

8. Acciai al carbonio

8.1 Introduzione, Produzione

8.2 Diagramma di stato Fe – Fe₃C (metastabile)

- fase ferrite α , austenite γ , cementite Fe₃C

8.3 La trasformazione eutettoidica

- reazione $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$, fattori che influiscono la reazione
- microstrutture lamellare (perlite)

8.4 Formazione della bainite e della martensite

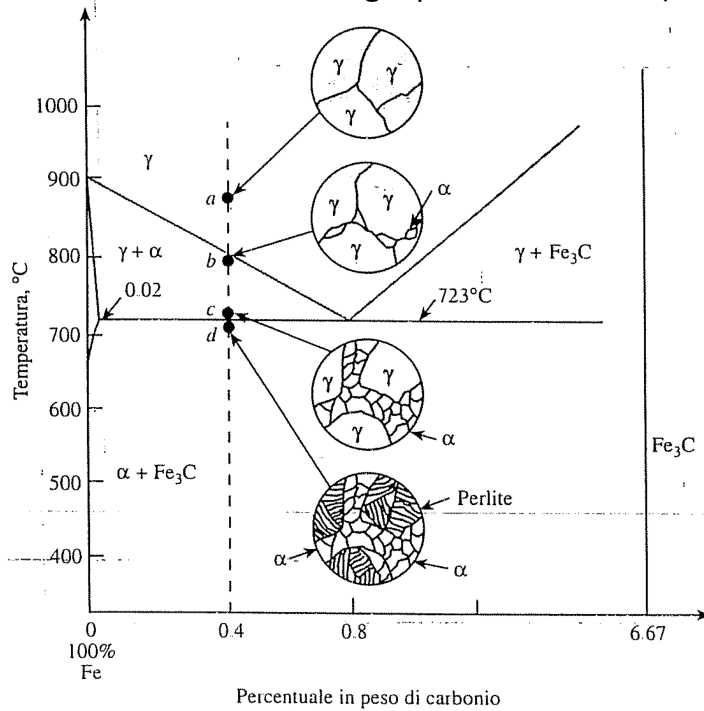
- diagrammi di trasformazione isoterme TTT
- microstrutture e correlazione con proprietà meccaniche

8.5 Riassunto

8.6 Domande di verifica

8.3 Processi di raffreddamento

Traformazione di una lega ipo-eutettoidico ($C < 0.8\%$).



Legha con 0.4% carbonio

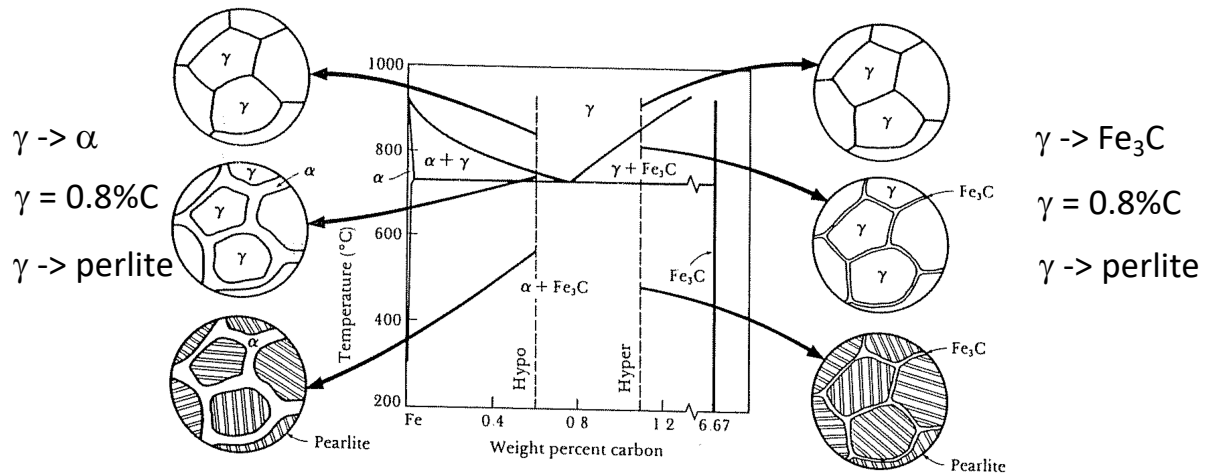
- a 100% di austenite γ a T alte
- b formazione α pro-eutettoidico
- c 50% α , 50% g
T = 723°C $\gamma \rightarrow$ Perlite
- d 50% α pro-eutt. e 50% perlite
(88% α e 12% Fe_3C)

Legha con 0.4% C \rightarrow 6% Fe_3C

Domanda: Perché i cristalli di α pro-eutettico si formano lungo i bordi di grano ?

