

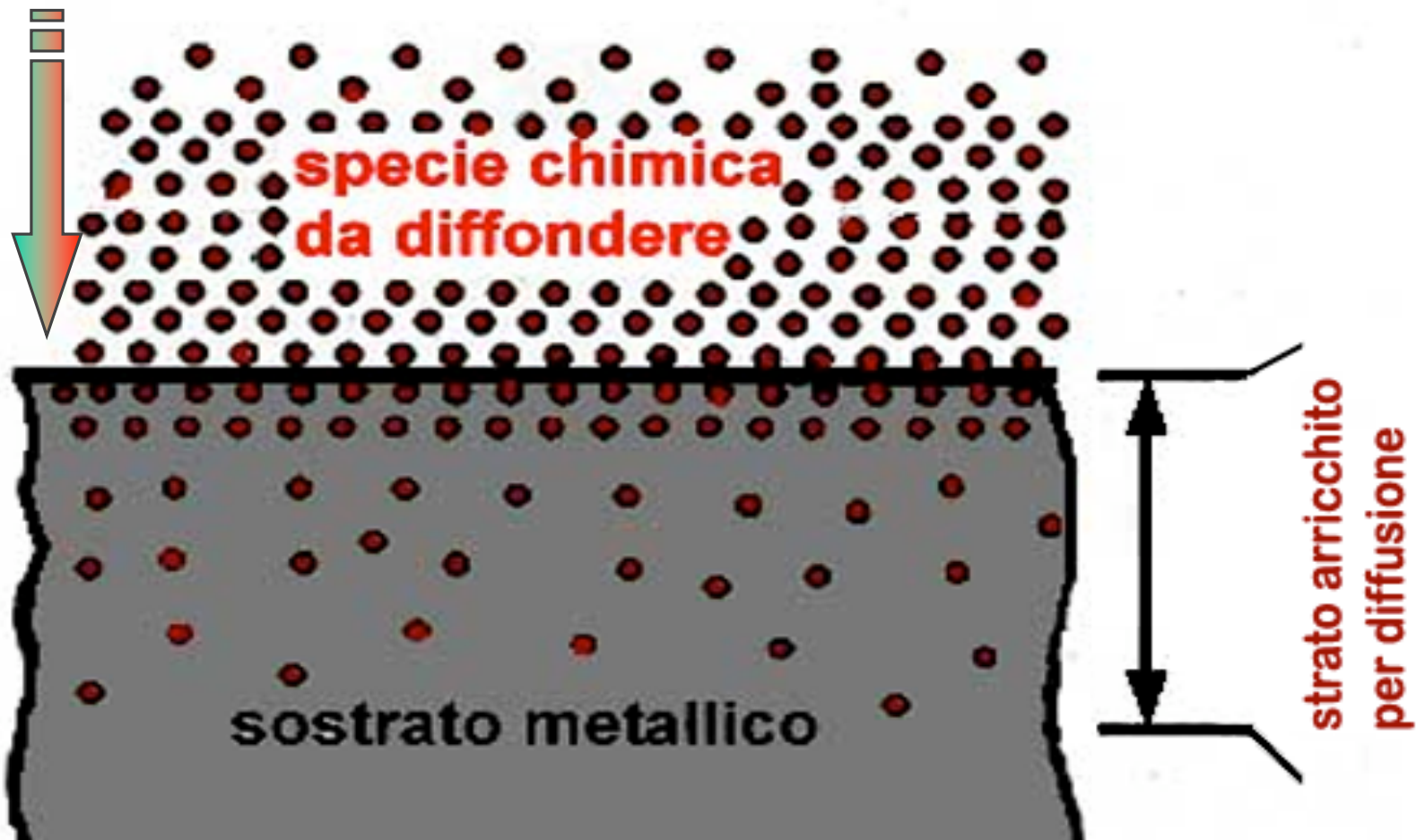
TRATTAMENTI TERMOCHIMICI DEGLI ACCIAI

m12

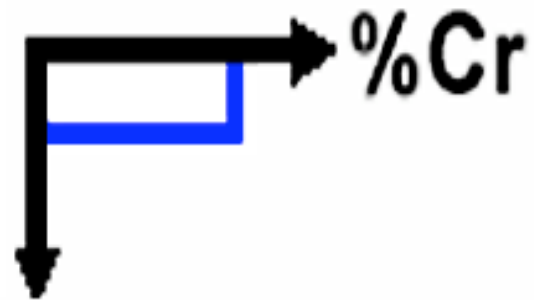
- *Scopi dei trattamenti diffusivi*
- *Trattamenti di Carbocementazione, Nitrurazione, Borurazione*
- *Proprietà ed applicazioni*

TRATTAMENTI TERMOCHIMICI di DIFFUSIONE

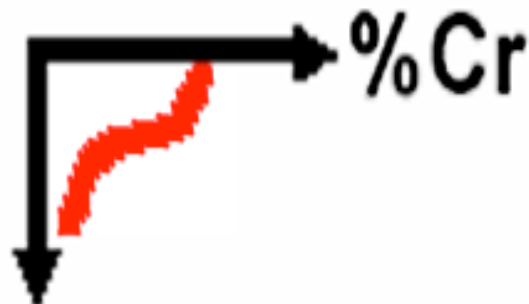
TRATTAMENTI ATTIVATI TERMICAMENTE CHE, ATTRAVERSO PROCESSI DI DIFFUSIONE ALLO STATO SOLIDO DI UNA O PIÙ SOSTANZE, PRODUCONO UNA MODIFICAZIONE DELLA COMPOSIZIONE CHIMICA DELLO STRATO SUPERFICIALE DEI METALLI E LEGHE.



TRATTAMENTI E RIVESTIMENTI



RIVESTIMENTO
(es. cromatura)



**TRATTAMENTO
TERMOCHIMICO**
(es. cromizzazione)

RICHIAMI SULLE LEGGI DELLA DIFFUSIONE

- ◆ La prima legge di Fick *in forma differenziale*, è

$$J = -D \frac{\delta \phi}{\delta x}$$

e descrive il *flusso* J attraverso lo spazio δx .
 D è la *diffusività* o *coefficiente di diffusione*;

dipende dall' ambiente in cui è immerso il fluido ed indica la rapidità di propagazione. (Il segno negativo è dovuto al fatto che il flusso va da una concentrazione più alta ad una più bassa).

- ◆ La seconda legge di Fick. nella forma differenziale è $\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}$

ϕ è la concentrazione in mol m^{-3}

t è il tempo in s

D è il coefficiente di diffusione che ha per dimensioni in $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

descrive la variazione nel tempo della concentrazione del fluido. La variazione di concentrazione è funzione del tempo e dello spazio; in questa forma la legge esprime la variazione della concentrazione nella direzione x ,

- ◆ Il coefficiente di diffusione a differenti temperature è spesso esprimibile, con margini di errore piccoli, dalla relazione dove

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{E_A}{R \cdot T}},$$

D è il coefficiente di diffusione

D_0 è il coefficiente massimo di diffusione (a temperatura infinita)

E è l'energia di attivazione per la diffusione

T è la temperatura assoluta misurata in *kelvin*

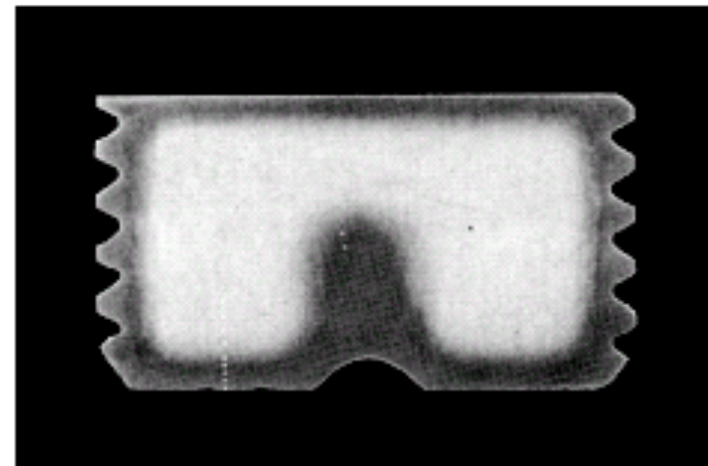
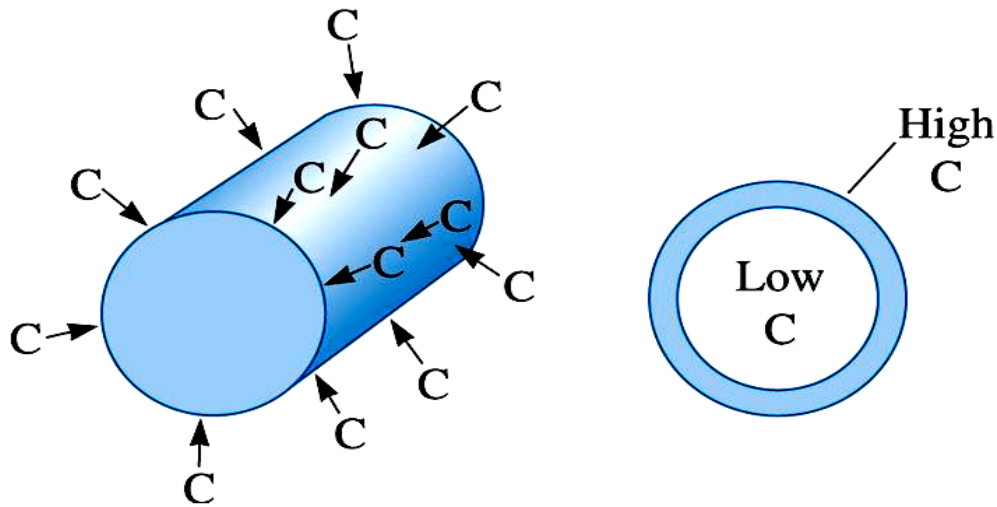
R è la costante dei gas

PRINCIPALI TRATTAMENTI TERMOCHIMICI

<i>Denominazione del trattamento</i>	<i>Specie chimica diffondente</i>
Carburazione, Carbocementazione	C
Nitrurazione	N
Carbonitrurazione	C, N
Nitrocarburazione	N, C
Borurazione	B
Cromizzazione	Cr
Aluminizzazione	Al
Sherardizzazione	Zn
Silicizzazione	Si
Solfonitrurazione	N, S

CARBOCEMENTAZIONE

Arricchimento superficiale in C, fino ad una percentuale prefissata (in genere non superiore a $\sim 0,8\%$) e per una profondità definita, a partire da un acciaio dolce ($C \leq 0,2\%$), attraverso la diffusione in fase solida.



**sezione ingranaggio cementato
profondità di cementazione 0,8 mm**

CARBOCEMENTAZIONE

Il trattamento di carbocementazione è di solito rivolto verso acciai dolci ($C \leq 0,2\%$) per:

- consentire la diffusione del carbonio con uno strato superficiale dotato di *un gradiente di concentrazione di C tra superficie e cuore*
- far coesistere nello stesso acciaio le due proprietà: *superficie dura e resistente ad usura e fatica + cuore tenace e resistente agli urti*

CARBOCEMENTAZIONE

Scopo: ottenere componenti con strato superficiale di elevata durezza, resistenza ad usura e a fatica (anche per lo stato tensionale residuo di compressione).

Esempi di applicazioni:

Ruote dentate, punzoni, alberi a camme, ingranaggi, bilancieri, parti di cuscinetti, forchette per cambio, perni, coltelli, etc...

