3 I trattamenti termici

3.1 I trattamenti termici degli acciai

3.1.1 Influenza della velocità di raffreddamento

Prima di illustrare i vari procedimenti di trattamento termico degli acciai, risulta opportuno descrivere, anche se brevemente, l'importanza della velocità di raffreddamento del carbonio e le strutture che si vengono a formare con il variare di essa. In questa ottica, la parte del diagramma Fe-C che riveste maggior interesse pratico è quella nell'intorno del punto eutettoide S e al di sotto dei 900°C (Fig. 3-1). Alcune tra le curve del diagramma Fe-C sono particolarmente importanti in relazione ai trattamenti termici che saranno esaminati più avanti e vengono indicate con i seguenti simboli:

- A_1: Temperatura alla quale l'austenite eutettoidica si trasforma in perlite (t=723°C)
- A_3: Temperatura alla quale l'austenite inizia ad emettere cristalli di ferrite α.
- A_m: Temperatura alla quale l'austenite inizia ad emettere cristalli di cementite.

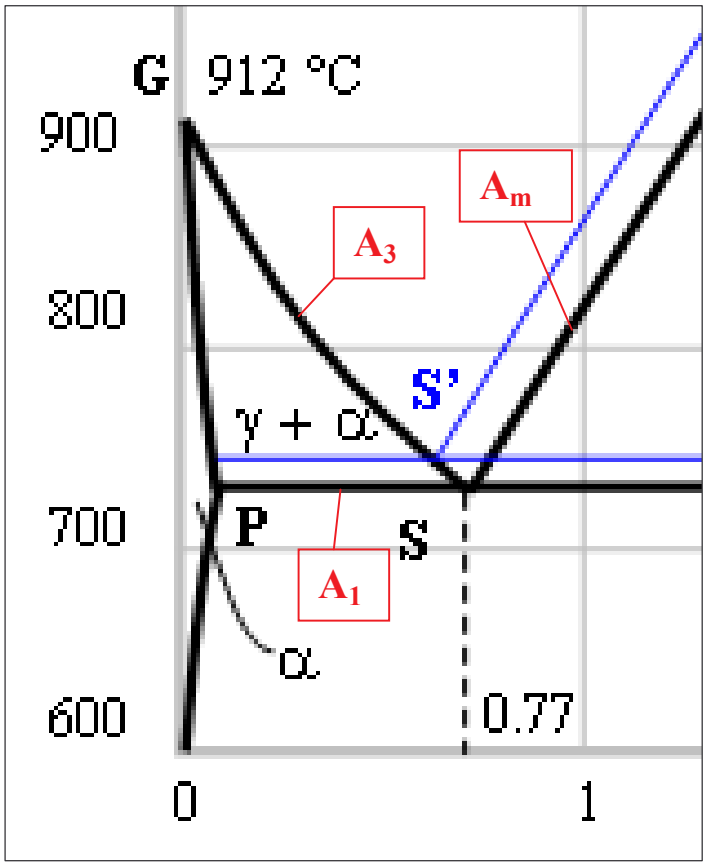

Figura 3-1: Diagramma Fe-C nella zona attorno al punto eutettoide S

Lezione n°5: **I trattamenti termici**

Come è noto il diagramma Fe-C è stato costruito lasciando raffreddare la lega in un tempo molto lungo in modo da rendere stabili le strutture che si vengono a trovare all'interno di esso; quindi lasciando che il carbonio migri liberamente per formare la cementite (Fe_3C).
Ma se si raffredda in modo più veloce; il carbonio non avendo il tempo necessario di emigrare dalla cella γ per formare cementite, forma strutture che non compaiono sul diagramma Fe-C che dipendono dalla stessa velocità di raffreddamento.

1. a velocità di raffreddamento molto basse, cioè con raffreddamenti molto lenti, si svolgono regolarmente ambedue i processi di diffusione e cioè la migrazione degli atomi di ferro per assumere un nuova disposizione reticolare ($\gamma \rightarrow \alpha$) e la migrazione degli atomi di carbonio per formare la cementite. Il prodotto della trasformazione è quindi perlite (ferrite+cementite). A velocità maggiore di raffreddamento la perlite diventa molto fine a assume il nome di **troostite** (fig. 3-2).
2. a velocità di raffreddamento intermedie la diffusione del carbonio è ancora possibile e la cementite si forma ancora. Risulta invece soppressa la diffusione degli atomi di ferro per formare il nuovo reticolo α e la trasformazione avviene non per diffusione, ma per una specie di movimento a scatto: questo movimento avviene per scambi atomici. La struttura che ne risulta si chiama **bainite** (fig. 3-3).
3. a velocità di raffreddamento molto elevate le trasformazioni non sono più possibili; non solo viene soppressa la diffusione per la trasformazione reticolare, ma anche il carbonio non si può più diffondere per formare la cementite. Ne consegue che la trasformazione ($\gamma \rightarrow \alpha$) avviene, come nel caso della bainite con movimento a scatto: gli atomi di carbonio, che non possono migrare, restano imprigionati nel reticolo del ferro α allargandone il reticolo il quale viene distorto e assume una forma tetragonale. Questa è la natura della **martensite**, la struttura che, come vedremo, si forma con il processo di **tempra** (fig. 3-4 e fig. 3-5).

Ciò sta a significare che la velocità di raffreddamento sposta le linee di equilibrio del diagramma Fe-C abbassando A_3 e A_1 in modo da far incontrare i due punti critici.(fig. 3-6).

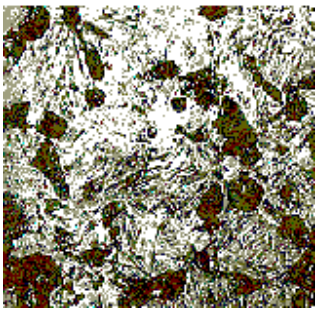		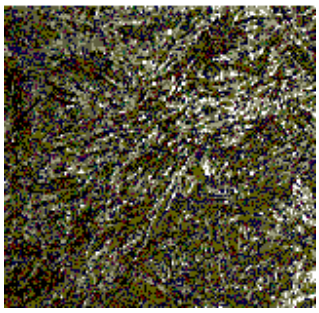
Figura 3-2: Troostite	**Figura 3-3: Bainite**	**Figura 3-4: Martensite**