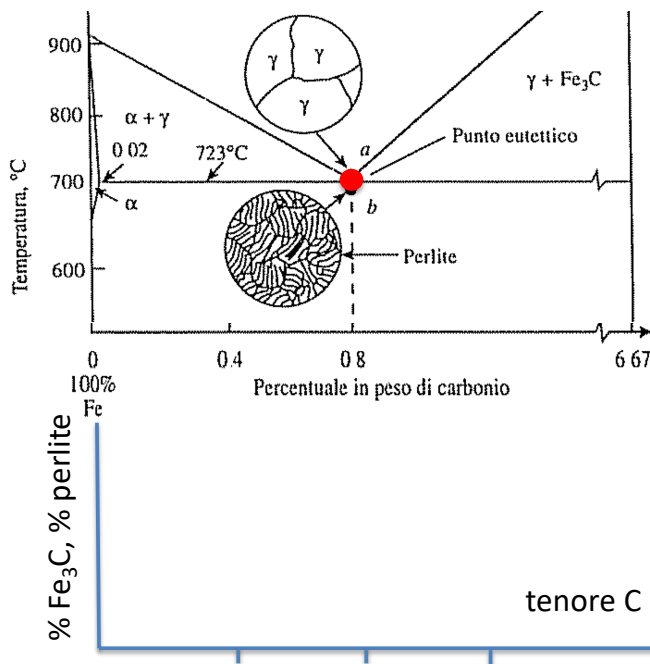
8.3 Processi di raffreddamento

Trasformazione di una lega ipo-eutettoidico o iper-eutettoidico. La composizione dell' austenite γ primo della trasformazione deve essere 0.8%C.

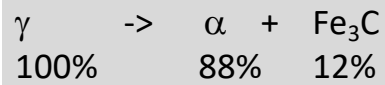


8.3 Quantità della cementite Fe₃C e della perlite

La quantità della cementite è importante per le proprietà meccaniche.



Reazione eutettoidica (0.8%):



Disegnare la quantità della cementite Fe₃C e della perlite verso il tenore di C.

Che cosa si osserva ?

8.3 Proprietà meccaniche e diagramma di stato

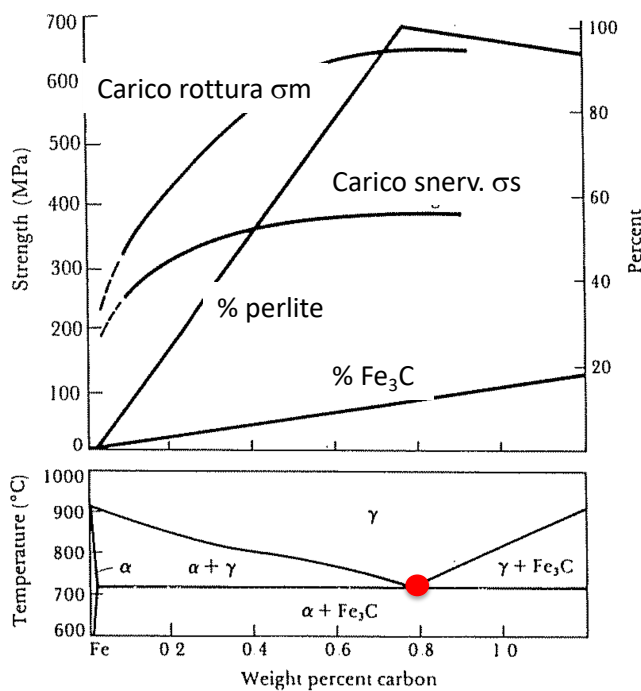


Diagramma di stato Fe-Fe₃C con parziale miscibilità. Punto eutetto-
idico a 0.8% C

La percentuale della cementite Fe₃C aumenta linearmente

La percentuale della perlite è massima (100%) a 0.8% di C.