Durezze tipiche:

➤ **Da 57 a 62 HRC in superficie ($550 \div 700 \text{ HV}_1$)**

Spessori:

➤ **Tipicamente $0,3 \div 2,5 \text{ mm}$**

CARBOCEMENTAZIONE

Strati cementati hanno alta resistenza all'usura, perché il tasso di usura è inversamente proporzionale alla durezza:

Equazione di Archard:



$$W = K \frac{F_N}{H}$$

- **W = volume rimosso per unità di percorso di strisciamento, *tasso di usura*.**
- **F_N = carico normale.**
- **H = durezza della superficie più tenera.**
- **K = Coefficiente di usura di Archard.**

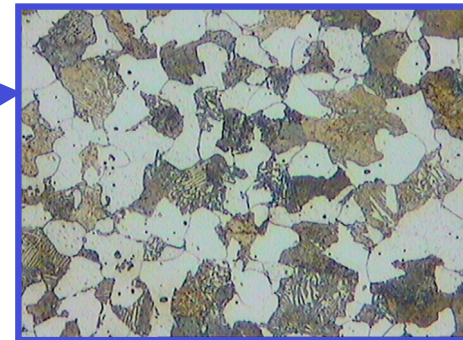
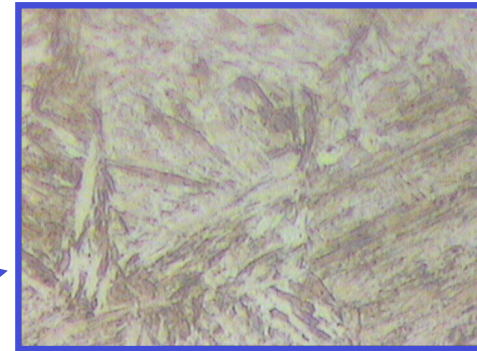
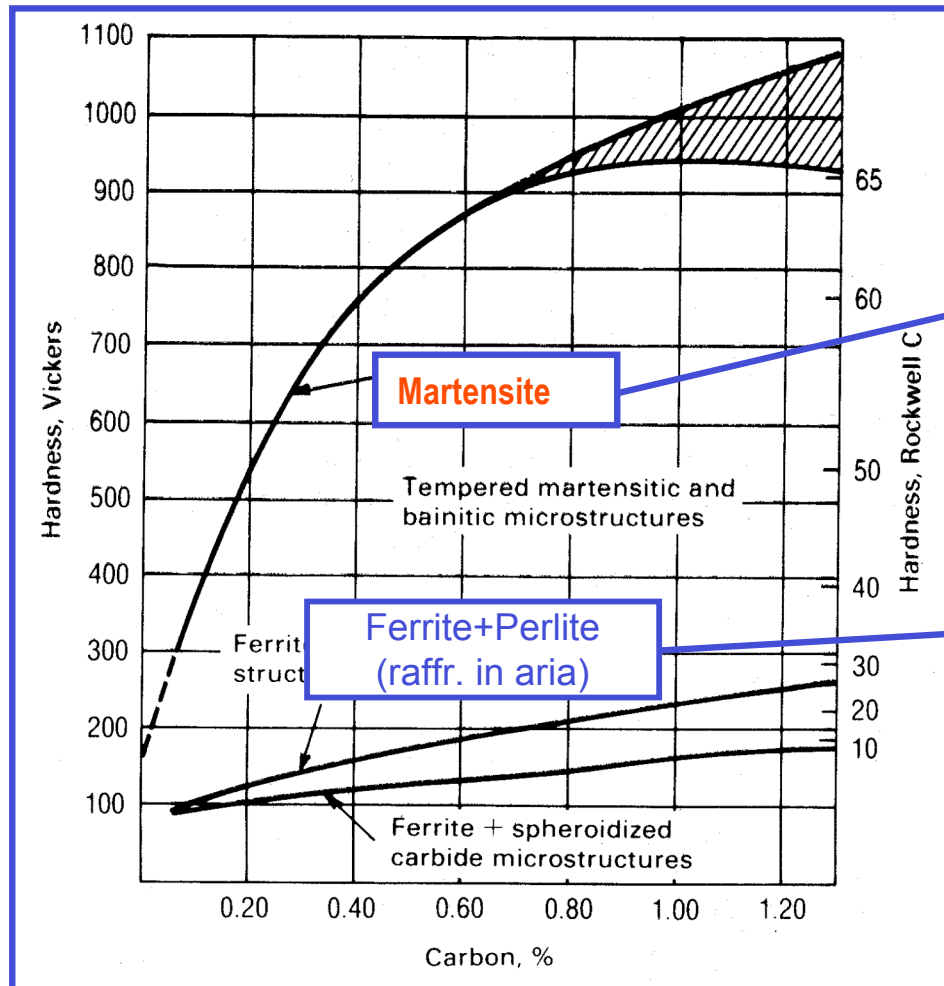
CARBOCEMENTAZIONE

- ✧ **Riscaldamento a T maggiori di A_{c3} → in campo austenitico
(T= 850 ÷ 950 °C)**
- ✧ **Mantenimento alla temperatura prescelta per un tempo determinato in atmosfera cementante (in grado di fornire carbonio)**
- ✧ **Trattamento termico di tempra per conferire alla regione superficiale una struttura martensitica → elevata durezza superficiale**

CARBOCEMENTAZIONE

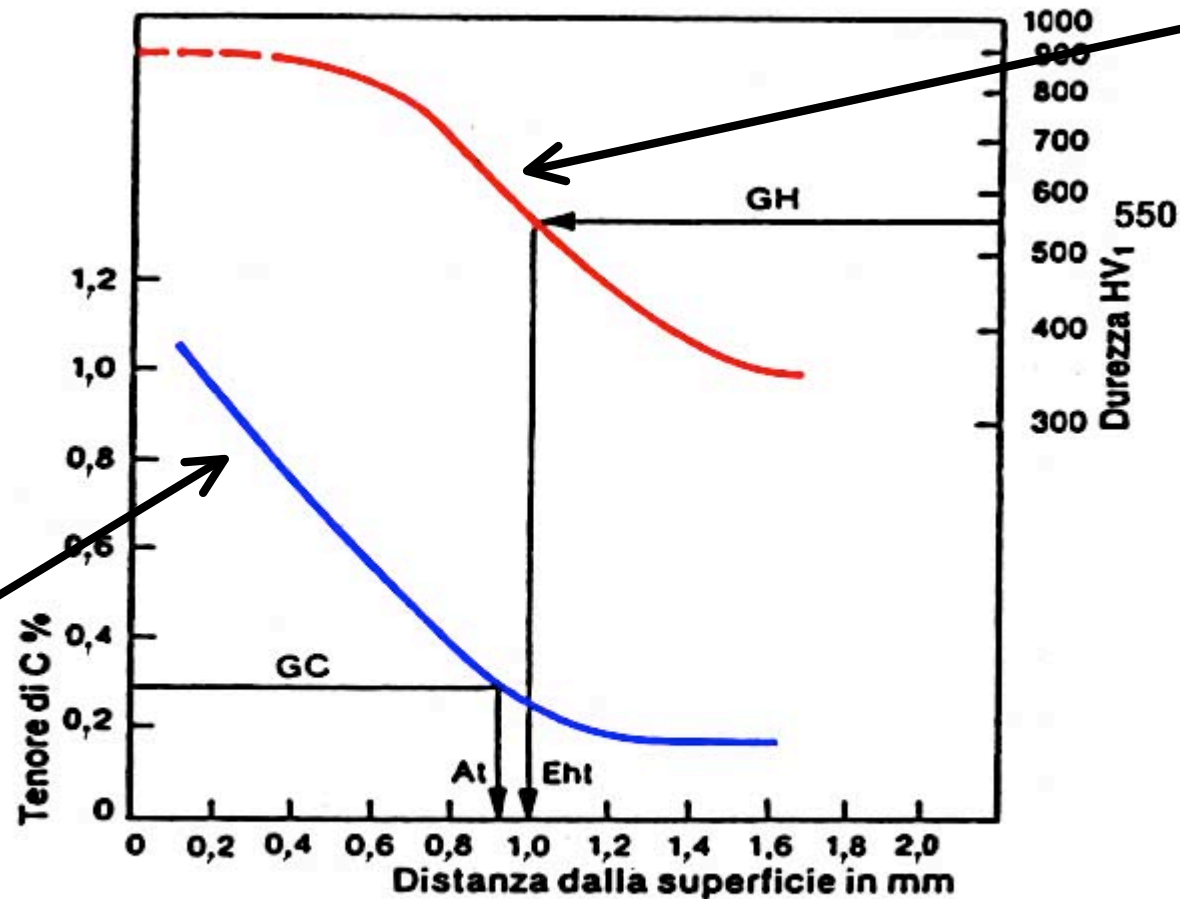
L'incremento superficiale di C aumenta la durezza della martensite.

Il tenore superficiale di C ottimale è ~ 0,8%. Tenori più elevati (ipercementazione) produce eccessiva fragilità dello strato.



CARBOCEMENTAZIONE

Correlazione tra la *variazione di durezza* ed il *profilo di concentrazione di Carbonio*



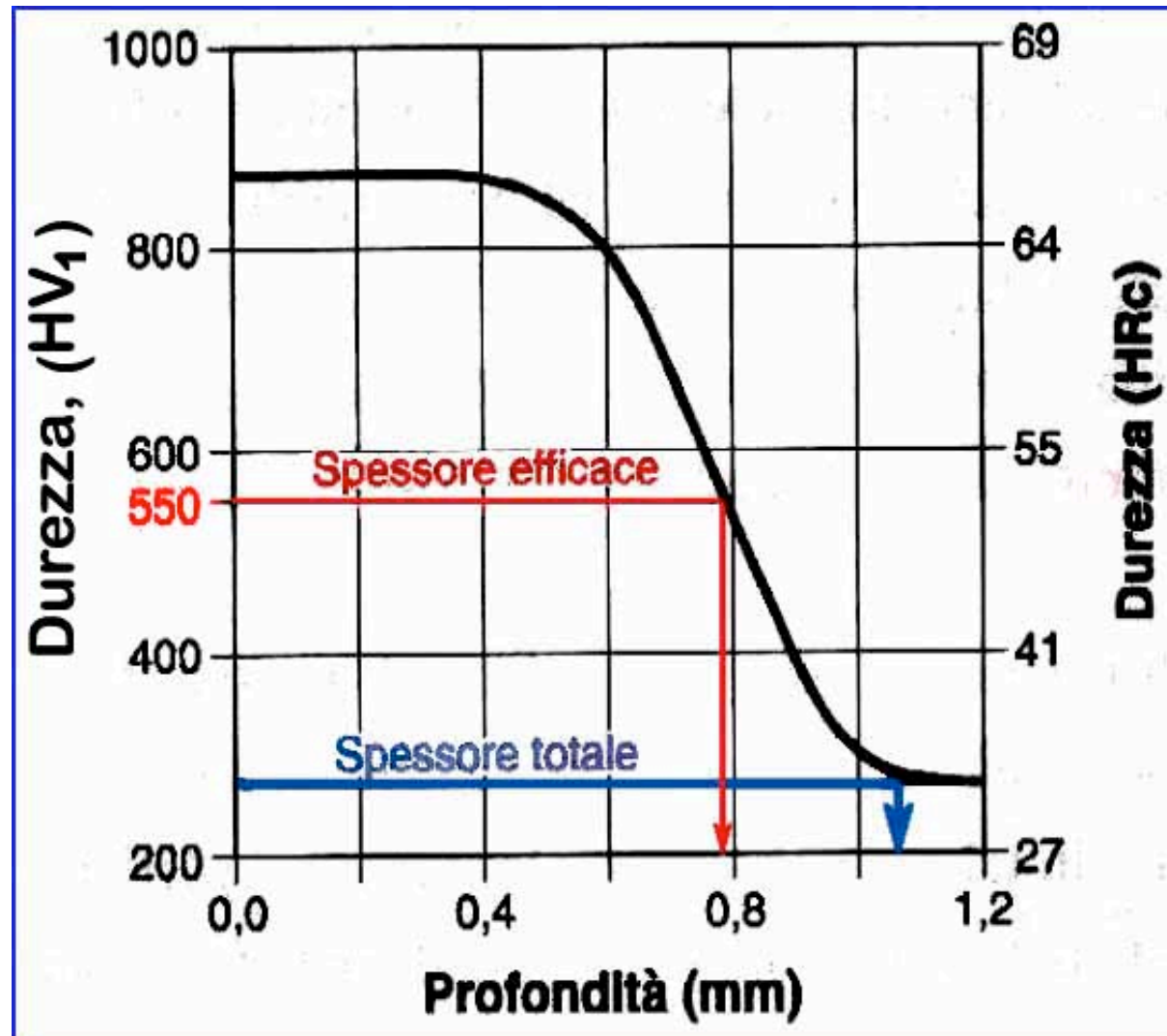
Profondità di cementazione in funzione del tenore di carbonio (At) e della durezza (Eht)

