedi figura 8).

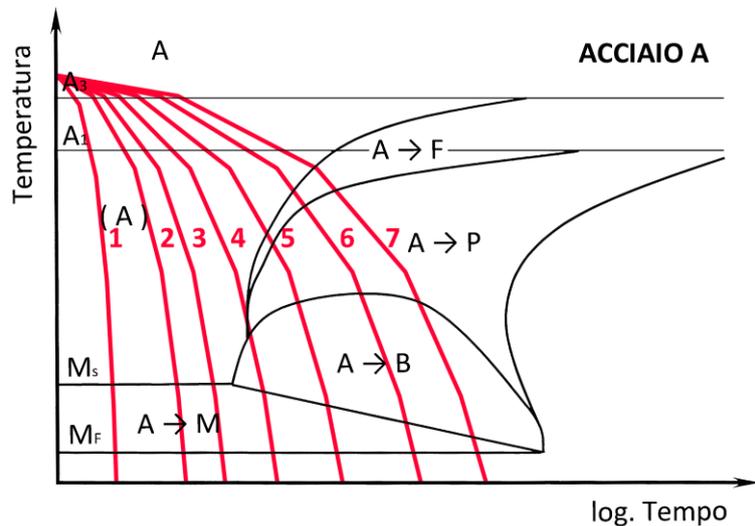


Figura 8: Traiettorie di raffreddamento (indicate con una numerazione progressiva da 1 a 7) sovrapposte alla curva CCT di un generico acciaio ad alta temprabilità.

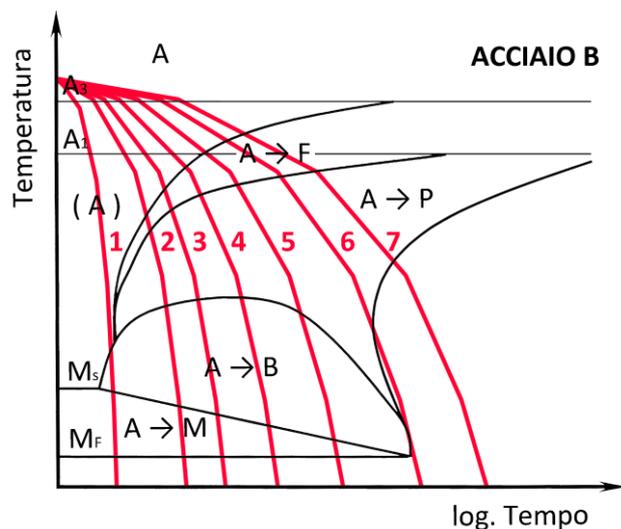


Figura 9: Traiettorie di raffreddamento (indicate con una numerazione progressiva da 1 a 7) sovrapposte alla curva CCT di un generico acciaio a bassa temprabilità.

Si nota immediatamente che solo fino al punto 3 la struttura ottenuta dopo tempra è completamente martensite mentre, da 4 a 7 la struttura è un misto di

martensite più bainite, più ferrite e perlite.

Sempre utilizzando la stessa geometria del pezzo di prima, proviamo adesso a cambiare acciaio e consideriamone uno che abbia le curve CCT più spostate verso l'asse delle ordinate. Se ipotizziamo che il mezzo temprante sia lo stesso di prima (olio), le traiettorie di raffreddamento sono praticamente le medesime; si ottiene perciò il grafico di figura 9 ove è evidente che questa volta è solo lungo il punto 1 che si ottiene struttura completamente martensitica.

Ne consegue immediatamente che trattando pezzi aventi le medesime dimensioni ed utilizzando gli stessi fluidi tempranti, si possono ottenere risultati anche molto diversi semplicemente cambiando il tipo di acciaio con cui sono realizzati i pezzi stessi: in particolare si può avere uno strato di martensite più o meno profondo.

Questa particolare attitudine degli acciai a formare martensite in profondità all'interno dei pezzi, prende il nome di temprabilità e i vari acciai si definiscono più o meno temprabili in relazione a ciò.

Si noti come tale proprietà sia strettamente correlata alla natura dell'acciaio, in particolare alla sua composizione chimica, e sia particolarmente importante in considerazione dell'impiego degli acciai speciali da costruzione.

Poiché la durezza delle microstrutture in cui si trasforma l'acciaio decresce progressivamente passando dalla martensite, alla bainite fino alle perlite-ferrite, è evidente che se in un pezzo la microstruttura è omogenea, lo saranno anche tutte le proprietà meccaniche (resistenza, durezza, tenacità): tale omogeneità ed elevata resistenza sarà garantita quindi dalla struttura martensitica qualora questa sia presente in buona parte della sezione resistente del pezzo. In generale, quindi, è buona norma prescrivere, per pezzi realizzati in acciaio speciale da costruzione, almeno un 50% di martensite a cuore.