Spiegare perché aumentano la resistenza meccanica σ_s e σ_m .

8.3 Controllare la trasformazione eutettoidica

Variando il contenuto di carbonio e le modalità di raffreddamento degli acciai si possono ottenere diverse combinazioni di microstrutture e di conseguenza di proprietà meccaniche.

- Controllo della *composizione*
Un tenore di carbonio alto fa aumentare la percentuale della cementite (fase dura) e anche della perlite Fe_3C aumenta linearmente
- Controllo della *dimensione dei grani dell' austenite γ*
La nucleazione della perlite avviene ai bordi di grano dell' austenite. Grani fini aumentano il numero delle lamelle della perlite.
- Controllo della *velocità di raffreddamento*
Aumentando la velocità di raffreddamento il tempo con diffusione veloce è più breve e le lamelle della perlite diventano più sottili
- Controllo della *temperatura di trasformazione*
Temperature di trasformazioni più basse risultano in lamelle più fini.

8.3 Effetto del tenore di carbonio

La microstruttura che risulta dalla trasformazione eutettoidica si controlla con il tenore di carbonio.

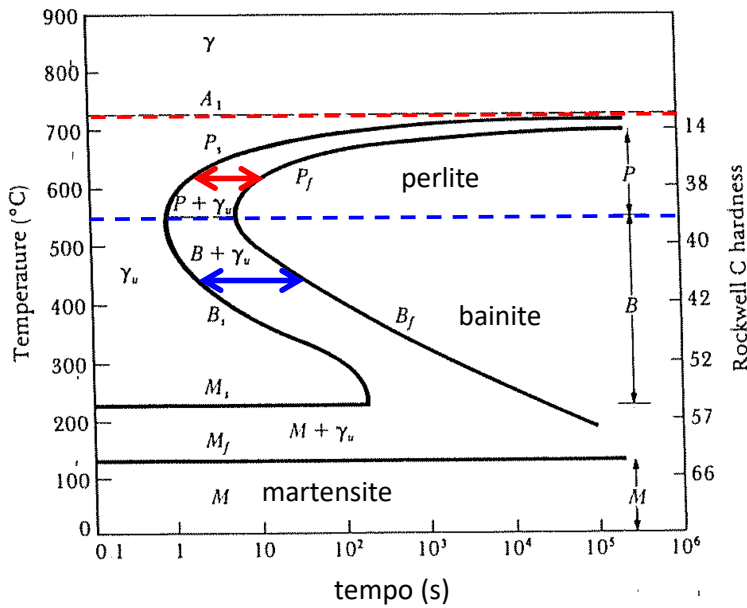
Effetto del tenore di C

carbonio (%)	raffreddamento lento (perlite grossolano)			raffreddamento veloce (perlite fine)		
	Rp	Rm	ϵ %	Rp	Rm	ϵ %
0.2	295	394	36.5	346	441	36
0.4	353	519	30	374	590	28
0.6	372	625	23	420	775	18
0.8	376	615	25	524	1010	11
0.95	380	657	13	500	1014	9.5

Descrivere che cosa si osserva nella tabella.

8.4 Diagramma di trasformazione isoterma TTT

La trasformazione eutettoidica è piuttosto lento, l'austenite può essere raffreddato velocemente a T più basse (sotto raffreddamento).



Austenite γ

T di equilibrio 723 °C

Prima linea: inizio (start)

Seconda linea: fine (f)