GH = durezza limite
GC = tenore limite di C

SPESSORE EFFICACE DI CEMENTAZIONE

Lo spessore efficace dello strato è quello compreso tra la superficie del pezzo ed il punto in cui la durezza è eguale a **550 HV₁**

Spessore totale di cementazione: spessore dello strato compreso tra la superficie del pezzo ed il punto in cui la durezza e la microstruttura sono eguali a quelle del cuore



MATERIALI TRATTABILI (*norma UNI 7846 o UNI 8550*)

Sottoposti a successiva TEMPRA e RINVENIMENTO

- **Acciai non legati ($C < 0,2\%$)**
- **Acciai a basso C al Cr- Mn, Cr- Mo, Ni- Cr, Cr- Ni, Ni- Cr- Mo**

Le percentuali dei vari elementi di lega non superano in generale i seguenti valori massimi:

Mn = 2 %, Ni = 5 %, Cr = 2 %, Mo = 0,5 %

ACCIAI DA CEMENTAZIONE (norma UNI 7846)

ACCIAI DA CEMENTAZIONE UNIFICATI (TABELLA UNI 7846). (Trattamento termico su provetta con 0,5 mm di sovrametallo)

Gruppo	Designazione	Composizione chimica media % (*)					Caratteristiche meccaniche			
		C	Mn	Cr	Ni	Mo	R _{min} N/mm ²	R _{po,2} N/mm ²	A _{min} %	KV _{min} J
Acciai al C	C 10	0,10	0,50	-	-	-	540	345	12	35
	C 15	0,15	0,50	-	-	-	740	440	9	22,5
Acciai al Mn-Cr	16 MnCr 5	0,16	1,15	-	-	-	1030	735	8	25
	20 MnCr 5	0,20	1,25	-	-	-	1230	930	7	17,5
Acciai al Cr-Mo	18 CrMo 4	0,18	0,75	1,00	-	0,20	1130	885	8	25
Acciai al Ni-Cr	12 CrNi 3	0,12	0,45	0,55	0,65	-	740	490	10	32,5
Acciai al Cr-Ni	16 CrNi 4	0,16	0,85	0,95	0,95	-	1080	835	9	30
	20 CrNi 4	0,20	0,95	1,05	1,05	-	1270	980	7,5	25
Acciai al Ni-Cr-Mo	16 NiCrMo 2	0,16	0,80	0,50	0,55	0,20	980	685	9	27,5
	20 NiCrMo 2	0,20	0,80	0,50	0,55	0,20	1180	930	7	27,5
	18 NiCrMo 5	0,18	0,75	0,85	1,35	0,20	1230	980	8	30
	18 NiCrMo 7	0,18	0,55	0,55	1,65	0,25	1230	980	8,5	30
	16 NiCrMo 12	0,16	0,55	0,95	2,95	0,35	1230	980	9	32,5

(*) Inoltre per tutti i tipi: Si ≤ 0,35%; S e P ≤ 0,035%.

NORMATIVE CONTINENTALI E NAZIONALI PER ACCIAI DA CEMENTAZIONE

EUROPA	ITALIA	SPAGNA	GERMANIA	FRANCIA	U.K	SVEZIA	USA
EN	UNI	UNE	DIN	AFNOR	B.S.	SS	AISI SAE
C10E C10R	C10	F1510	Ck10 1.1121	XC10	045M10	1265	1010
C15E C15R	C15	F1511	Ck15 1.1141 Cm15 1.1140	XC12	--	1370	1015
C16E	C20	F1511	Ck22 1.1151 Cm22 1.1149	XC18	070M20	1313	A29 1016
16MnCr5	16MnCr5	F1516	16MnCr5 1.7131	16MC5	--	2173	5115
20MnCr5	20MnCr5	F150.D	20MnCr5 1.7147	20MC5	--	--	5120
17NiCrMo6-4	--	--	17NiCrMo64	--	--	--	--
17NiCrMo6-4	18NiCrMo5	--	--	18NCD6	815M17	2523	4317
20NiCrMo2-2	20NiCrMo2	F1522	21NiCrMo2 1.6523	20NCD2	805M20	2506	8620 appr
16NiCr4	16CrNi4	F1581	15CrNi6 1.5919	16NC4	637M17	2511	3215 appr
16NiCr12	16NiCr11	F154 F150.I	14NiCr10 1.5732	16NC11	--	--	3415
14NiCrMo13-4	16NiCrMo12	--	--	16NCD13	--	--	9314

CARBOCEMENTAZIONE

Nel trattamento di Carbocementazione si possono distinguere due fasi :

- 1) **di arricchimento superficiale** in carbonio;
- 2) **di diffusione del carbonio** entro il pezzo.

FORMULA DI HARRIS



$$d_c = K \sqrt{t}$$

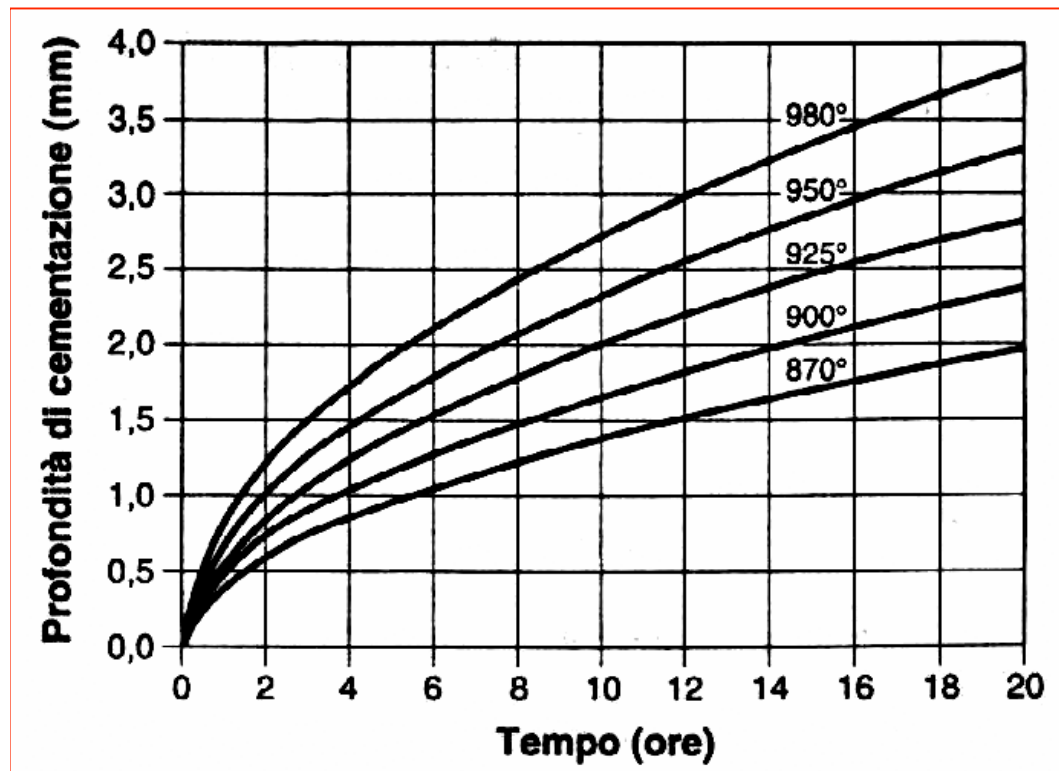
d_c = profondità di cementazione

K = funzione crescente della temperatura
(fattore di profondità)

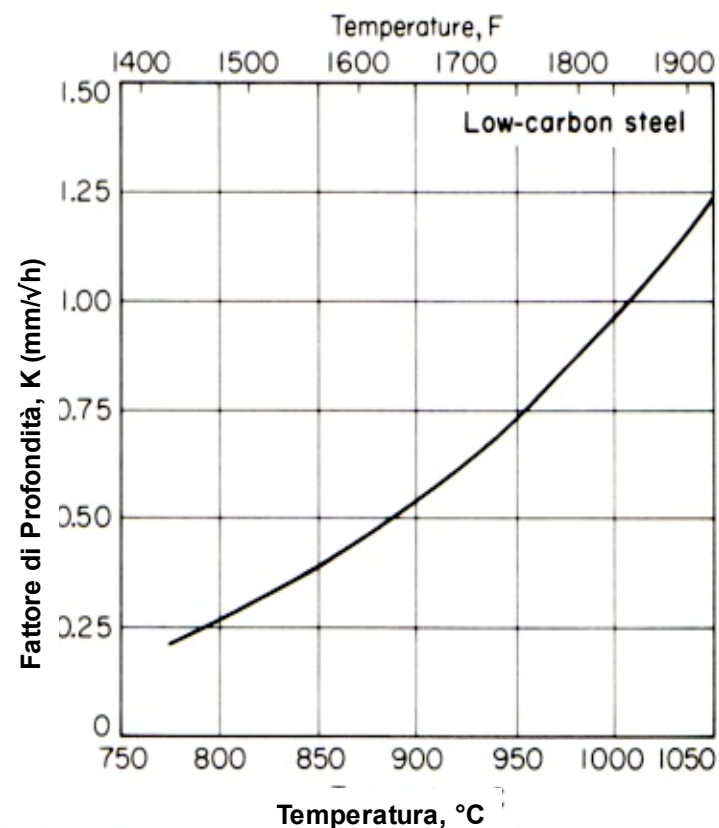
t = durata del trattamento di cementazione

È valida per tutti gli acciai, purché il potenziale di cementazione dell'atmosfera sia tale da saturare in superficie l'austenite

CARBOCEMENTAZIONE



Correlazione fra spessore dello strato cementato (in fase gassosa), temperatura e durata del processo