COME SI MISURA LA TEMPRABILITÀ

Il sistema più immediato per misurare la temprabilità di un acciaio è la cosiddetta prova Jominy. Tale prova consiste nel realizzare un provino di forma cilindrica della lunghezza di 100mm e del diametro di 25mm, dotato di un supporto in corrispondenza di una delle due estremità. Il provino viene austenitizzato alle temperature che si desiderano studiare e, dopo essere stato estratto dal forno, viene posto su un supporto ed investito da un getto di acqua in corrispondenza dell'estremità libera (vedi figura 10).

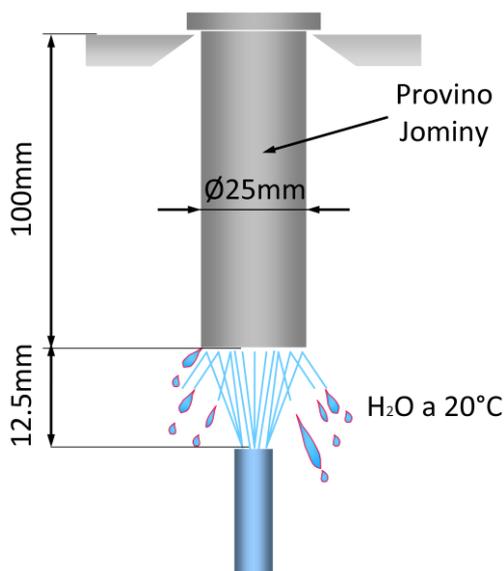


Figura 10: Schema di massima della modalità di esecuzione della prova Jominy.

Per effetto del raffreddamento di una delle estremità (che prende il nome di estremità temprata), il provino subisce una legge di raffreddamento variabile in relazione alla maggiore o minore distanza dall'estremità investita dal getto

d'acqua. Quanto più si è vicini all'estremità temprata tanto più la legge di raffreddamento sarà drastica, quanto più ci si allontana da essa, tanto più la legge di raffreddamento sarà blanda.

Al termine del raffreddamento si provvede a lavorare meccanicamente il provino lungo una generatrice e a misurare la durezza dei vari punti, allontanandosi progressivamente dall'estremità temprata: ciò che si ottiene è la cosiddetta curva Jominy per l'acciaio esaminato. Un tipico esempio è mostrato in figura 11.

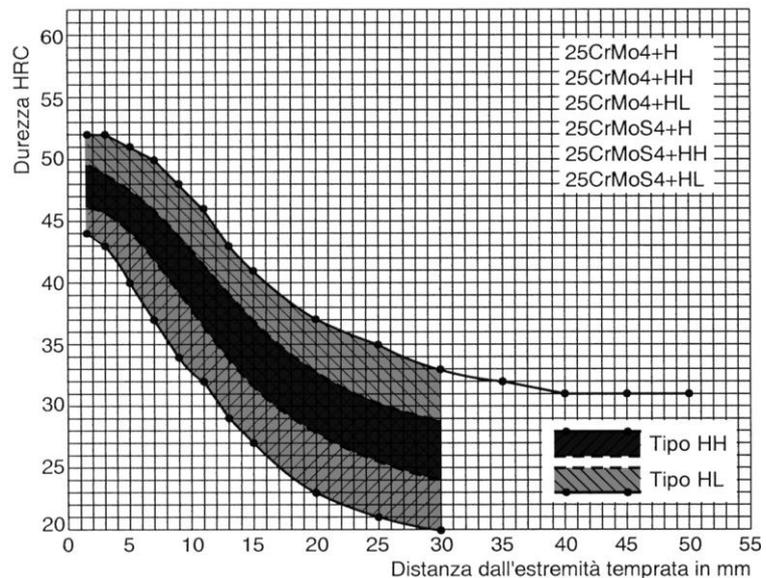


Figura 11: Andamento della curva Jominy per un acciaio 25CrMo4; HL: banda a bassa temprabilità; HH: banda ad alta temprabilità (tratto dalla norma UNI EN 10083-1).

Confrontando tra loro le curve Jominy di due acciai è perciò possibile determinare quello dei due che mostra la temprabilità più accentuata: più si mantiene orizzontale la curva Jominy (a prescindere dal livello di durezza raggiunto) più sarà temprabile l'acciaio. In figura 12, ad esempio, l'acciaio 42CrMo4 ha una temprabilità maggiore dell'acciaio C50 anche se quest'ultimo evidenzia una durezza più elevata in superficie: tale differenza implica quindi che un pezzo realizzato in 42CrMo4 avrà una durezza (quindi una resistenza) molto più omogenea, anche se leggermente minore, rispetto a quella del medesimo pezzo realizzato in C50.