P: perlite

B: bainite

M: martensite

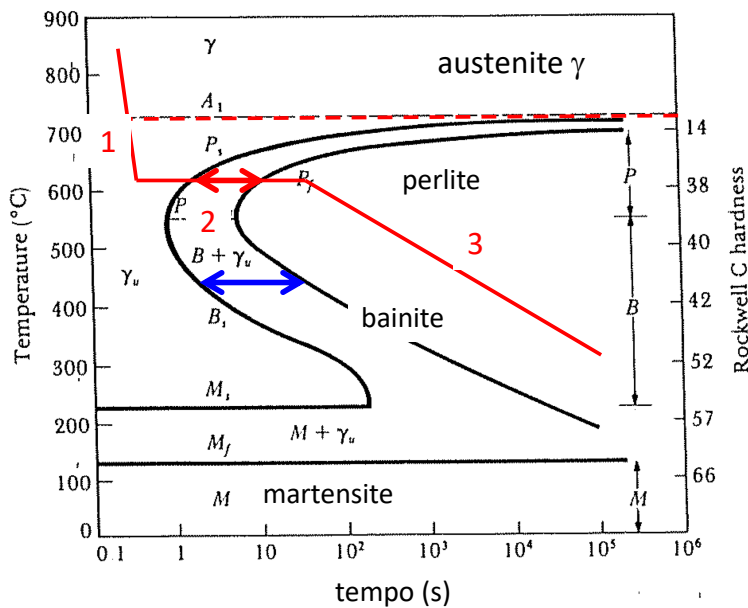
↔ Intervallo di trasformazione

asse x, tempo, logaritmico

8.4 Trasformazione isoterma - perlite

La trasformazione isoterma della perlite avviene tra 700°C e 550 °C.

T alte: perlite grossolana, T basse: perlite fine

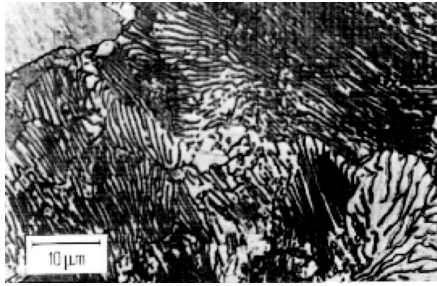


- 1 Raffreddamento veloce della fase austenitica γ a T trasformazione.
- 2 Trasformazione isoterma da P_s a P_f (start a fine) \leftrightarrow
- 3 Raffreddamento lento

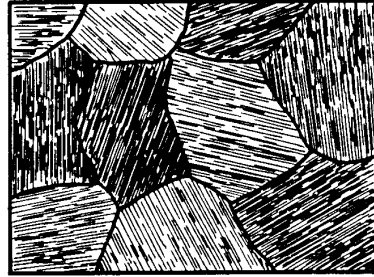
asse x, tempo, logaritmico

8.4 La perlite

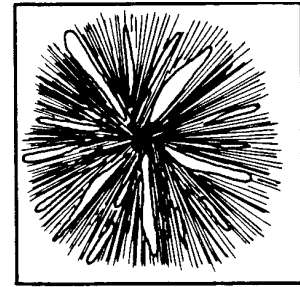
Microstrutture e dimensione **delle lamelle** dopo raffreddamento dell' austenite.



Perlit
lamelle ca. 2 μ m



Sorbit (perlite fine)
lamellen ca. 0.2 μ m



Troostit
lamellen ca. 0.05 μ m

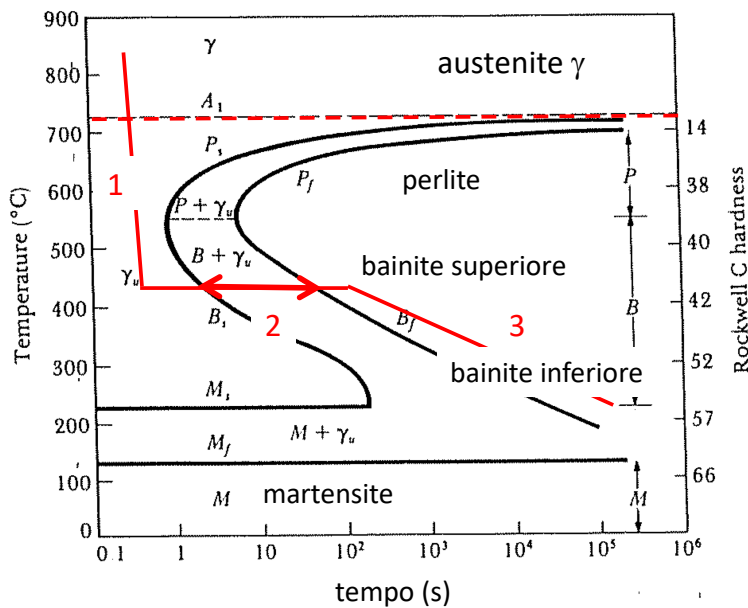
→
Aumento della velocità di raffreddamento
o temperatura di trasformazione più bassa

Domanda: Che cosa si prevede per la durezza delle tre microstrutture ?

8.4 La tempra bainitica (trasformazione isoterma)

La trasformazione isoterma della bainite avviene tra 550°C e 300 °C.