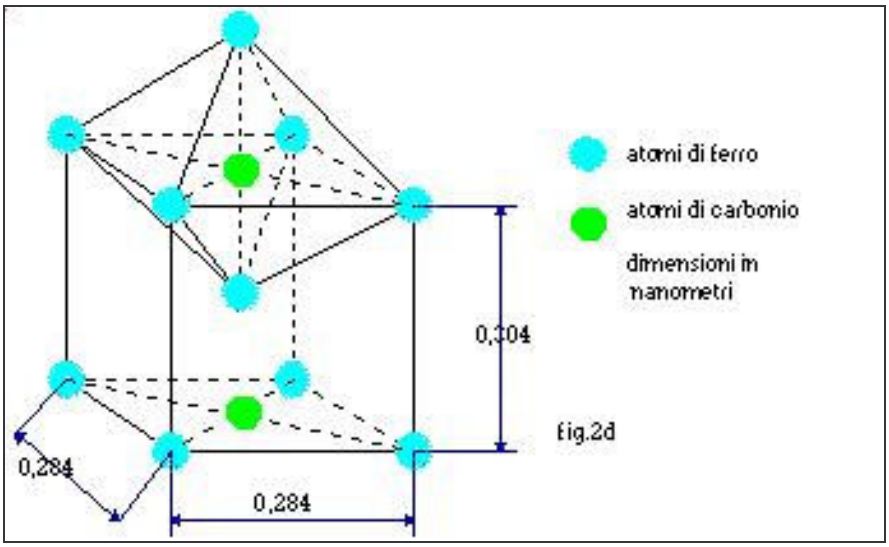

Figura 3-5: Struttura cristallina della martensite

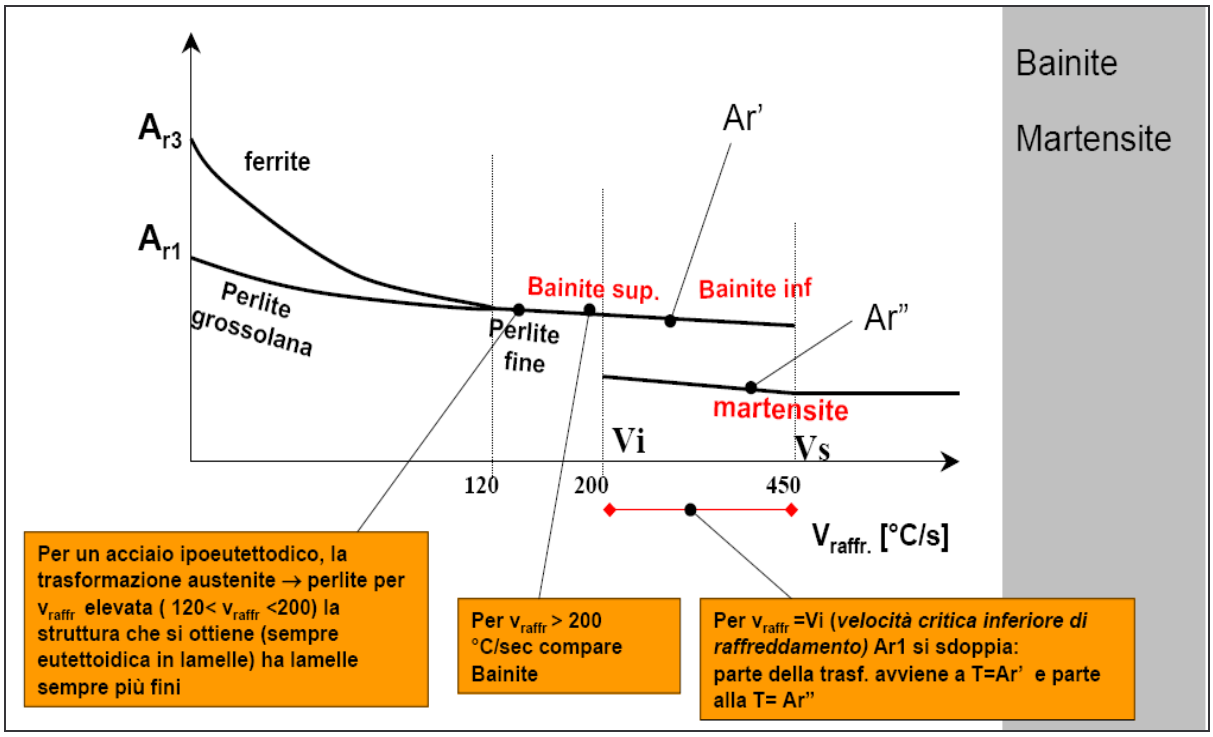

Figura 3-6: variazione dei punti critici con le velocità di raffreddamento

Continuando ad aumentare la velocità di raffreddamento fino ad un certo valore indicato sulle ascisse con $\mathbf{V_i}$, si ha che A_3 e A_1 si uniscono, ma non si ha più un solo punto critico, ne compaiono di nuovo due, che non si riferiscono più alla trasformazione ferritico-perlitica. Il punto A_1 si è sdoppiato in due punti critici di cui uno chiamato A_r' (generalmente sui 500-600°C) e l'altro A_r'' (100-300°C).
Il punto A_r' non è altro che la linea dell'euttetoide perlitico spostato, che presenta lamelle più o meno fini a seconda della ricchezza del C contenuto nell'acciaio; si ha con questa velocità la troostite. **V_s rappresenta la velocità critica di tempra.** Ovviamente fra V_i e V_s si possono avere strutture troostitiche, bainitiche anche con la presenza di martensite.

Dall'esame di queste curve possiamo rilevare:
1. immediatamente al di sotto della temperatura di 723 °C (punto A_1) la velocità di trasformazione dell'austenite è molto piccola e la trasformazione può richiedere tempi assai lunghi.
2. Verso 550°C si ha un punto di massima velocità di trasformazione e il prodotto è una struttura troostitica.
3. Al di sotto di 550°C si ha un campo di relativa stabilità dell'austenite; a 230°C si ha un punto di minima trasformazione; l'austenite inizia infatti la sua trasformazione dopo circa 5' e la completa dopo 2h. In questo campo il prodotto di trasformazione è la bainite.
4. Al di sotto di 200°C e fino a 60°C si ha la trasformazione istantanea di una parte di austenite in martensite
5. L'austenite raffreddata al di sotto dei 60°C si trasforma al 100% in martensite.

3.1.2 Le curve di Bain

Una rappresentazione chiara e utile dal punto di vista pratico delle strutture che conseguono a ogni tipo di raffreddamento dell'austenite è data dalle cosiddette **curve di Bain**.
Queste curve sono di natura sperimentale e si distinguono in due tipi:
1. Curve di Bain TTT (o per trasformazione isotermica)
2. Curve di Bain TRC o CCT (o per trasformazione anisotermica)

Le curve di Bain sono fondamentali per 'pilotare' la tempra e il trattamento di ricottura. Infatti, da esse si può ricercare la velocità critica di tempra e prevedere la struttura che uscirà con una determinata velocità di raffreddamento.