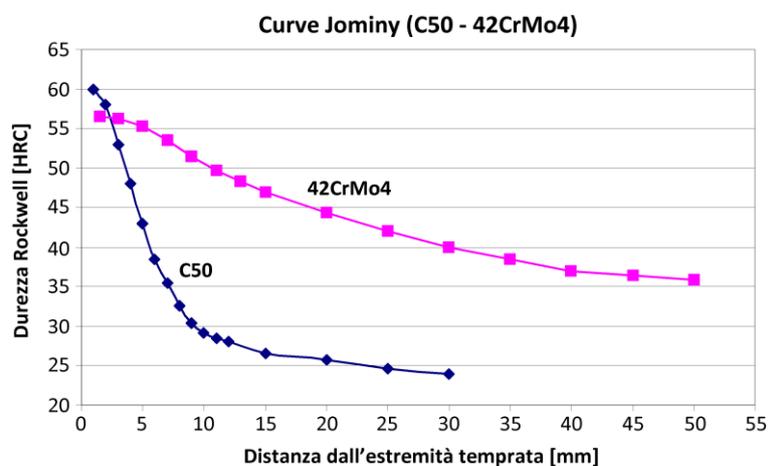


Figura 12: Confronto tra le curve di temprabilità Jominy di un acciaio C50 e di un acciaio 42CrMo4.

Quello che si verifica lungo il provino Jominy è, grosso modo, analogo a quello che si verifica su un componente cilindrico raffreddato in un fluido temprante: la superficie del componente cilindrico è assimilabile all'estremità temprata della prova Jominy mentre il cuore del cilindro avrà una legge di raffreddamento più simile alle zone lontane dall'estremità temprata.

LA TEMPRABILITÀ E LA COMPOSIZIONE CHIMICA DEGLI ACCIAI

Di conseguenza se la curva Jominy dell'acciaio impiegato non subisce brusche variazioni, si otterrà una microstruttura pressoché omogenea e costante e, lungo la sezione del cilindro, non si avranno grandi variazioni delle proprietà meccaniche.

Ne deriva, inoltre, che pezzi di grande sezione dovranno essere realizzati in acciaio con elevata temprabilità mentre pezzi di media o piccola sezione potranno essere prodotti utilizzando acciai con temprabilità via via decrescente.

Il parametro che maggiormente influenza la temprabilità di un acciaio è la sua composizione chimica. In generale maggiore è la quantità degli elementi chimici aggiunti, maggiore sarà la temprabilità dell'acciaio. Tale effetto dipende direttamente dallo spostamento delle curve di trasformazione anisoterma dell'austenite (curve CCT): poiché l'aggiunta di elementi di lega sposta in basso e a destra la posizione delle curve CCT, anche con una legge di raffreddamento blanda sarà possibile ottenere struttura martensitica.

Non tutti gli elementi di lega hanno però la medesima efficacia: gli elementi che mostrano il più marcato aumento della temprabilità sono il cromo, il manganese, il molibdeno e il vanadio mentre altri elementi quali il nichel, ad esempio, hanno scarsa efficacia. Il carbonio, infine, non ha un effetto significativo sulla temprabilità degli acciai anche se la sua presenza è molto importante poiché è l'elemento che rende dura la struttura martensitica.

Da ultimo si segnala che anche la dimensione media del grano cristallino tende ad influenzare la temprabilità degli acciai: un grano grossolano favorisce in modo blando l'aumento della temprabilità mentre un grano molto fine la riduce.

Proprio sulla base di queste osservazioni diversi ricercatori si sono occupati di stabilire correlazioni numeriche tra la composizione chimica e la temprabilità degli acciai: i risultati ottenuti hanno dato origine a diverse normative la più significativa delle quali risulta essere la ASTM 255 ripresa dalla UNI EN ISO 642. Mediante queste norme è possibile, nota la composizione chimica dell'acciaio, calcolare la curva di temprabilità Jominy.

PER APPROFONDIRE

- W. Nicodemi, Metallurgia - principi generali, Zanichelli, Bologna, 2000.
- W. Nicodemi, Acciai e leghe non ferrose, Zanichelli, Bologna, 2000.
- A. Burdese, Metallurgia e tecnologia dei materiali metallici, UTET, Torino, 1992.

DIRITTI

Questa pubblicazione è proprietà letteraria riservata di Marco V. Boniardi e Andrea Casaroli; essa è protetta dal diritto d'autore, ai sensi della legge 22 aprile 1941 n. 633 e successive modificazioni, e dal Titolo IX del libro Quinto del codice civile italiano.

I diritti di traduzione, di riproduzione, di memorizzazione elettronica e di adattamento totale e parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche) sono riservati per tutti i paesi.



La temprabilità degli acciai speciali da costruzione

Marco V. Boniardi
Andrea Casaroli

Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano
via La Masa, 1 20156 Milano