T alte: bainite, T basse: bainite fine

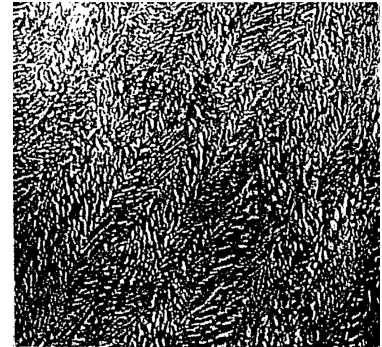
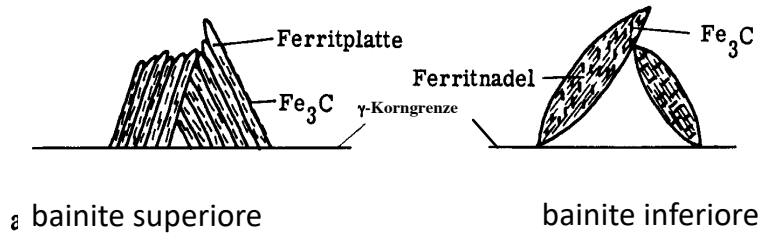


- 1 Raffreddamento veloce della fase austenitica γ a T trasformazione.
- 2 Trasformazione isoterma da B_s a B_f (bainite start a fine) \longleftrightarrow
- 3 Raffreddamento lento

asse x, tempo, logaritmico

8.4 La bainite

A temperature di trasformazione $< 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ non si forma più perlite ma **bainite**. La velocità di nucleazione è molto alta, la diffusione lenta: -> aghetti.

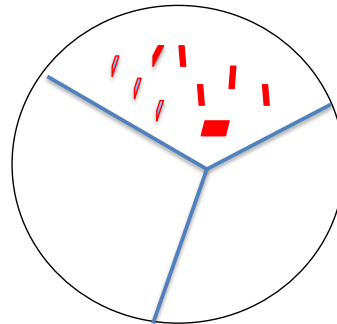
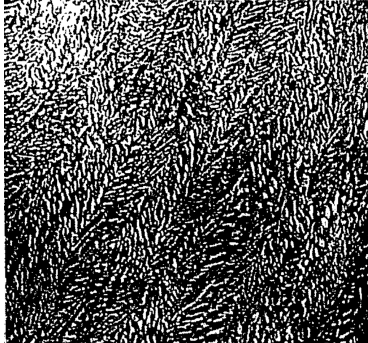


Si formano tantissimi precipitati di Fe₃C sotto forma di **aggetti** in una matrice di ferrite α . Questi aggetti piccoli di Fe₃C isolati aumentano la resistenza meccanica fortemente senza diminuire la duttilità.

Domanda: spiegare perché la resistenza aumenta senza diminuzione duttilità.

8.4 La bainite

La **bainite** è una microstruttura di aghetti piccolissimi di Fe_3C in una matrice di ferrite α . La nucleazione della cementite avviene ovunque nella ferrite perché il sottoraffreddamento è alto (non c'è bisogno di bordi di grano).



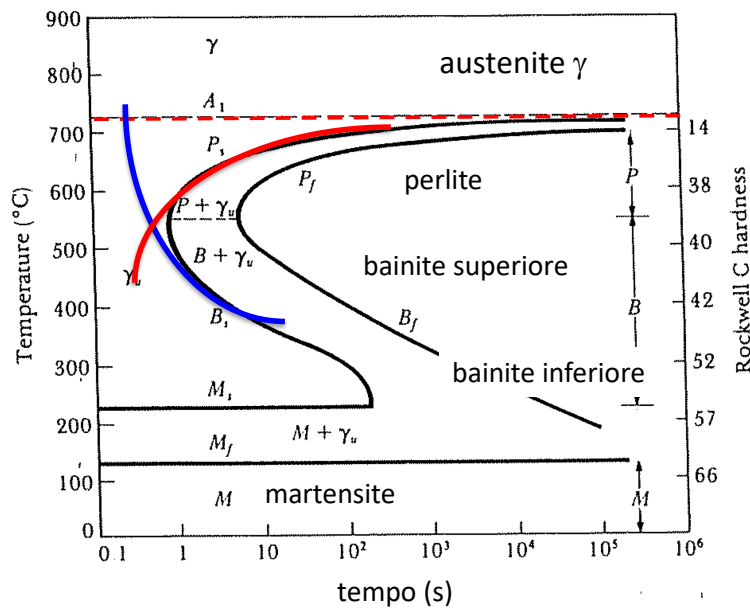
bordi di grano del γ
aggetti di Fe_3C

Quando arriva una dislocazione al precipitato si ferma. Con un aumento dello sforzo può **raggirare l'ostacolo** e continua a scorrere fino al prossimo.