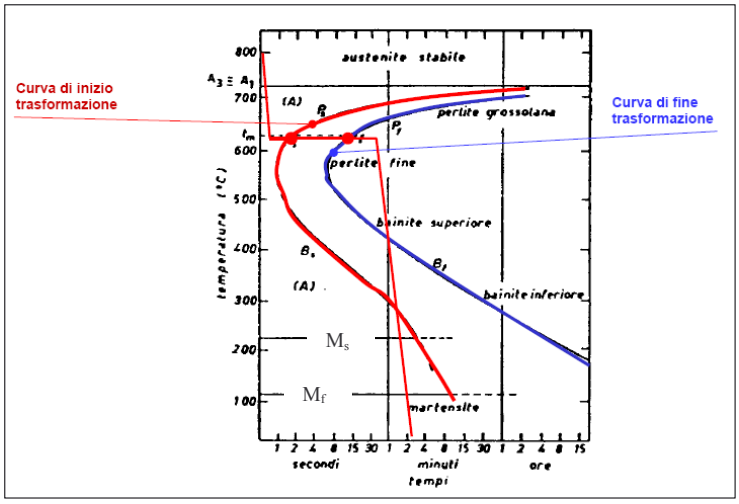

Figura 3-7: Curva TTT per un acciaio eutettoidico

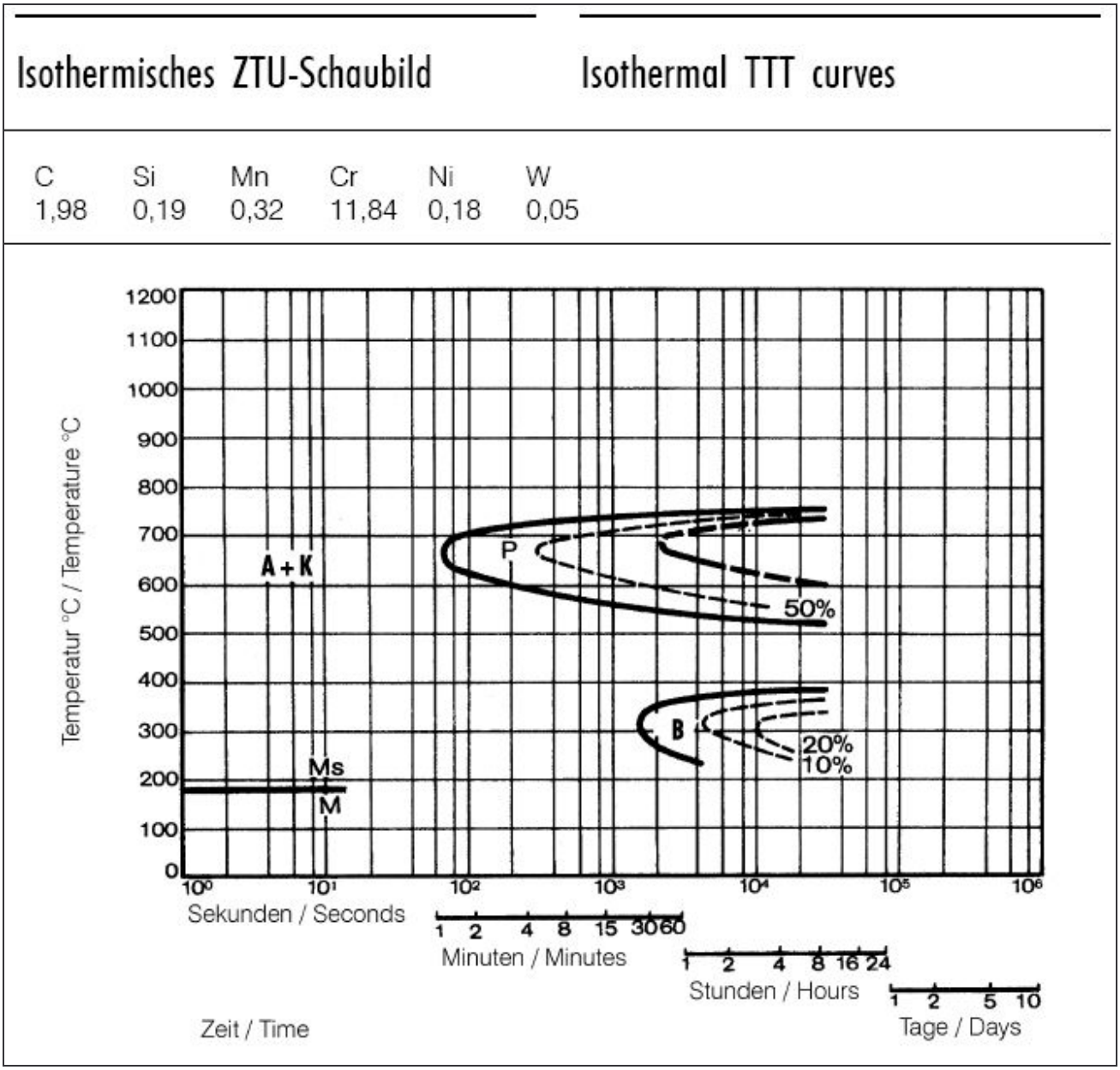

Figura 3-8: Curve TTT per l'acciaio ipereutettoide 1.2080 (K100 Bohler)

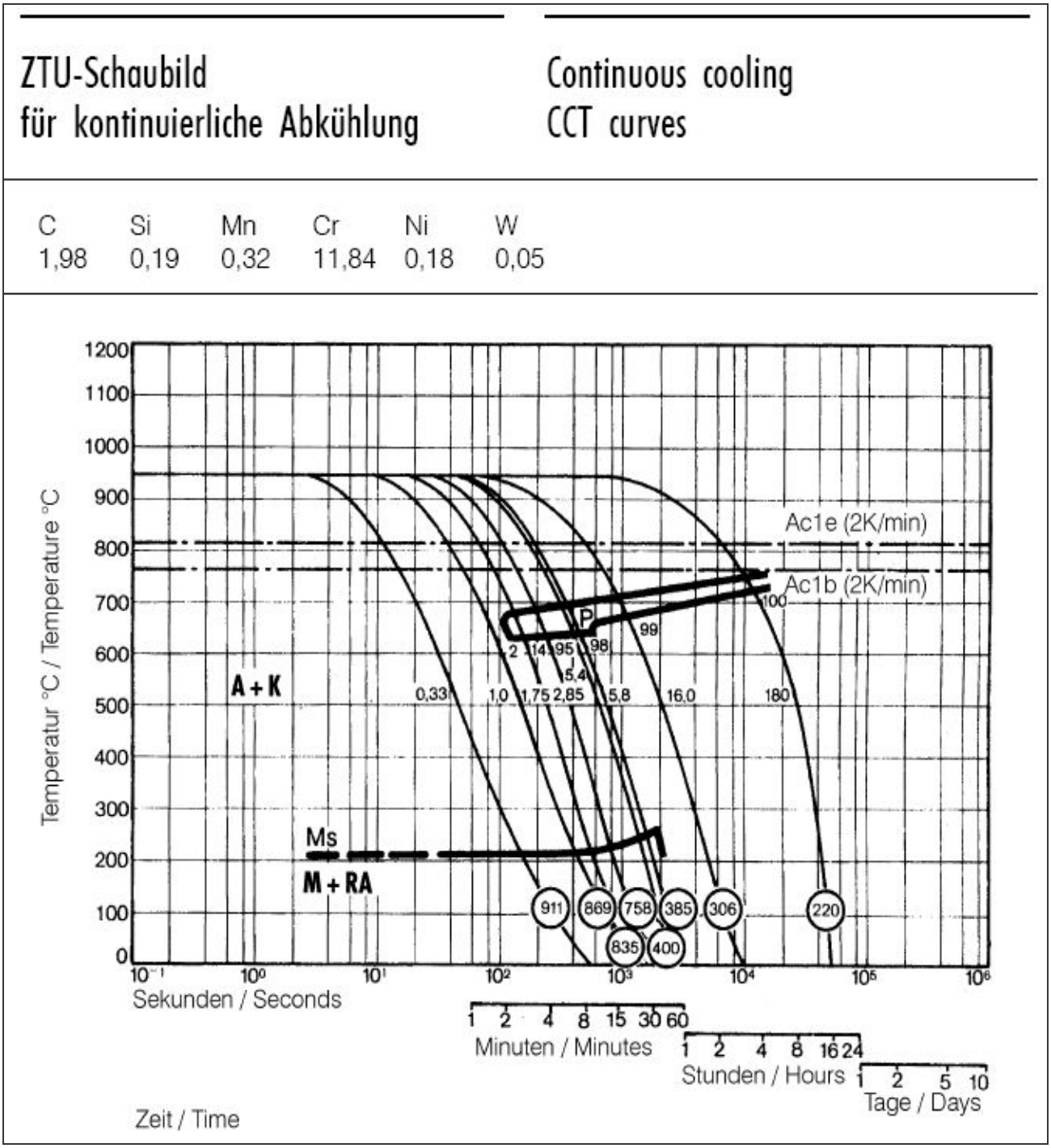

Figura 3-9: Curve CCT per l'acciaio ipereutettoide 1.2080 (K100 Bohler)