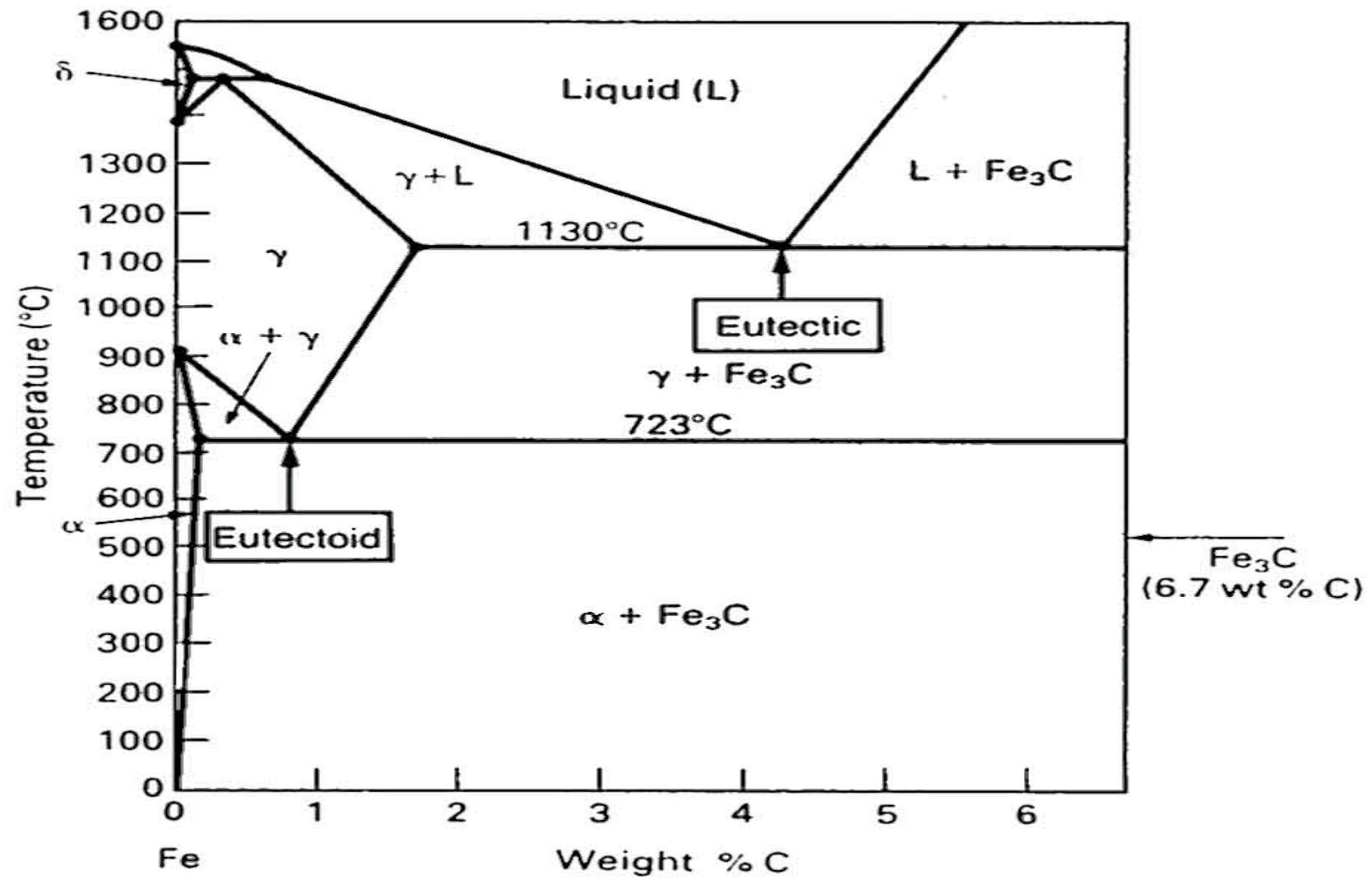
Variazione del fattore di profondità K in funzione della temperatura di cementazione per un acciaio a basso tenore di C

CARBOCEMENTAZIONE

La cementazione può essere effettuata in mezzi:

- 1. SOLIDI**
- 2. LIQUIDI**
- 3. GASSOSI**
- 4. SOTTO VUOTO**
- 5. ASSISTITI DA PLASMA**

In ogni caso il pezzo metallico viene riscaldato sopra A_{c_3} ⇒ stabile austenite ⇒ elevata solubilità del C ⇒ la diffusione del C è facilitata.

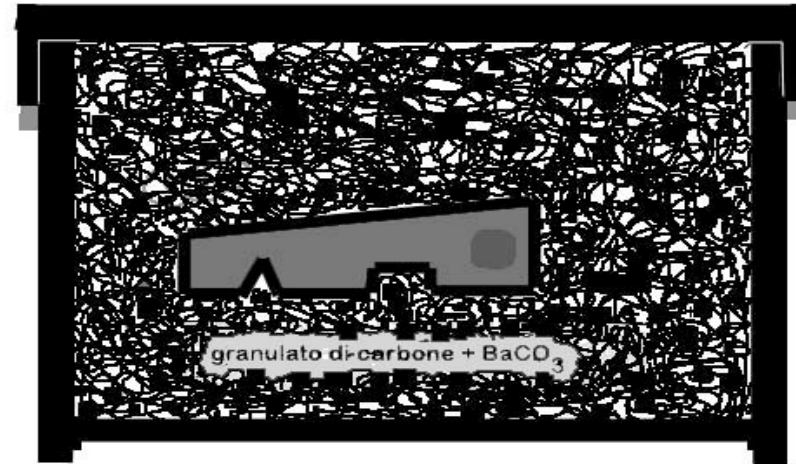
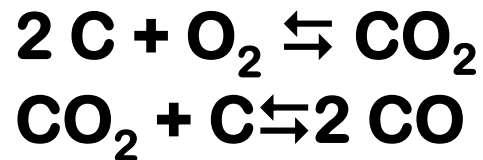


Cast irons
High-carbon steels
Medium-carbon steels
Low-carbon ("mild") steels

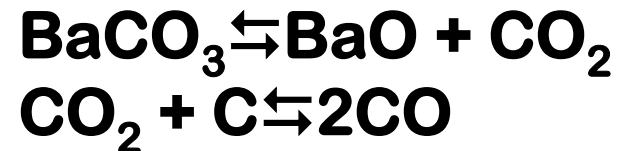
CARBOCEMENTAZIONE SOLIDA

Pezzo + Cemento solido (es. granuli di Carbone + carbonati di Bario o Calcio) in cassetta sigillata

T= 900 ÷ 950 °C
tempo = 2 ÷ 10 h



Temperatura di cementazione > A₃



L'agente cementante è CO che, catalizzato dal ferro, si dissocia:



Per proteggere eventuali zone da non cementare → deposizione galvanica di rame (75÷100 mm)

CARBOCEMENTAZIONE SOLIDA

VANTAGGI

- Semplice esecuzione e riuscita
- Costo di impianto modesto

SVANTAGGI

Elevata durata del processo (→ costi elevati, ingrossamento dei grani, distorsione dei pezzi, elevata ossidazione superficiale).

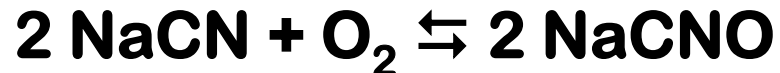
Scarsa uniformità di spessore degli strati cementati (è difficile controllare la profondità di cementazione, anche per la disposizione dei pezzi nella cassetta).

I mezzi solidi sono in disuso per motivi economici, utilizzata solo per piccoli lotti di pezzi che non richiedono particolari proprietà metallurgiche (strato cementato non molto omogeneo, difficoltà d'esecuzione dei successivi trattamenti termici).

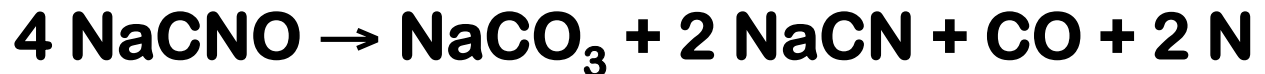
CARBOCEMENTAZIONE LIQUIDA

Come cementi sono utilizzati **Bagni di Sali fusi**: solitamente **cianuri alcalini** (NaCN), miscelati con carbonati e cloruri (Na_2CO_3 , NaCl, BaCl_2) e con attivanti ($\text{Ba}(\text{CN})_2$).

ossidazione



decomposizione



T=870 ÷ 950 °C
t~ 15 min ÷ 1h



Dopo cementazione tempra diretta

CEMENTAZIONE LIQUIDA

VANTAGGI

- ◆ Temperature e tempi di cementazione inferiori (→ minor ingrossamento dei grani).
- ◆ Non ossidazione dei pezzi durante il trattamento.
- ◆ Modeste deformazioni.
- ◆ Può essere eseguita su pezzi grandi.
- ◆ Semplicità di controllo della temperatura del bagno.
- ◆ Più facile e preciso controllo dello spessore indurito.
- ◆ Possibilità di temprare i pezzi direttamente in uscita dal bagno di cementazione.

SVANTAGGI

- ◆ Tossicità dei cianuri, problematiche legate alla lavorazione ed allo smaltimento dei rifiuti

CARBOCEMENTAZIONE GASSOSA

- **Tecnica più diffusa.**
- **In forni a caricamento continuo o discontinuo, a circolazione forzata, in cui l'atmosfera cementante è costituita da CO (generato per combustione parziale di metano, gas naturale e carbone di legna) + idrocarburi (metano e propano) + altri gas ad azione riducente (H) o inerti (N).**

Temperature, $T \approx 900$ °C

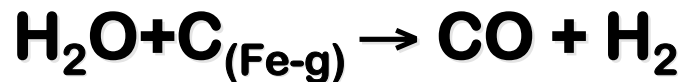
Tempi, $t \approx 3 \div 4$ h (ricavati dalla formula di Harris)

Dopo cementazione: tempra diretta o indiretta

CEMENTAZIONE GASSOSA



In concomitanza ci possono essere **reazioni decarburanti**:



controllo accurato di composizione e portata della miscela gassosa.

CEMENTAZIONE GASSOSA

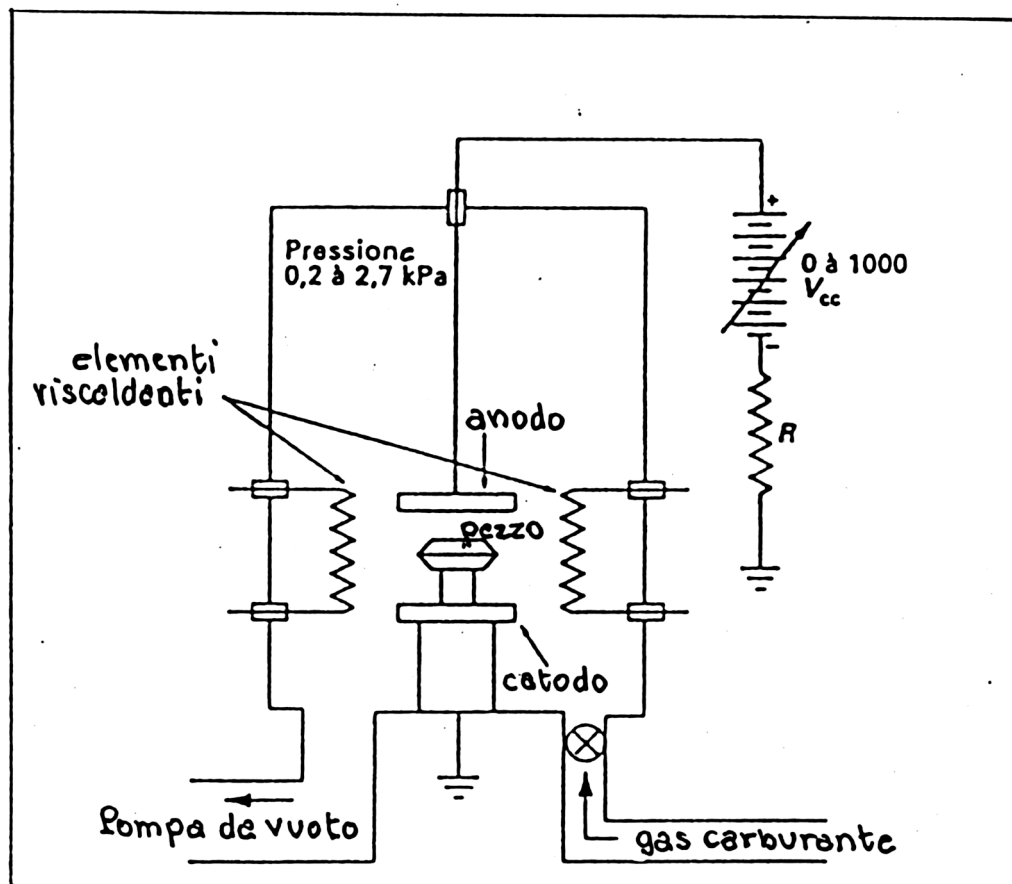
**VANTAGGI: PROCESSO CONTROLLABILE E VELOCE.
MIGLIOR TIPO DI CEMENTAZIONE DAL
PUNTO DI VISTA QUALITATIVO.**