La bainite è una microstruttura **tenace** (alta resistenza e duttilità).

8.4 Meccanismo della trasformazione

Ogni trasformazione dell' austenite in nuove fasi (microstrutture) avviene in due passi: la **nucleazione** e dopo la **crescita**. Entrambi dipendono dalla temperatura.

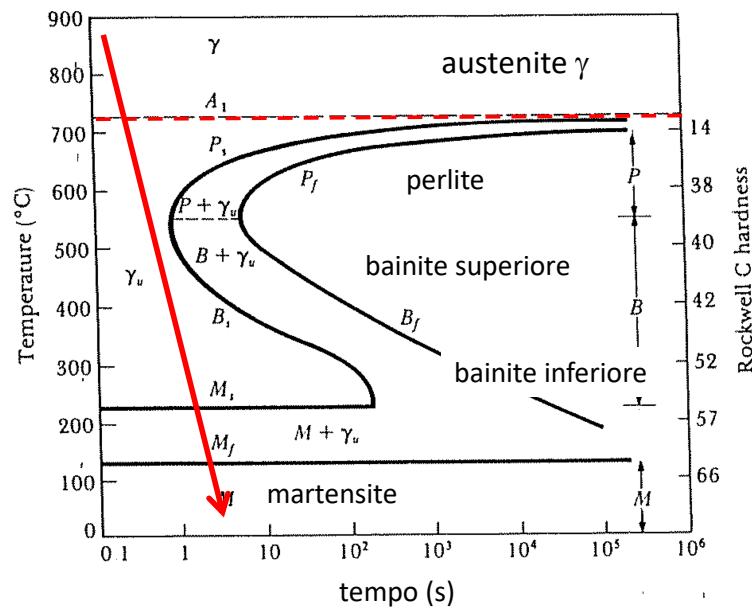


Crescita delle nuove fasi:
controllata dalla diffusione
molto veloce a T alte

Nucleazione delle nuove fasi:
controllata dal sotto raffreddamento ($T_{eq} - T_{trasf}$)
più veloce a T basse

8.4 La martensite

La trasformazione dell' austenite in martensite avviene con una tempra velocissima: **non avviene la diffusione.**



Austenite: fase γ con un tenore di C (es. 0.6%)

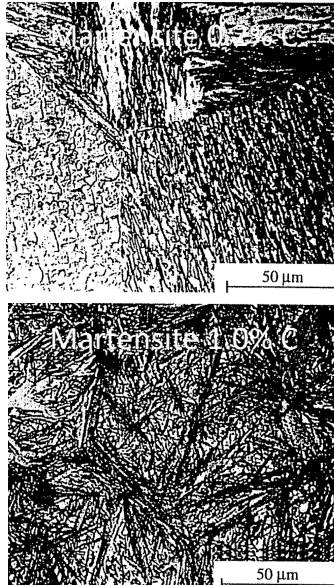
Dovuto alla tempra rapida non si può formare Fe₃C

Gli atomi di carbonio rimangono intrappolati nel reticolo CCC
-> sovra-saturazione
-> martensite

Come si prevede la durezza della martensite ?

8.4 La martensite

La martensite è ferrite a con un tenore di carbonio tra 0.2% e 1%. Rispetto alla solubilità di C di 0.002 % (T ambiente) è **una fortissima sovra-saturazione**.