3.1.3 Le strutture non previste nel diagramma Fe-C

Abbiamo, quindi, scoperto che un raffreddamento non estremamente lento di una massa di acciaio può condurre alla formazione di strutture cristalline diverse da quelle di base previste dal diagramma Fe-C standard. Tali strutture hanno caratteristiche meccaniche proprie che è interessante conoscere ai fine delle prestazioni che vengono richieste all'acciaio stesso:
Riassumendo, le nuove strutture che abbiamo già nominato sono:

- Troostite
- Bainite
- Martensite
- Austenite residua
- Sorbite

3.1.3.1 Bainite

La bainite è una particolare struttura dell'acciaio, che si forma quando l'austenite è rapidamente raffreddata. È stata per la prima volta osservata da Davenport e Bain.
Si considerino le curve di trasformazione isoterma TTT di un acciaio eutettoidico; se vi si esamina la trasformazione dell'austenite sotto al naso della curva a S, si trova che il sottoraffreddamento (la temperatura è inferiore ai 550°C) permette inizialmente la nucleazione e l'accrescimento della ferrite, e successivamente quello della cementite. La prima si forma al bordo grano austenitico sottoforma di ago mentre la seconda nasce per precipitazione del carbonio al bordo grano della ferrite, sottoforma aciculare. La struttura risultante è la bainite.
Quando formata tramite raffreddamento continuo, la velocità di raffreddamento per formare la bainite è maggiore di quella richiesta per la perlite, ma minore di quella per la martensite, in acciai con la stessa composizione.
Si distingue la bainite superiore (si forma oltre i 350°C) da quella inferiore, in quanto la prima ha proprietà meccaniche scadenti, mentre la seconda ha duttilità e tenacità associate a durezza e resistenza, grazie alla buona dispersione della cementite nella ferrite e alle numerose dislocazioni.
La bainite è generalmente più dura e duttile della perlite.

3.1.3.2 Martensite

La martensite è una forma allotropica metastabile dell'acciaio, sovrassatura di carbonio, nel reticolo del ferro α.
È una fase che non sussiste in equilibrio, ma può essere ottenuta mediante congelamento strutturale dell'austenite (o ferro γ) per brusco raffreddamento da temperature superiori a quella di austenitizzazione (variabile a seconda del contenuto in carbonio, comunque compresa tra 727°C e 912°C) fino a temperatura ambiente; si origina così un reticolo tetragonale a corpo centrato piuttosto tensionato.
A temperatura ambiente sarebbe stabile la struttura perlitica, un miscuglio di ferrite (o ferro α) e cementite (composto Fe_3C); il raffreddamento troppo rapido, però, fa sì che la massa metallica "non riesca" ad arrangiarsi nella struttura di equilibrio, andando invece a formare una struttura simile a quella austenitica, ma altamente tensionata a causa delle sue condizioni di non-equilibrio: la martensite, appunto.
Le sue notevoli deformazioni reticolari, che ostacolano il movimento delle dislocazioni, sono la causa prima dell'indurimento.
La formazione inizia alla temperatura indicata di solito con M_s (*martensite starting* coincidente con Ar'') e si completa alla temperatura M_f (*martensite finishing*); tale intervallo si sposta in basso all'aumentare della concentrazione di carbonio e in alto in presenza di deformazioni plastiche. Il processo avviene quasi istantaneamente, mediante un movimento coordinato di atomi e non per diffusione, impedita dalla bassa temperatura. La nucleazione si avvia dall'interno, non dai giunti dei grani.
Nella trasformazione austenite → martensite aumenta il volume: bisogna quindi porre attenzione che le tensioni interne creatasi non snervino il materiale, con la nascita di distorsioni e cricche.
La martensite è una fase che presenta alta durezza e resistenza meccanica, perciò spesso è ottenuta appositamente in un pezzo mediante il trattamento termico di tempra. Il suo problema, tuttavia, è che è una struttura macroscopicamente fragile e altamente tensionata, perciò spesso alla tempra si fa seguire un trattamento di rinvenimento (la combinazione dei due trattamenti è detta bonifica) allo scopo di "ammorbidire" questi problemi e raggiungere un buon compromesso tra durezza, resistenza e tenacità dell'acciaio.

Da non trascurare, comunque, che una grana austenitica di partenza grossolana genera una grana martensitica altrettanto grossolana: quindi la temperatura di austenitizzazione è il primo fattore da considerare per non eccedere in fragilità. Se l'acciaio contiene meno del 0.6% di carbonio la martensite è di tipo aciculare mentre se il tenore di carbonio all'interno del acciaio è superiore al 0.6% la martensite sarà denominata: martensite a placchette.

3.1.3.3 Austenite residua

A seconda della modalità di raffreddamento, l'austenite si trasforma in una miscela di ferrite e cementite, (perlite o bainite) oppure in martensite. Questa trasformazione ha un'importanza chiave nella tempra dell'acciaio.
La presenza nella soluzione solida, oltre al ferro e al carbonio, di altri metalli in lega (elementi gammageni) modifica la temperatura minima per ottenere l'austenite. Il molibdeno, il cromo ed il silicio tendono ad innalzarla, mentre il manganese e il nichel tendono ad abbassarla.
Nel caso limite di alcuni acciai inossidabili, detti acciai inossidabili austenitici, l'austenite è stabile a temperatura ambiente.
Si consideri dell'austenite con una concentrazione di elementi chimici tali da portare l'intervallo M_s-M_f a cavallo della temperatura ambiente; anche se essa, in un tipico processo industriale, è raffreddata con una velocità maggiore di vs, non tutta si trasforma in martensite, bensì una certa percentuale rimane come **austenite residua** (per esempio nell'acciaio rapido), a causa della scarsa diffusione del carbonio a temperatura ambiente.
In base a questo stesso principio e alla possibilità, sempre presente, di disuniformità di concentrazioni nella massa austenitica o di segregazioni intercristalline, austenite residua può essere localizzata anche in caso di M_f maggiore della temperatura ambiente.

- Fattori che favoriscono la presenza di austenite residua
  - aumento della temperatura di austenitizzazione e diminuzione della velocità di tempra.
- Fattore che riduce la quantità di austenite residua
  - temperatura di sottoraffreddamento minore della temperatura ambiente.

L'austenite residua deve essere eliminata (per esempio con il rinvenimento) per scongiurare che si decomponga quando il pezzo è in esercizio, processo che causerebbe una dannosa variazione di volume.

3.1.3.4 Sorbite

La sorbite è una struttura derivante dal rinvenimento della martensite. È un aggregato non lamellare di ferrite e cementite. L'elevata temperatura di rinvenimento, compresa tra i 500° ed i 600°, ed il prolungato mantenimento, favoriscono l'affinazione e la globulizzazione dei carburi nella matrice ferritica.
Pertanto, la sua struttura è globulare, omogenea e molto fine. ha buone proprietà meccaniche di durezza, resistenza a trazione e resilienza. È la struttura tipica degli acciai da costruzione.