**È la tecnica più evoluta e più
diffusa, applicata nelle
produzioni di serie di pezzi
di piccole e medie
dimensione**

SVANTAGGI: COSTI DELL'IMPIANTO

CEMENTAZIONE ASSISTITA DA PLASMA

È un trattamento di cementazione effettuato in forni sottovuoto usando la tecnologia della scarica ionica in plasma di metano



I pezzi da trattare sono collegati ad un circuito elettrico a corrente continua dove fungono da catodo, mentre la storta funge da anodo

Gli elettroni emessi dal catodo sono in grado di ionizzare atomi o molecole del gas

CARBOCEMENTAZIONE AL PLASMA

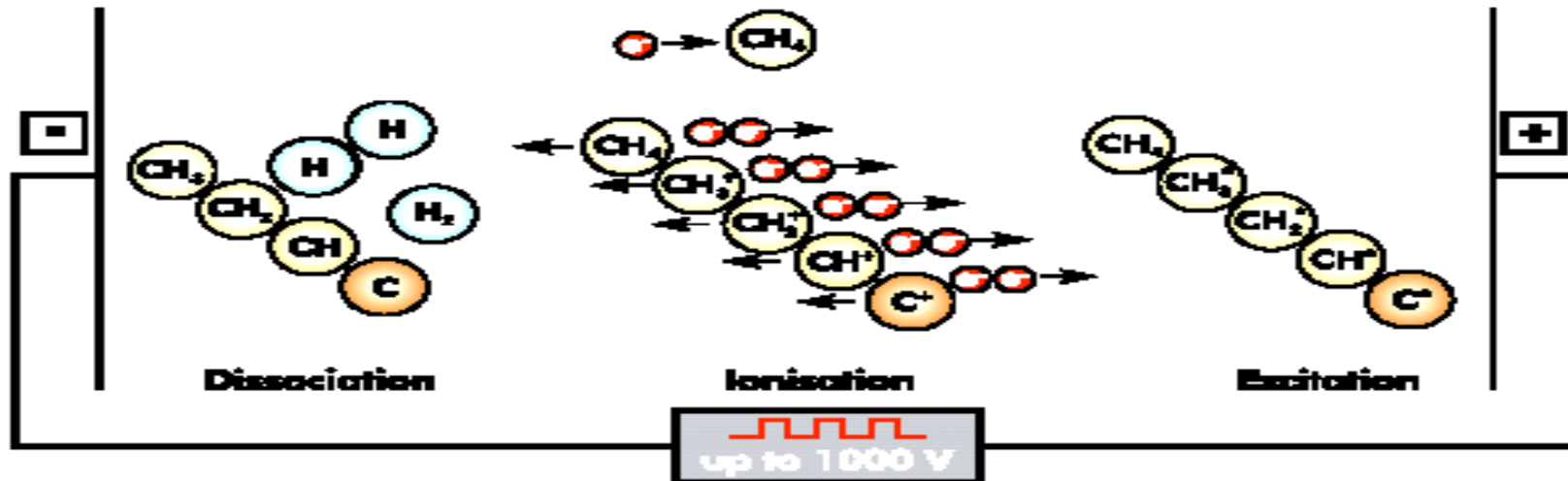
L'effetto del plasma è quello di facilitare enormemente il trasferimento di C dal gas alla superficie dell'acciaio $\Rightarrow$ riduzione dei tempi di trattamento $\Rightarrow$ non ingrossamento del grano austenitico

Illustration 2: **Reaction in Plasma**

Process gas: CH_4

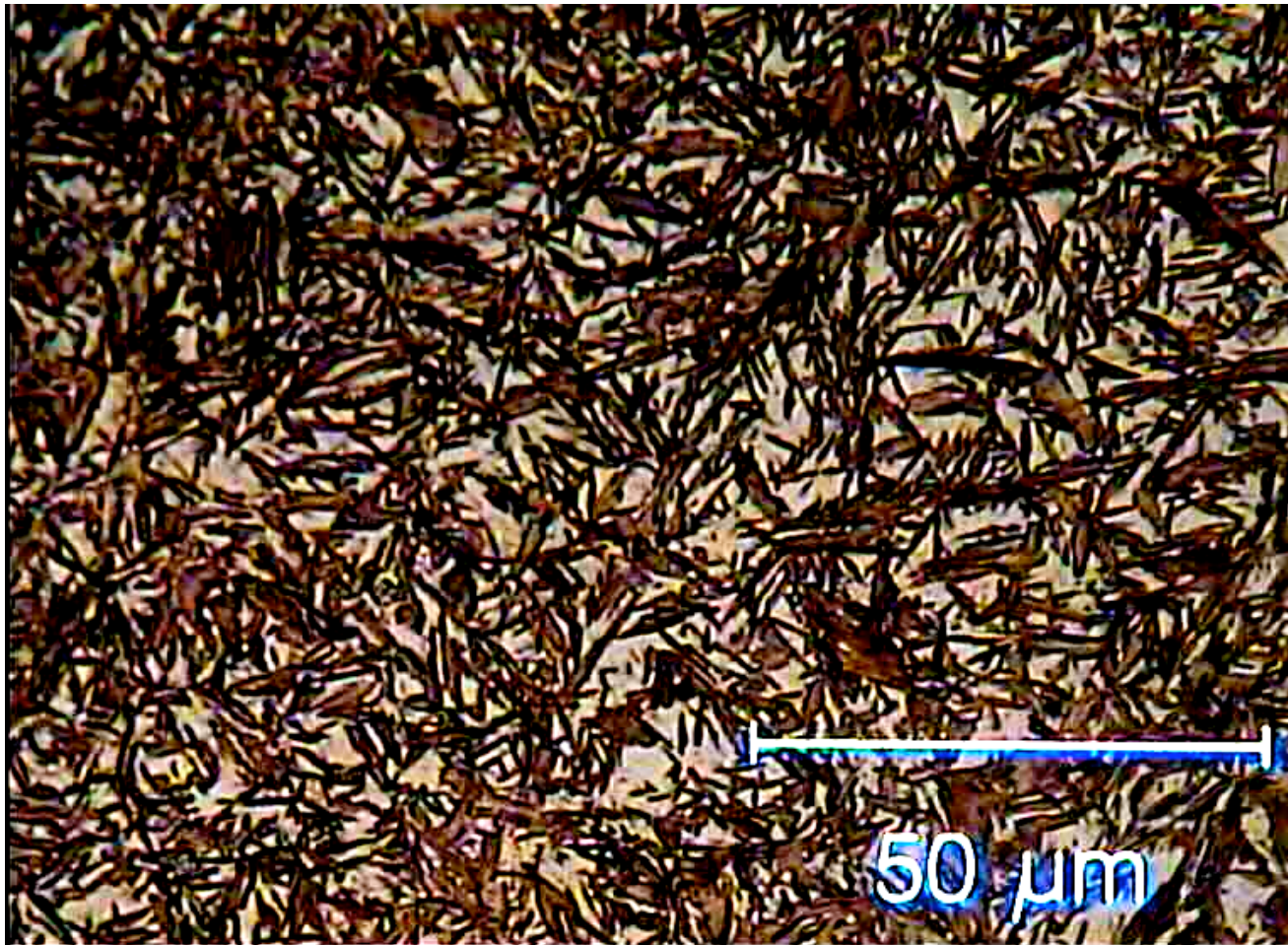
Temperature: $920^\circ\text{C} - 980^\circ\text{C}$

Carbon output/efficiency: up to 80% (at approx. 0.6 mA/cm^2)



TRATTAMENTI TERMICI DOPO CEMENTAZIONE

Il trattamento comunemente abbinato alla carbocementazione è la tempra, in modo da ottenere uno strato superficiale a struttura martensitica (con buona resistenza ad usura)

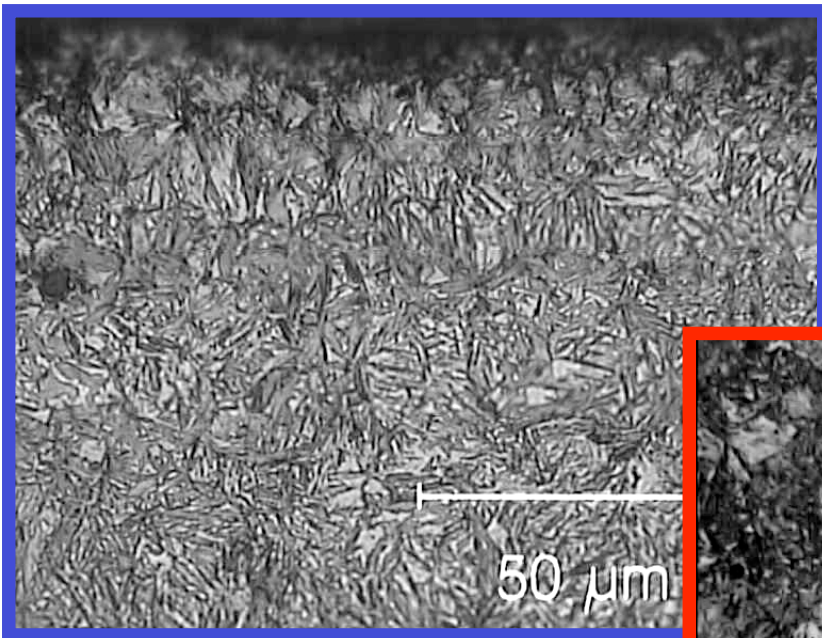


Dopo tempra si effettua generalmente un rinvenimento a bassa temperatura (distensione)

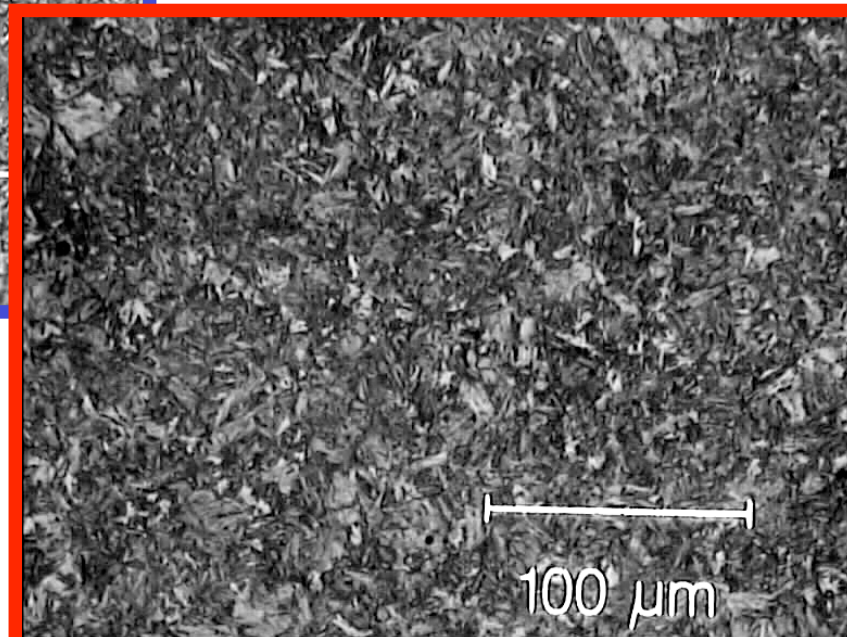
ESEMPIO DI CARBOCEMENTAZIONE

Acciaio 18NiCrMo5

- Cementazione a 900 °C per circa 4 h
- Tempra a 825°C in olio a 50°C e successiva distensione a 160°C per due ore.