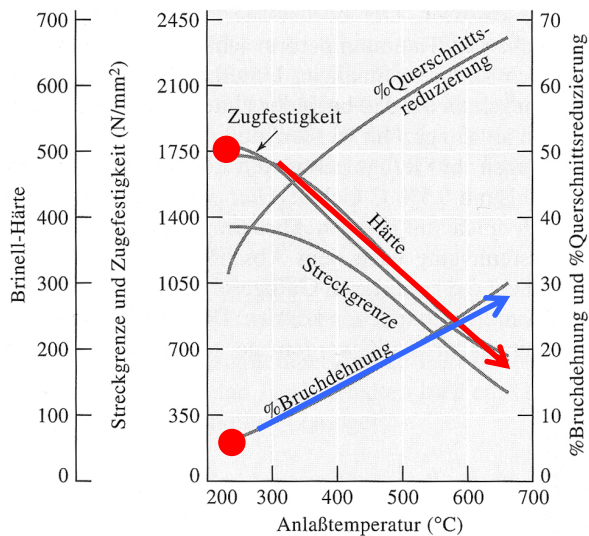
Dovuto alla presenza di un' altissima concentrazione di carbonio C nelle posizioni interstiziali il reticolo viene fortemente distorto.

L'asse z del reticolo CCC si allunga e il reticolo diventa TCC.

Le dislocazioni sono bloccate, la martensite è molto dura e fragile, deformazione < 3%.

Disegnare la curva di trazione della martensite.

8.4 Rinvenimento della martensite



Dopo la tempra la martensite è molto dura e resistente, ma abbastanza fragile. ●

Il processo di rinvenimento (**mantenere la martensite a T elevate**) permette di modificare le proprietà meccaniche:

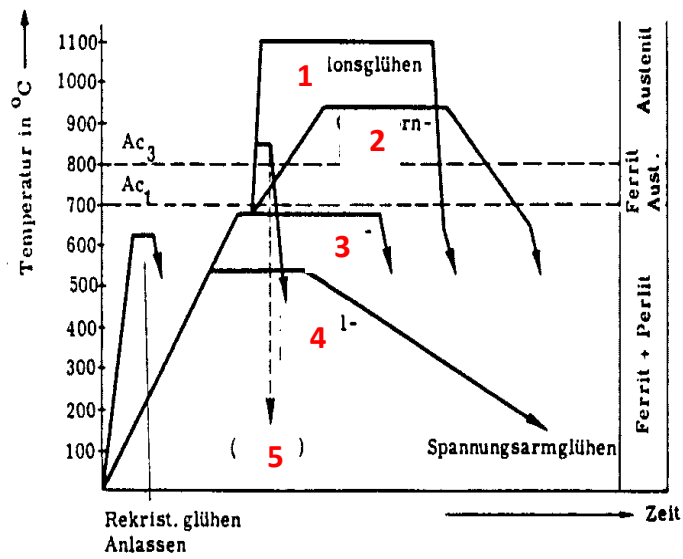
-> **durezza e resistenza diminuiscono**

-> **allungamento a rottura aumenta**

A temperature elevate la diffusione diventa sempre di più possibile, il sistema può raggiungere l'equilibrio. Si forma cementite Fe_3C globulare (sferico).

Domanda: perché con la formazione di precipitati Fe_3C diminuisce la resistenza ?

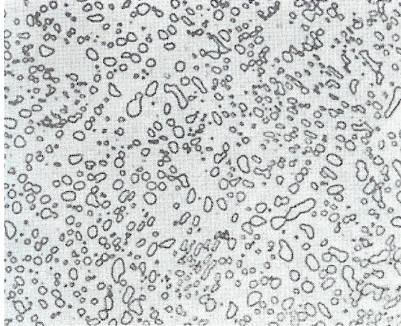
8.4 Trattamenti termici degli acciai



- 1 Ricottura di diffusione
- 2 Ricottura grani grossi
- 3 Ricottura di addolcimento
- 4 Normalizzazione
- 5 Tempra

8.4 Ricottura per addolcimento

Questo processo di ricottura a temperature $< 723^{\circ}\text{C}$ (diagramma di stato $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) dura molto a lungo. I precipitati Fe_3C coalescono in particelle sferiche che si trovano in una matrice di ferro α . Questa microstruttura è facilmente lavorabile.