3.1.4 Definizione e classificazione dei trattamenti termici per gli acciai

Per trattamento termico di un acciaio si intende il ciclo di riscaldamento effettuato in predeterminate condizioni e temperature a cui devono seguire raffreddamenti più o meno controllati con lo scopo di fare assumere all'acciaio quelle strutture cristalline che conferiscono determinate proprietà meccaniche o tecnologiche.
I trattamenti termici devono essere effettuati in ambienti protettivi, quali:

- Atmosfera gassosa (ad es. azoto, anidride carbonica, ecc…);
- Casse contenenti sabbia o graniglia;
- Sottovuoto.

I trattamenti termici (t.t.) possono essere classificati secondo il seguente elenco:

- Ricotture
- Tempre
- Rinvenimenti
- Cementazioni
- Altri t.t.

3.1.5 Ricottura

La ricottura di una lega metallica 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.
In tutte le ricotture si ottengono le strutture previste dal diagramma Fe-C. Si hanno però diversi tipi di ricotture a seconda dello scopo che si vuol raggiungere; pertanto la parola "ricottura" deve essere seguita da una particolare indicazione:

3.1.5.1 Ricottura completa o profonda

Detta anche genericamente ricottura, essa è eseguibile sugli acciai ipoeutettoidici (C<0.83%) e consiste in: riscaldamento fino a A_3 + 25-50°C oppure A_{c1} + 50-70°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

3.1.5.2 Ricottura di omogeneizzazione

A differenza della precedente, non necessita di acciai ipoeutettoidici; essa raggiunge risultati simili, ma si sottolinea soprattutto la sua necessità per sciogliere eventuali fasi fragili presenti, ad esempio carburi eutettici 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 = Ac3 + 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.

3.1.5.3 Ricottura isotermica

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_3 (acciai ipoeutectoidici) o di A_{c1} (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.

3.1.5.4 Ricottura di coalescenza o di globulizzazione

Detta anche ricottura pendolare, conferisce alla cementite una conformazione nettamente sferoidale e una distribuzione uniforme. 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.

3.1.5.5 Ricottura di normalizzazione

Detta anche normalizzazione, consiste nel riscaldamento del materiale ad una temperatura poco superiore a quella di austenizzazione (A_3 + 50-70°C), nella permanenza per 15 minuti circa e nel raffreddamento in aria calma. Tale processo è simile alla ricottura, ma in questo caso il raffreddamento è più rapido. Generalmente si ottengono strutture simili a quelle di un materiale che ha subito la già citata ricottura; la perlite che si ottiene con la normalizzazione è però costituita da cristalli più minuti (a causa del raffreddamento più veloce). Ne consegue il miglioramento della resistenza e lo spostamento verso sinistra della transizione duttile - fragile. Di solito tale processo è eseguito come ultima operazione; può costituire il rimedio a un surriscaldamento della grana e può attenuare l'estensione di bande stratificate di fasi differenti (struttura che rischia di sottolineare il comportamento della fase più debole). Dovrebbe sempre essere effettuata su getti d'acciaio al carbonio e basso legati e su quelli già sottoposti a ricottura d'omogeneizzazione, per affinare la struttura grossolana. É utile per annullare qualsiasi trattamento termico o meccanico (ad esempio tempra e incrudimento). L'affinazione della grana che ne consegue è un'utile preparazione a successiva tempra e carbocementazione. Per acciai da usare a basse temperature conviene la doppia normalizzazione: una prima a più alta temperatura per meglio omogeneizzare, una seconda a più bassa temperatura per affinare la grana.

3.1.6 Tempra

Sotto la denominazione generica di tempra si comprendono trattamenti termici eseguiti con cicli diversi che hanno in comune essenzialmente un riscaldamento a temperatura superiore da A_3 per gli acciai ipoeutettoidi e ad A_1- e talora ad A_m - per gli acciai ipereutettoidi; permanenza a tale temperatura per un tempo sufficiente ad ottenere nelle zone interessate l'equilibrio strutturale; successivo raffreddamento con una velocità superiore alla velocità critica di tempra fino ad un campo di temperature prossime ad M_s. Le modalità di raffreddamento nel suddetto campo o al di sotto di esso, diverse secondo gli scopi ed i requisiti che si desiderano ottenere, caratterizzano i singoli trattamenti di tempra.
Normalmente la temperatura di tempra è circa 50°C al di sopra di A_3 per gli acciai ipoeutettoidi; non sempre è desiderabile superare la temperatura A_3 perché, molto spesso temperature troppo elevate comportano ad un notevole ingrossamento del grano austenitico con conseguente aumento della temprabilità.
La soluzione solida austenitica la quale potrà contenere carburi, più o meno finemente suddivisi. Il tempo sufficiente è evidentemente funzione delle dimensioni del pezzo, della capacità termica del forno e del desiderato grado di solubilizzazione dei carburi alla temperatura scelta.

3.1.6.1 Tempra diretta

Si dice tempra diretta il trattamento termico caratterizzato da un riscaldamento a temperatura superiore ad A_3; permanenza a tale temperatura per un tempo sufficiente ad ottenere l'equilibrio strutturale; raffreddando fino a temperatura al di sotto di M_f con una velocità superiore alla velocità critica di tempra in modo da ottenere una struttura martensitica. La tempra diretta è illustrata in fig. 3-10 dal diagramma di Bain in raffreddamento continuo per un acciaio ipoeutettoide.