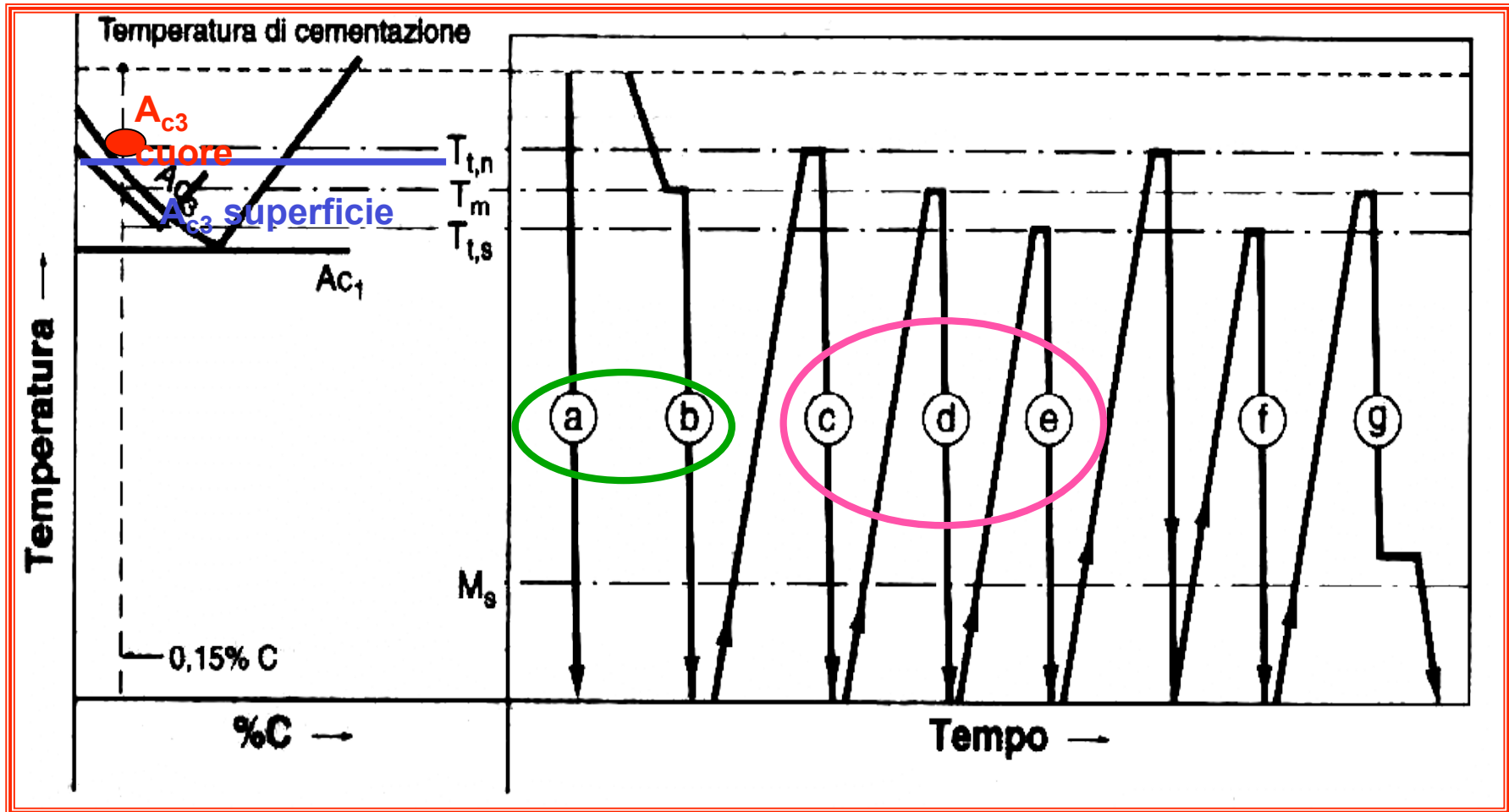


Struttura
martensitica ed
austenite residua
(bianca) sulla zona
corticale



Struttura a
cuore di
tipo
bainitico
grossolana

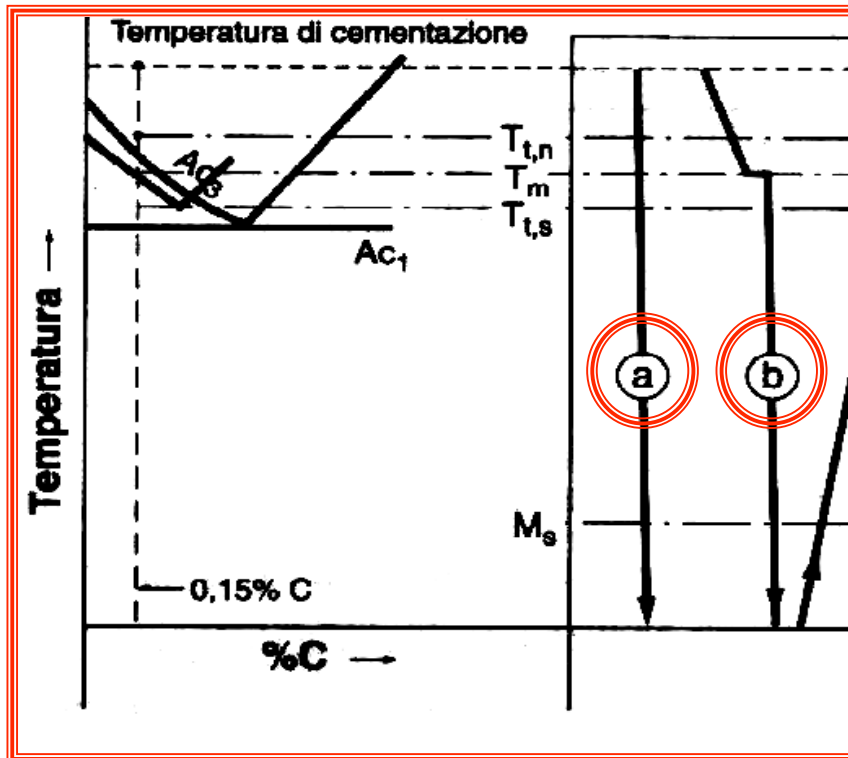
TRATTAMENTI TERMICI POST-DIFFUSIONE



Schema dei possibili trattamenti termici successivi alla carbocementazione
A seguito della cementazione: A_{c3} cuore $\neq$ A_{c3} superficie

Cicli di tempra diretta (a-b) o indiretta (c,d)

TRATTAMENTI TERMICI POST- CEMENTAZIONE



TEMPRA DIRETTA (a, b)

- subito all'uscita dagli ambienti cementanti,
- (a) dopo raffreddamento ad una temperatura compresa tra quella di cementazione e quella critica del cuore.

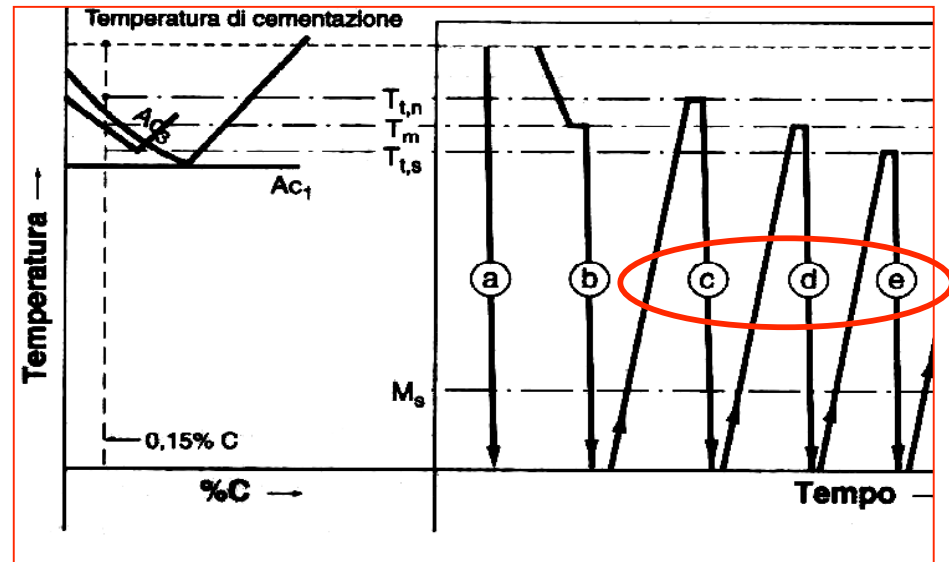
Probabile **ingrossamento del grano austenitico** → riduzione della tenacità; possibile **formazione di austenite residua** nello strato cementato.

Trattamento diffuso per gli acciai a grano controllato.

TRATTAMENTI TERMICI POST- CEMENTAZIONE

TEMPRA INDIRETTA c, d, e

Raffreddamento lento fino a T ambiente e successiva riaustenitizzazione e tempra.



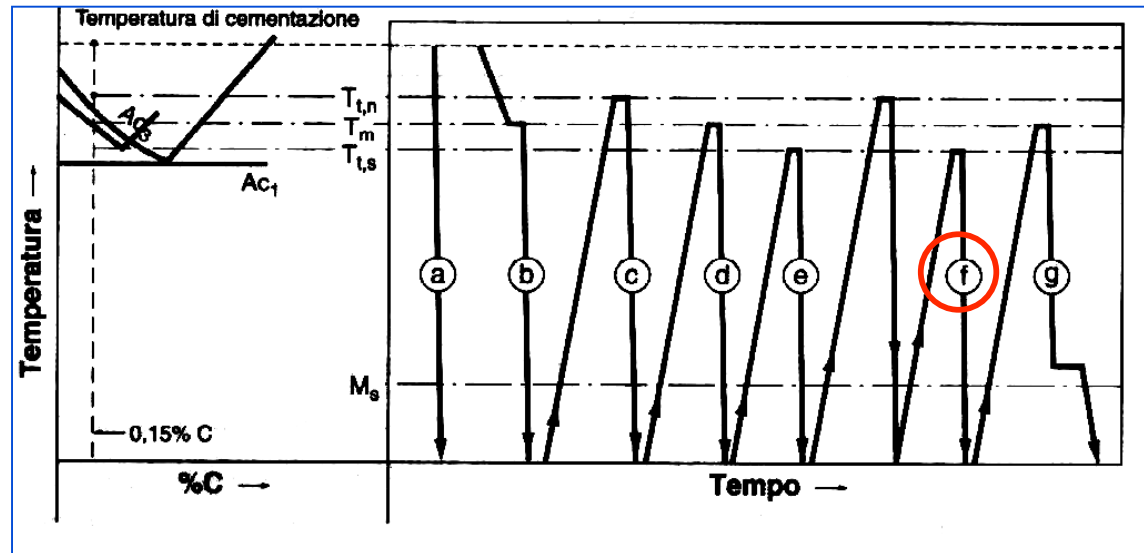
(c): tempra unica da alta T 20÷30 °C sopra A_{c3} del cuore. *Ottimizza la tenacità del cuore* ma strato superficiale a cristalli grossolani (T troppo alta per il suo tenore di C).

(d): tempra unica da una temperatura intermedia tra Ac_3 del cuore ed $Ac_3 \equiv Ac_1$ della superficie; *caratteristiche metallurgiche globali migliori.*

(e): tempra unica da bassa temperatura 20÷30 °C sopra Ac_3 della superficie. *Si ottimizzano le caratteristiche dello strato cementato.* Cuore parzialmente non temprato.

TRATTAMENTI TERMICI POST- CEMENTAZIONE

TEMPRA DOPPIA, f

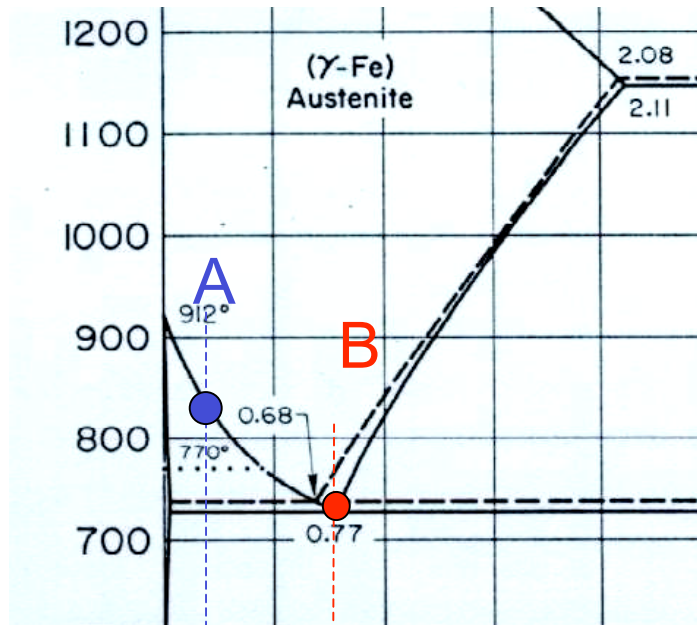


Prima tempra da alta temperatura: si rigenera il cuore ma si ha uno strato superficiale surriscaldato → a grano grosso.