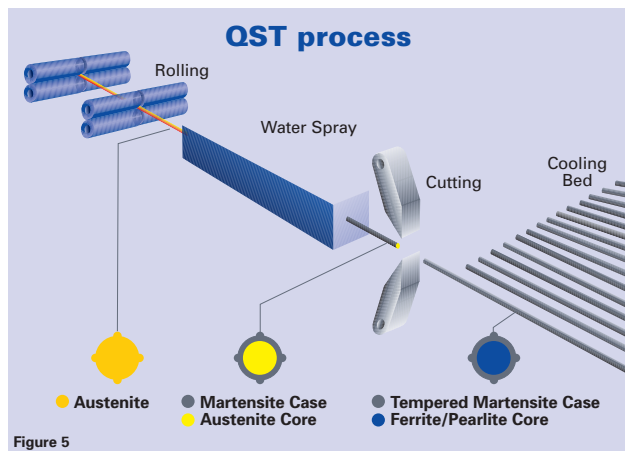
Microstruttura ferrite α con Fe_3C sferico (800x)

Perché dopo lungo tempo a T alte i precipitati di cementite Fe_3C diventano sferici ?

Dopo la lavorazione meccanica si esegue un altro trattamento termico (es. la normalizzazione) per ottenere la microstruttura (es. Perlite fine) con le proprietà meccaniche finali.

8.4 Processo “quenched and self tempering”

Questo processo viene utilizzato per produrre armature per il calcestruzzo.



Lavorazione (rolling) a T molto alte nella fase austenitica.

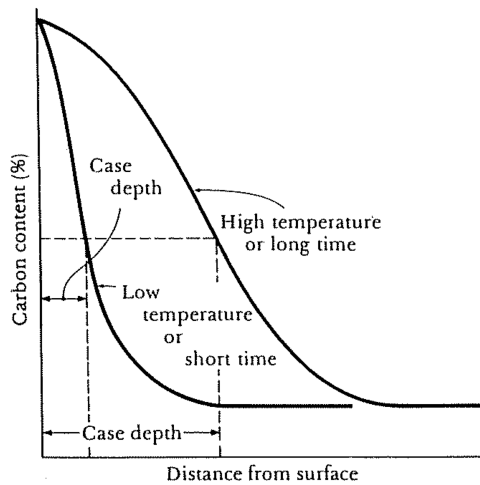
Breve tempra con acqua – si raffredda solamente la superficie (tempra superficiale). Si forma martensite in superficie, rimane austenite nel core

Dovuta alla temperatura ancora alta la martensite viene rinvenuta (self tempering) e l'austenite si trasforma in ferrite e perlite.

Il prodotto finale sono armature con una struttura ferritica/perlitica nel core ed una superficie di martensite rinvenuta.

8.4 Processo di cementificazione

Per molte applicazioni (es. ruote dentate in trasmissioni) si richiede una superficie molto dura ma la parte interna del pezzo tenace.



Questa situazione si può ottenere con un tenore di carbonio alto in superficie e più basso nel core. -> aumentare del tenore di carbonio tramite Diffusione a T alte (cementificazione). Cap. 6.2

A seconda il tipo di raffreddamento si crea una superficie perlitica ricco in Fe_3C o martensitica.

Con la cementazione il pezzo è messo a contatto con particolari sostanze che rilasciano carbonio (gas CO, liquido cianuro), entro forni ad alta temperatura, in modo da arricchirlo di carbonio in superficie.

8.5 Riassunto

Le proprietà meccaniche degli acciai vengono controllate dal tenore di carbonio e la quantità, dimensione, forma e distribuzione dei precipitati di cementite Fe_3C .

La trasformazione eutettoidica dell' austenite in $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ determina la microstruttura (a seconda della velocità di raffreddamento o della temperatura di trasformazione isoterma) e le proprietà degli acciai.

La trasformazione di austenite γ procede con un processo di nucleazione seguito di crescita dei precipitati di cementite Fe_3C . La conoscenza di questi meccanismi permette di controllare le proprietà.

La velocità di diffusione del carbonio è determinante per la microstruttura che si forma.

8.6 Domande di verifica

- Con quali parametri possono essere controllate le proprietà meccaniche degli acciai al carbonio ?
- Perché acciai con un tenore di carbonio alto in genere hanno anche una resistenza meccanica più alta ?
- Come si potrebbe produrre una ruota dentata ?
- Spiegare perché la dimensione dei precipitati di cementite è sempre più fine quando la trasformazione avviene a temperature più basse. Quali sono le conseguenze per le proprietà meccaniche ?
- Spiegare perché una ricottura di addolcimento porta ad un acciaio che può essere lavorato molto più facilmente ?