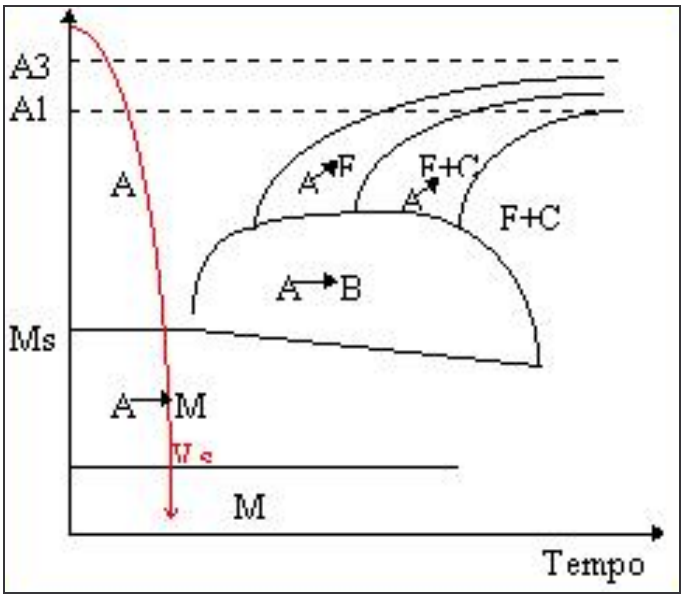

Figura 3-10: Diagramma di tempra diretta

3.1.6.2 Tempra con isteresi

E' un trattamento isotermico inteso a produrre una struttura martensitica, analoga alla tempra diretta. Schematicamente la tempra termale è rappresentata in figura. La tempra con isteresi consiste in un riscaldamento ad un temperatura superiore ad A_3:permanenza a tale temperatura fino ad ottenere l'equilibrio strutturale (austenite). Il raffreddamento viene eseguito con una velocità superiore a quella critica di tempra per un tempo sufficiente a realizzare una certa uniformità di temperatura, ma non tale da provocare l'inizio della trasformazione dell'austenite, e quindi un raffreddamento più o meno rapido, al di sotto di M_f. Nella prima fase di riscaldamento, tutto procede come nella tempra diretta, ed anche durante la prima parte di raffreddamento. Successivamente la temperatura rimane costante ed è molto vicina alla temperatura M_s in una zona di notevole stabilità dell'austenite; perciò una sosta a questa temperatura, purché non sia prolungata fino all'inizio di trasformazione bainitica assicura che l'austenite non si trasformi in prodotti perlitici o bainitici. Il successivo riscaldamento provoca la trasformazione dell'austenite in martensite, fra M_s e M_f . La struttura finale è perciò completamente martensitica come un acciaio temprato normalmente. Lo scopo di questo trattamento è di ottenere una struttura martensitica che conferisce al materiale particolari caratteristiche di durezza, riducendo il pericolo di distorsione o cricche di tempre negli acciai particolarmente sensibili a tali fenomeni. Ciò è una conseguenza del fatto che la sosta a temperatura prossima ad M_s consente di ottenere nel pezzo una uniformità di temperatura in tutte le sue parti, per cui, nel successivo raffreddamento, sono notevolmente ridotte le distorsioni dovute alle contrazioni differenziali. In altre parole: noi tempriamo sempre per ottenere un materiale martensitico, ma il processo risulta meno drastico.

3.1.6.3 Tempra scalare bainitica

Il ciclo termico comprende: un riscaldo di austenizzazione, un raffreddamento sufficientemente rapido per evitare un inizio di trasformazione nel campo perlitico, permanenza a questa temperatura sino a totale o parziale trasformazione dell'austenite in bainite, raffreddamento finale a velocità qualunque sino a temperatura ambiente. La tempra bainitica è consigliabile nel caso di pezzi aventi disegni complessi, soggetti a cricche e a distorsioni; si rinunzia con essa ad una parte della tenacità, assicurata dalla bonifica, ma in compenso si riduce il pericolo delle distorsioni.

3.1.6.4 Tempra scalare martensitica

Il ciclo termico comprende è in tutto simile al precedente, soltanto che il tempo di permanenza a temperatura superiore a M_s deve essere abbastanza breve da evitare l'inizio della trasformazione austenite→bainite. La tempra martensitica è consigliabile nel caso di pezzi aventi dimensioni lunghe e sottili (lame, utensili, ecc…), soggetti a cricche e spaccature.

3.1.7 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 $T < A_1$ 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.
Negli acciai il rinvenimento 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 presenta un addensamento del C presso le dislocazioni, 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% comincia 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 e si ottiene la perlite globulare, la struttura più stabile e lavorabile alle macchine utensili.

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 intercristallina.

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. Per eliminare il fenomeno della fragilità al rinvenimento ci sono tre possibilità:

- Raffreddamento veloce dell'acciaio in modo che la caduta ai bordi dei cristalli non avvenga;
- 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);
- Aggiunta di elementi di alligazione (Molibdeno, Tungsteno) nell'acciaio in grado di eliminare questo fenomeno.

3.1.8 Bonifica

Con il termine bonifica si intende un insieme di trattamenti termici che si effettuano su particolari tipi di acciai e che consiste in una **tempra** seguita da un **rinvenimento**.
Nel corso della tempra degli acciai si ha formazione di martensite, una struttura ad elevata durezza e notevole carico di rottura, ma con una resilienza piuttosto bassa che può dar luogo a rotture in seguito a urti. Data la pericolosità di questi fenomeni, che comportano un collasso praticamente istantaneo della struttura, si sottopone l'acciaio ad un trattamento termico di rinvenimento, per trasformare parte della martensite in martensite rinvenuta. Infatti la martensite è una fase metastabile, cioè si forma solo perché gli atomi di carbonio non riescono a fuoriuscire dal reticolo γ a causa dell'elevata velocità di raffreddamento che impedisce i moti diffusivi.
Dato che la martensite, in assenza di elementi leganti, si forma solo con una percentuale di carbonio superiore allo 0,2%, sotto questo limite gli acciai praticamente non possono essere temprati, quindi non ha senso effettuare un trattamento di bonifica che è tanto più utile quanto più alta è la percentuale di carbonio. In genere gli acciai destinati a questo trattamento hanno lo 0,4÷0,6% di C e sono appunto detti acciai da bonifica.

Viene definita bonifica questa sequenza di trattamenti solo nel caso in cui il rinvenimento avvenga ad una temperatura di 600°C (salvo nel caso degli acciai per molle che vengono rinvenuti a circa 450°C). Portando la martensite a questa temperatura essa rinviene, trasformandosi in sorbite, una struttura che combina una buona resistenza a trazione, anche se inferiore a quella della martensite, ad una maggiore tenacità.

3.1.9 Cementazione

La cementazione, o più precisamente carbocementazione, è un processo metallurgico utilizzato per aumentare la resistenza all'usura degli acciai.
L'arricchimento superficiale in carbonio e la conseguente formazione di carburi è utile per conferire resistenza all'usura e rafforzamento in superficie, unite a tenacità interna (per esempio per denti di ingranaggi). Conviene eseguirlo su acciaio dolce portato oltre A_3, in quanto l'austenite solubilizza meglio il carbonio.
Il carbonio migra oltre la superficie per diffusione; 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.
Tra i prodotti di solito cementati i più comuni sono gli ingranaggi; mentre un esempio di acciaio cementabile è il 18CrMo4.

3.1.9.1 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.

3.1.9.2 Carbocementazione in bagno di sali

Si circonda il pezzo di cemento liquido (miscela di cloruro, cianuro sodico o potassico e carbonato); vi è anche dell'azoto che, se in modesta quantità, aiuta a indurire lo strato superficiale. 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 bicicclette e motociclette, catene, parti di computer, armi, strumenti di precisione.

3.1.9.3 Carbocementazione in fase gassosa

Quest'ultimo è il metodo più efficace. L'agente cementante è ossido di carbonio creato dalla combustione di gas naturale, metano, etano, propano, butano, carbone, ecc…
Il potenziale di carbonio dell'atmosfera deve essere sempre maggiore della concentrazione di tale elemento nel pezzo trattato, altrimenti prevale la decarburazione promossa da CO_2, H_2O e H_2. 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).

3.1.10 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 introdurvi 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 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.
I vantaggi della nitrurazione sono:

- Elevata durezza superficiale
- Elevata resistenza all'usura;
- Stabilità al rinvenimento e quindi durezza a caldo;
- Resistenza alla fatica e agli intagli;
- Resistenza alla corrosione;
- Stabilità dimensionale.

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.
Gli utilizzi più frequenti si riscontrano su prodotti quali calibri, riscontri, ingranaggi 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.

3.1.10.1 Nitrurazione in fase gassosa

La dissociazione termica dell'ammoniaca, catalizzata dall'acciaio, produce:
$2NH_3 \rightarrow 2N + 3H_2$
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 Fe_4N, all'aumentare del tenore di azoto assorbito si forma il nitruro Fe_2N. La durezza e la profondità dello strato sono legate alle variabili che regolano tale processo, e sono:

- composizione dell'acciaio;
- Potenziale nitrurante;
- temperatura di trattamento;
- tempo di permanenza.