Seconda tempra a temperatura più bassa: si ha affinamento dello strato cementato.

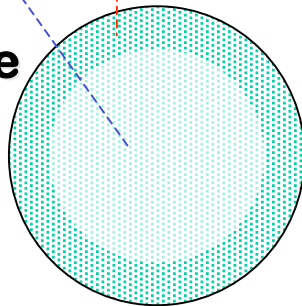
Ottimizzazione dei requisiti metallurgici sia in superficie che a cuore, ma talvolta deformazioni eccessive.

Limiti: costi molto elevati ⇒ pezzi il cui costo non è importante



%C della Superficie

%C del Cuore



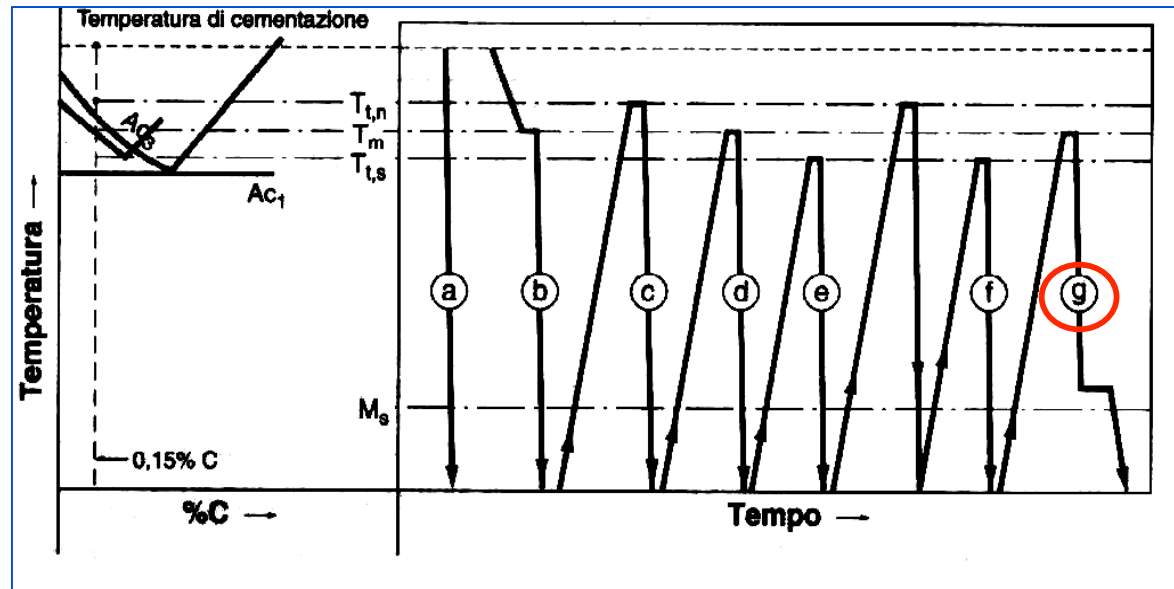
(A) Riscaldamento sopra Ac_3 del cuore e tempra in modo da avere struttura martensitica fine a cuore.
La T è però troppo elevata per la superficie, che quindi avrà struttura grossolana.

(B) Riscaldamento sopra Ac_3 della superficie e tempra in modo da avere struttura martensitica fine in superficie.

A cuore la martensite precedentemente formata si è rinvenuta ad una T in cui si ha austenite+ferrite, che nella tempra si trasformano in una struttura costituita da martensite in una matrice ferritica.

TRATTAMENTI TERMICI POST- CEMENTAZIONE

D. TEMPRA SCALARE (MARTEMPERING), g



Tempra scalare in bagni costituiti da olio, acqua e bagni di sale; in questo caso si opera il trattamento di martempering a circa 200 °C.

Risultati particolarmente favorevoli: riduce le tensioni interne, migliora la tenacità.

SCELTA DEI TRATTAMENTI POST-DIFFUSIONE

Più usata è **la tempra diretta**, con abbassamento della temperatura da quella di cementazione fino alla corretta temperatura di tempra.

Vantaggi: economici, minori deformazioni. Ottimale soprattutto per gli acciai a grano controllato.

Svantaggi: minor tenacità, maggior quantità di austenite residua.

La **tempra indiretta** conferisce all'acciaio una microstruttura più fine e permette il controllo e la distribuzione dei carburi nello strato cementato

TRATTAMENTI TERMICI POST-DIFFUSIONE

Dopo TEMPRA si effettua in genere un trattamento di DISTENSIONE e/o RINVENIMENTO :

- riscaldamento a $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C} \div 180\text{ }^{\circ}\text{C}$
- mantenimento per $t = 30' \div 2h$
- raffreddamento in aria

I trattamenti post-tempra servono ad attenuare la “tetragonalità” della martensite, ridurre le tensioni interne e conferire maggior tenacità allo strato cementato.

CEMENTAZIONE E RESISTENZA A FATICA

Il comportamento a fatica di organi cementati dipende dalle proprietà della superficie (soprattutto perché l'innesco avviene quasi sempre in superficie) ma anche dalle proprietà del cuore.

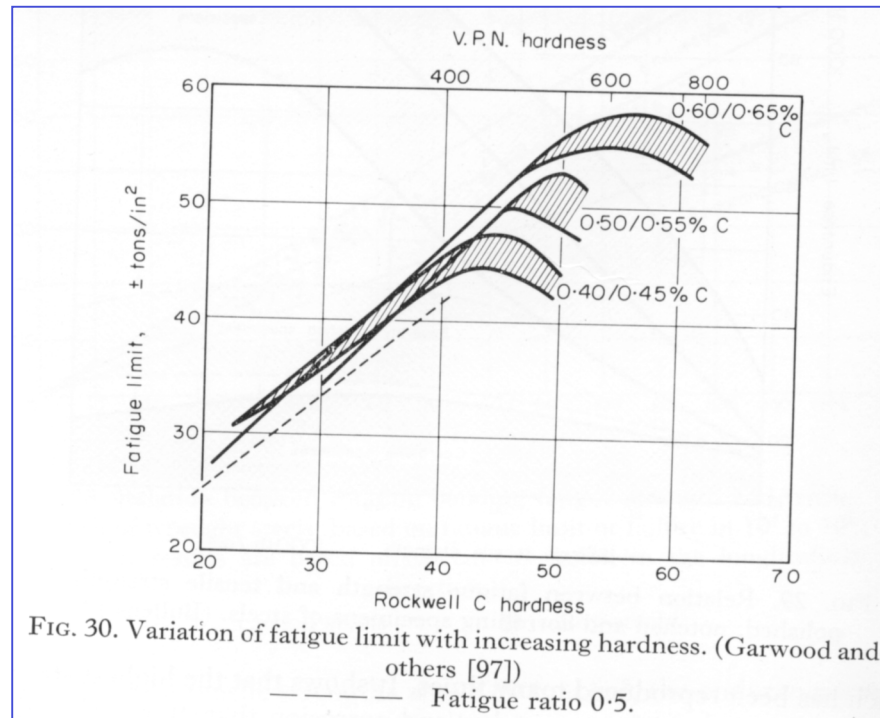
$$L_f \approx \frac{R_m}{2}$$

Leghe ferrose

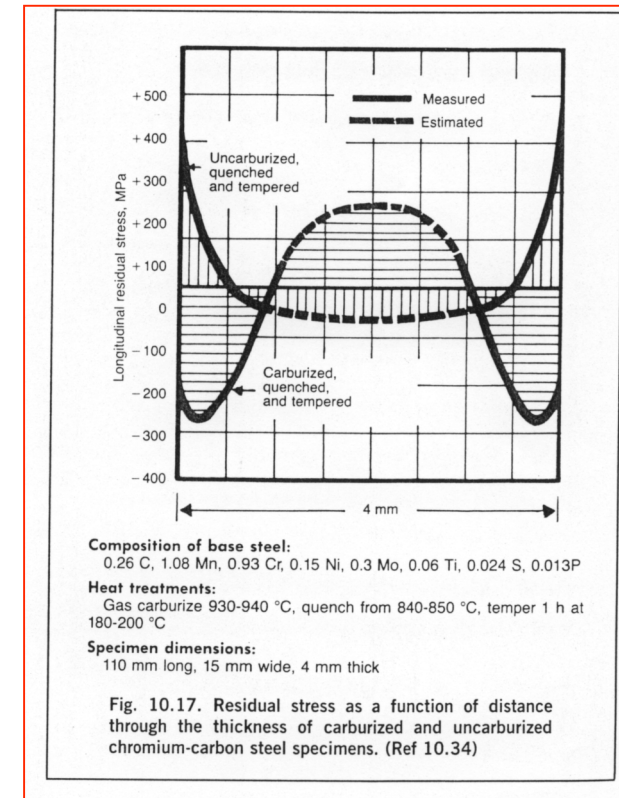
Tutti i fattori che aumentano R_m , in generale producono un miglioramento del comportamento a fatica
→ Meccanismi di rinforzo.

CEMENTAZIONE E RESISTENZA A FATICA

La cementazione induce un aumento della resistenza a fatica sia per la variazione di composizione chimica indotta, sia per lo stato tensionale residuo.

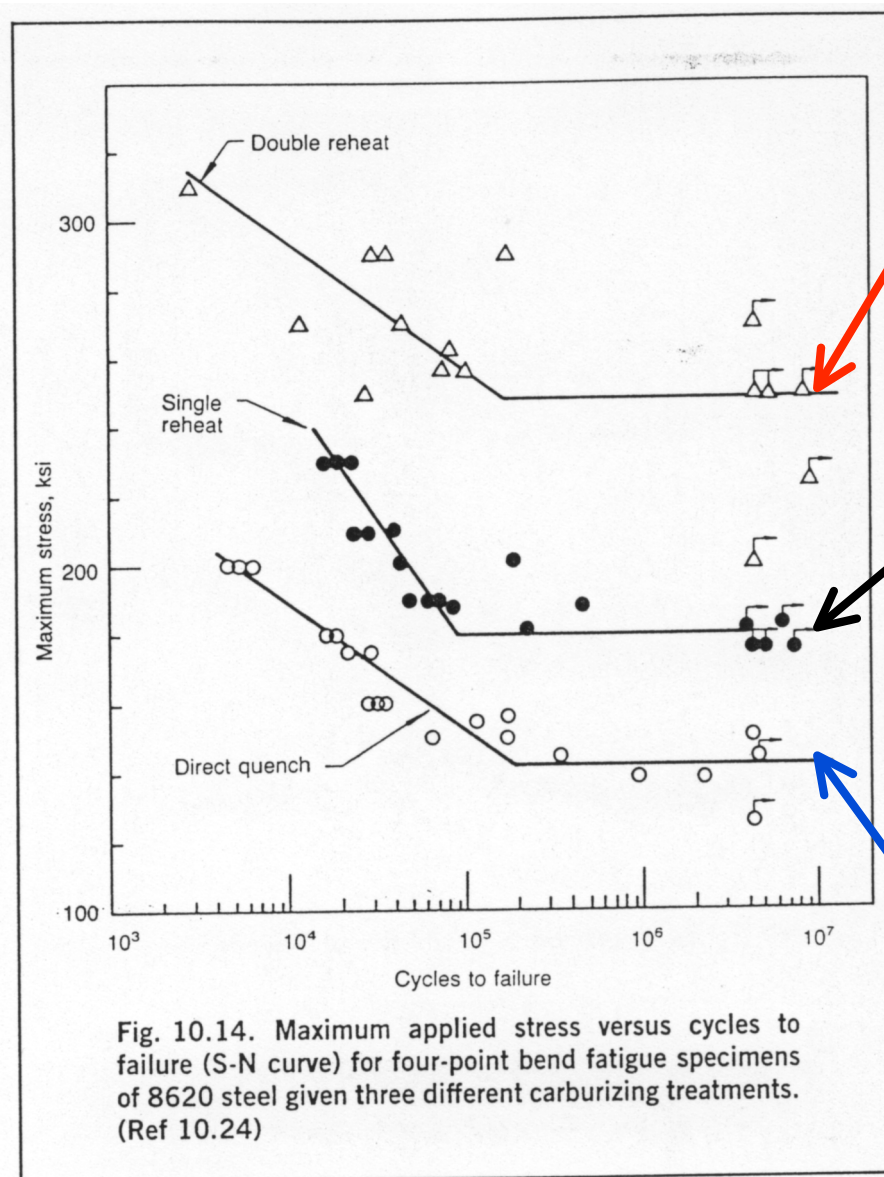


L'aumento di %C e durezza
aumenta il limite di fatica



La cementazione induce stati
tensionali residui di
compressione, che
migliorano il comportamento
a fatica.