Il Potenziale Nitrurante 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 prima dell'utilizzo.

Acciai da bonifica	%C max	%Cr max	%Al max	%Mo max	%V max	R_m [MPa]
30CrMo10	0.32	2.50	-	0.40	0.15	900÷1050
42CrAlMo7	0.42	1.70	0.40	0.25	-	950÷1100
40CrMnMo7 (AISI P20)	0.40	1.70	-	-	-	1000

Tabella 3.1: Acciai da bonifica

Trattamento termico	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
Ricottura completa	Lento riscaldamento a temperatura di austenizzazione	Permanenza a tale temperatura per un tempo adeguato alla dimensione dei pezzi	Raffreddamento lento fino a una certa temperatura; poi può essere accelerato		
Normalizzazione	Riscaldamento a temperatura superiore a quella di austenizzazione	Permanenza a tale temperatura fino a completa austenizzazione	Raffreddamento mediamente veloce, ma più lento della V_{ci}		
Tempra diretta	Riscaldamento a temperatura superiore a quella di austenizzazione	Permanenza a tale temperatura fino a completa austenizzazione	Raffreddamento fino alla temperatura ambiente con velocità maggiore della V_{ci} per ottenere martensite		
Tempra scalare bainitica	Riscaldamento a temperatura superiore a quella di austenizzazione	Permanenza a tale temperatura fino a completa austenizzazione	Raffreddamento fino a temperatura superiore a M_s con velocità maggiore della V_{ci}	Permanenza a tale temperatura fino a completa o parziale formazione di bainite	Raffreddamento finale a velocità qualsiasi fino a temperatura ambiente
Rinvenimento	Riscaldamento a temperatura bassa e comunque inferiore ad A_1	Permanenza a tale temperatura per qualche ora (2/10 h)	Raffreddamento piuttosto veloce in acqua o in olio		
Bonifica	Tempra	Successivo ed immediato riscaldamento a temperatura inferiore ad A_1 (450/700°C)	Permanenza a tale temperatura fino a completa o trasformazione della martensite in sorbite	Raffreddamento che per gli acciai suscettibili alla fragilità al rinvenimento deve essere rapido	
Cementazione	Riscaldamento dei pezzi di **acciaio dolce** a ~900°C in un mezzo contenente carbonio	Permanenza a tale temperatura per un tempo proporzionale allo spessore dello strato da cementare	Tempra (che indurisce solo strato superficiale)	Rinvenimento a 130÷150°C	
Nitrurazione	Riscaldamento dei pezzi di **acciaio bonificato** a ~550°C in un mezzo contenente azoto (ammoniaca)	Permanenza a tale temperatura per un tempo proporzionale allo spessore dello strato da nitrurare			

Tabella 3.2: Quadro riassuntivo dei trattamenti termici degli acciai più comunemente utilizzati nella pratica produttiva

3.2 Trattamenti termici e meccanici dell'alluminio

Un fattore che influenza le caratteristiche meccaniche e tecnologiche delle leghe di alluminio è rappresentato dai trattamenti termici e meccanici a cui le leghe sono sottoposte. Non tutte le leghe possono però subire gli stessi trattamenti. Vi sono leghe da tempra o da incrudimento (serie 2000, 6000 e 7000), che possono essere sottoposte a trattamenti termici, e leghe da incrudimento per deformazione plastica (serie 1000,3000 e 5000), che non devono essere sottoposti ad alcun trattamento in temperatura. Un trattamento termico è costituito da operazioni di riscaldamento e raffreddamento eseguite in modo controllato su un metallo o lega in modo da variarne la struttura ed ottenere quindi particolari proprietà.

3.2.1 Trattamenti termici dell'alluminio

I trattamenti termici utilizzati per l'alluminio sono:

- **Omogeneizzazione**
  - riscaldamento ad una temperatura stabilita e per un periodo di tempo determinato per migliorare la lavorabilità a caldo ed a freddo delle leghe e controllare le condizioni di cristallizzazione ed ingrossamento del grano cristallino
- **Ricottura**
  - riscaldamento a temperatura inferiore a quella del solidus con tempi e velocità di raffreddamento controllati in modo da annullare gli effetti della tempra ed eventuali tensioni residue
- **Bonifica**
  - **Solubilizzazione**: riscaldamento ad una temperatura al limite dello stato solido, per portare gli elementi di lega in soluzione;
  - **Tempra**: rapido raffreddamento in mezzi diversi per mantenere nella soluzione solida sovrassatura gli elementi in lega;
  - **Invecchiamento**: per ottenere dalla soluzione solida sovrassatura i precipitati che producono l'incrudimento.

Il processo di tempra deve seguire immediatamente la solubilizzazione: la velocità di raffreddamento dipende dal mezzo temprante usato. Sfortunatamente in questa fase possono crearsi tensioni interne che in fase successiva di lavorazione causano deformazioni del semi-lavorato. Per ridurre le tensioni si effettuano operazioni meccaniche di detensionamento, in trazione o in compressione. Nei pezzi di grosse dimensioni si ha una velocità di raffreddamento minore nella parte centrale rispetto alla parte più esterna, con una microstruttura finale differente e quindi differenti proprietà. La fase di invecchiamento provoca la precipitazione degli elementi le cui dimensioni e natura sono alla base delle proprietà finali della lega. Se effettuata a temperatura ambiente (invecchiamento) si osserva una diminuzione della tendenza del materiale alla deformabilità; se invece è condotta a temperature comprese fra i 100°-200°C (rinvenimento), si ha un'abbondante precipitazione degli elementi indurenti ed un notevole miglioramento delle proprietà meccaniche. Per avere un buon indurimento è comunque indispensabile che i precipitati siano coerenti o semicoerenti con la matrice.
Nella tabella 3.3 vengono riportate le sigle dei trattamenti termici più comuni, contrassegnati proprio dalla lettera "T", da posporre al numero della lega nella loro designazione".

F	grezzo di fabbricazione
0	ricotto
T2XX	raffreddato da lav. plastica ad alta temp. - invecchiato. nat.
T3XX	solubilizzato - temprato - lav. a freddo - invecchiato nat.
T4XX	solubilizzato - temprato - invecchiato nat.
T5XX	raffredddato da lav. plastica ad alta temp. - invecchiato art.
T6XX	solubilizzato - temprato - invecchiato art.
T7XX	solubilizzato - temprato - stabilizzato
T8XX	solubilizzato - temprato - lav. a freddo - invecchiato art.

Tabella 3.3: Trattamenti termici dell'alluminio

3.2.1.1 Indurimento per precipitazione (bonifica)

Tramite questo procedimento, chiamato anche PH (Precipitation hardening), si aumenta la durezza della lega attraverso la formazione di precipitati, ovvero particelle di una fase diversa da quella della matrice, immerse in essa stessa. In letteratura si utilizza anche il termine **indurimento per invecchiamento**, poiché le proprietà meccaniche della lega trattata aumentano con il tempo. L'invecchiamento può essere ottenuto anche artificialmente, mantenendo la lega a temperature più alte di quella ambiente (tipicamente dell'ordine del centinaio di gradi Celsius per le leghe di alluminio), e così accelerando il processo di formazione dei precipitati. Questo procedimento prevede due diversi trattamenti termici:

1. **trattamento termico di solubilizzazione**: si procede col riscaldare la lega in maniera tale da far sì che tutti gli elementi si trovino in una soluzione monofasica con gli elementi di lega presenti oltre il limite di solubilità nella lega. Successivamente si stabilizza questa situazione (essa, essendo una soluzione sovrasatura, è instabile per cui gli elementi di lega tenderebbero a precipitare come composti di altra fase nella matrice) attraverso una **tempra** (raffreddamento veloce).
2. **trattamento termico di precipitazione**: si riscalda la lega sovrassatura ad una temperatura tale che gli elementi presenti oltre il limite di solubilità tendono a precipitare come particelle finemente disperse nella matrice. Questo procedimento porta ad un aumento di durezza in funzione del tempo, fino ad un massimo, e successivamente ad una decrescita della durezza. Questo processo, anche noto con il termine **invecchiamento** si divide in:
    a. invecchiamento naturale: se effettuato a temperatura ambiente
    b. invecchiamento artificiale: se effettuato riscaldando il materiale
    c. invecchiamento di punta: se il materiale viene invecchiato sino a raggiungere la durezza massima
    d. sottoinvecchiamento: se il materiale non ha ancora raggiunto il massimo della durezza raggiungibile
    e. sovrainvecchiamento: se il materiale ha superato il massimo della durezza raggiungibile.

La figura 3-11 seguente esemplifica i casi:

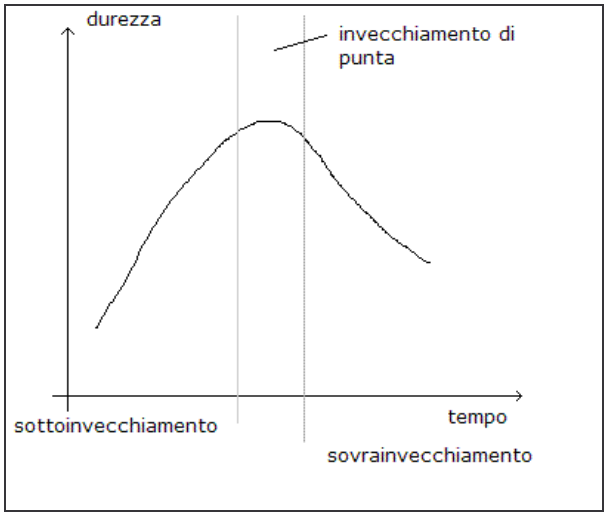

Figura 3-11

Mentre l'invecchiamento di punta viene utilizzato nei casi nei quali si vuole ottenere il massimo della resistenza statica, il sovrainvecchiamento migliora la tenacità e la resistenza a corrosione della lega. Nel caso delle leghe della serie 7000, il sovrainvecchiamento è obbligato, poiché risolve i problemi di sensibilità a tensocorrosione, a scapito di una piccola penalizzazione sulle proprietà meccaniche

Trattamento termico	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Omogeneizzazione	Riscaldamento a temperatura molto inferiore a quella di fusione		
Ricottura	Riscaldamento a temperatura inferiore a quella di fusione		
Solubilizzazione	Riscaldamento a temperatura prossima a quella di fusione		
Tempra	Rapido raffreddamento per mantenere nella soluzione solida sovrassatura gli elementi in lega		
Invecchiamento	Mantenimento a una data temperatura per far precipitare gli elementi di lega in particelle finemente disperse		
Bonifica o indurimento per precipitazione	Solubilizzazione	Tempra	Invecchiamento

Tabella 3.4: Quadro riassuntivo dei trattamenti termici delle leghe di alluminio più comunemente utilizzati nella pratica produttiva

3.2.2 Trattamenti meccanici di incrudimento dell'alluminio

Nelle leghe da incrudimento il miglioramento delle caratteristiche meccaniche è ottenuto per successive laminazioni intercalate con opportune ricotture, Le laminazioni incrudiscono la piastra, comportando un aumento della resistenza meccanica, della durezza ed una diminuzione dell'attitudine alla deformazione. Le ricotture restituiscono formabilità ed eliminano le tensioni, ma sono accompagnate da una perdita di caratteristiche meccaniche. La ricottura è funzione della temperatura e del tempo e dipende dal grado di incrudimento del metallo prima della ricottura stessa. Tutte le leghe presentano una zona critica di incrudimento: se la ricottura viene eseguita in prossimità di tale zona, si ottiene un ingrossamento eccessivo del grano che rende problematica la successiva fase di lavorazione e la superficie del metallo assume l'aspetto a buccia d'arancia.

F	grezzo di fabbricazione
0	ricotto
H1X	incrudito
H2X	incrudito e rinvenuto
H3X	incrudito e stabilizzato
HX2	1/4 crudo
HX4	1/2 crudo
HX6	3/4 crudo
HX8	crudo
H111	ricotto e calibrato
H116	3/8 crudo e stabilizzato

Tabella 3.5: Gradi di incrudimento per l'alluminio

A parità di resistenza meccanica una lega incrudita presenta un allungamento inferiore rispetto alla stessa incrudita e successivamente rinvenuta. Durante la fase di incrudimento meccanico bisogna tenere conto della progressiva ed irreversibile diminuzione dello spessore del pezzo. Durante la ricottura di distensione non vi sono variazioni di spessore e si può ritornare allo stato originario di materiale ricotto (stato 0).

Esiste teoricamente una combinazione molto numerosa di leghe e stati di fornitura disponibili: la tabella 3.6 raccoglie le combinazioni più comunemente disponibili in commercio indicando la loro disponibilità sotto forma di laminato e/o estruso.

	F	0	H111	H22/32	H24/34	H18	T3	T4	T5	T6	T8
1050A	L	L	L	L	L	L					
2011	E						E	E		E	E
2030/2007	E							E		E	
2017A		L						L/E		L	
2024		L						L		L	
5005		L	L	L	L	L					
5754		L	L	L	L	L					
5154A		L	L	L	L	L					
5083		L	L	L	L						
6060								E	E	E	
6012										E	
6082	E	L						L/E	L/E	L/E	
7020										L/E	
7019								L		L	
7075								L		L/E	
7022								L		L/E	
7010										L	
L	laminati										
E	estrusi										

Tabella 3.6: Trattamenti termici e gradi di incrudimento disponibili per le diverse leghe di alluminio

3.3 Bibliografia

"Corso di Tecnologia Meccanica – Progetto ERGON" – G. Grosso, M. Di Tella – Ed. Sc. B.Mondadori

Manuale ALCAN

"WIKIPEDIA"

3.4 Argomenti della Lezione 5

3 I trattamenti termici ... 53
3.1 I trattamenti termici degli acciai ... 53
3.1.1 Influenza della velocità di raffreddamento ... 53
3.1.2 Le curve di Bain ... 56
3.1.3 Le strutture non previste nel diagramma Fe-C ... 59
3.1.4 Definizione e classificazione dei trattamenti termici per gli acciai ... 61
3.1.5 Ricottura ... 61
3.1.6 Tempra ... 63
3.1.7 Rinvenimento ... 65
3.1.8 Bonifica ... 65
3.1.9 Cementazione ... 66
3.1.10 Nitrurazione ... 67
3.2 Trattamenti termici e meccanici dell'alluminio ... 69
3.2.1 Trattamenti termici dell'alluminio ... 69
3.2.2 Trattamenti meccanici di incrudimento dell'alluminio ... 72
3.3 Bibliografia ... 74
3.4 Argomenti della Lezione 5 ... 74