EFFETTO DEL TRATTAMENTO TERMICO SULLA RESISTENZA A FATICA



Tempra doppia:
microstruttura più fine,
durezza superficiale più
elevata, minor densità di
microcricche.

Tempra indiretta:
(riaustenizzazione
+ tempra)

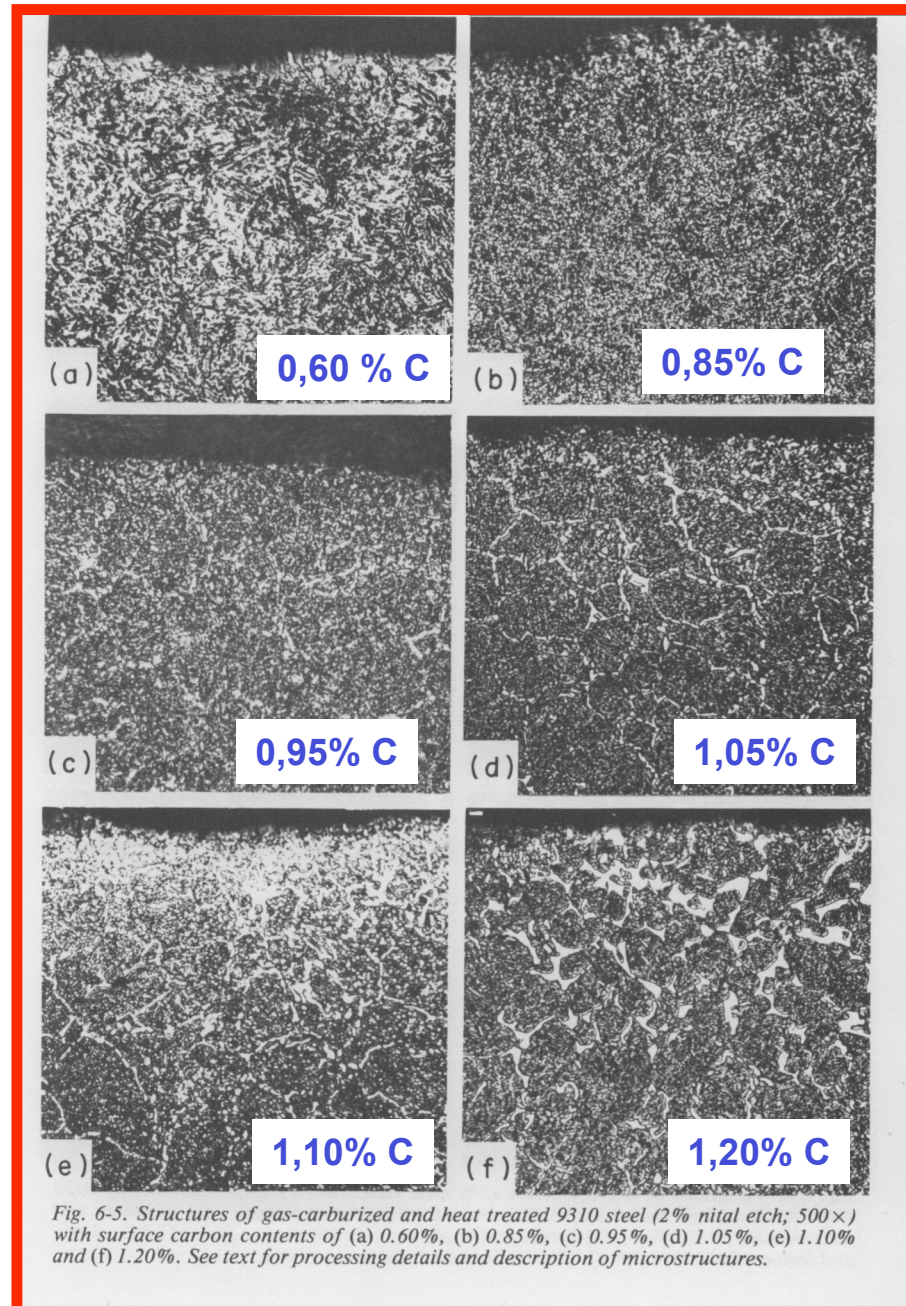
Tempra diretta:
struttura grossolana
ed elevata densità di
microcricche

MICROSTRUTTURE DI STRATI CARBOCEMENTATI

Acciaio bassolegato carburato (920 °C) per 4 h, raffreddato in forno, riscaldato a 815-830°C, temprato in olio e rinvenuto a 150 °C per 4 ore.

MICROSTRUTTURE IN FUNZIONE DEL TENORE SUPERFICIALE DI CARBONIO.

A percentuali di C elevate (1,05 ÷ 1,20 %), si osserva la formazione di un vero e proprio film di carburi intergranulari, la cui concentrazione decresce verso l'interno. Microstrutture tipo d, e, f sono indesiderate per eccessiva fragilità.



IPERCEMENTAZIONE

In caso di ipercementazione → **precipitazione di carburi o cementite libera** e/o presenza di **austenite residua**.



- Acciaio 20CrNi4 ipercementato e temprato.

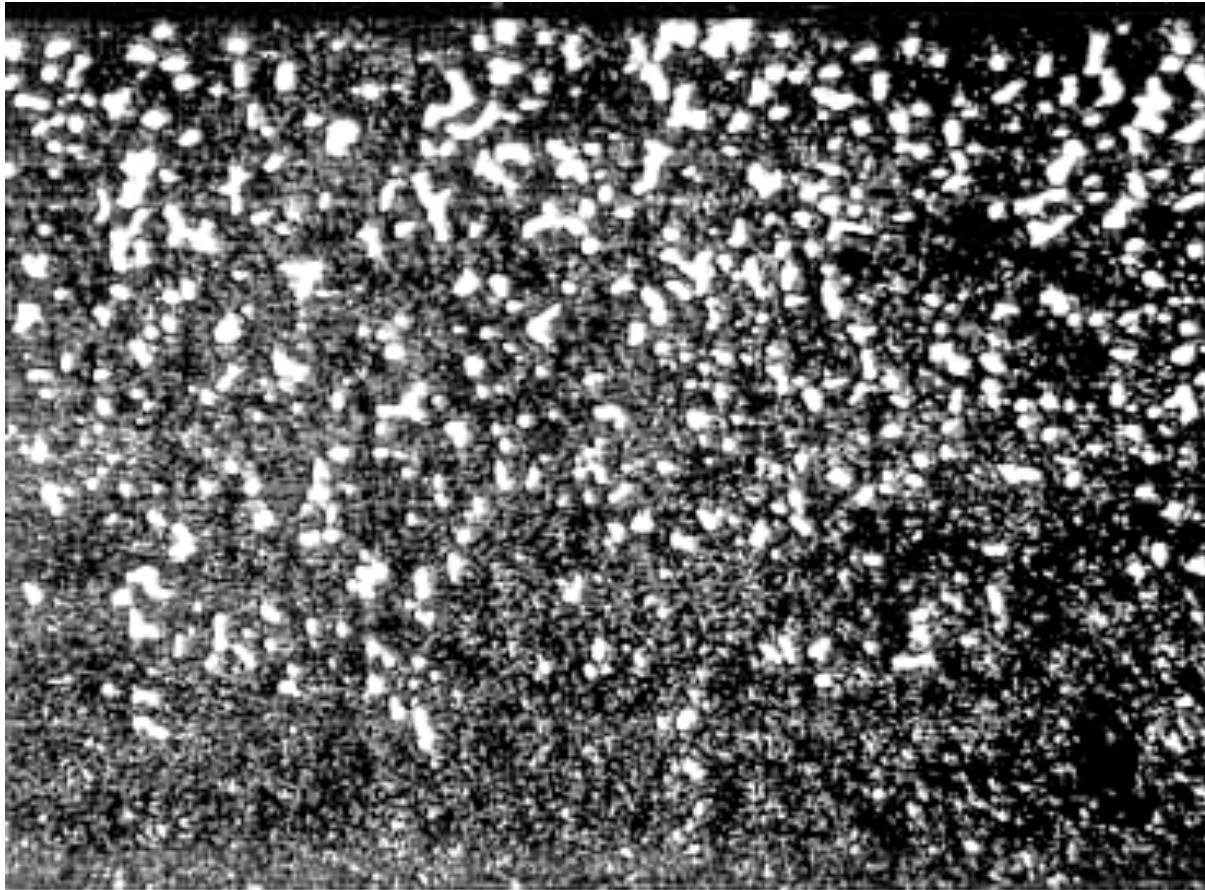
*Cementite intergranulare in matrice martensitica.
Attacco nital 2% - 500 x.*

La cementite è generalmente indesiderata se precipita in posizione intergranulare → **compromette tenacità e resistenza a fatica.**

L'austenite residua riduce la durezza → riduce la resistenza ad usura.

IPERCEMENTAZIONE

Solo in applicazioni particolari (es. acciai per cuscinetti) la cementite è richiesta perché aumenta la resistenza ad usura

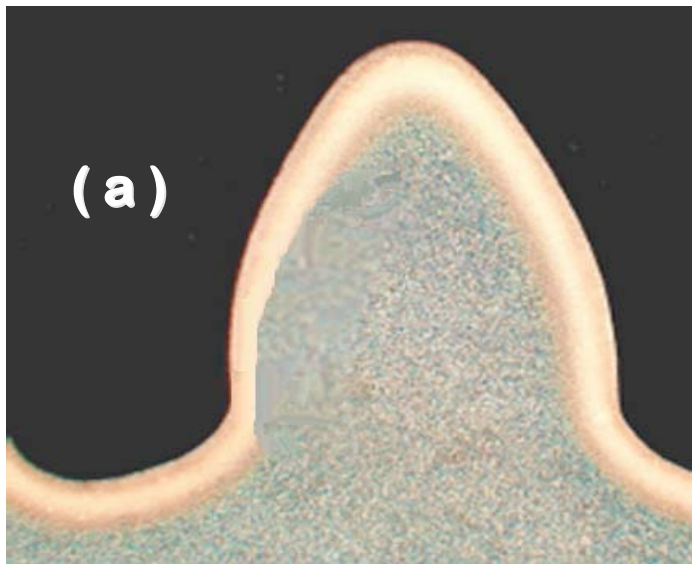


In questi casi si esegue volutamente un'ipercementazione. Quindi si effettua una ricottura sub-critica in modo da avere cementite globulare.

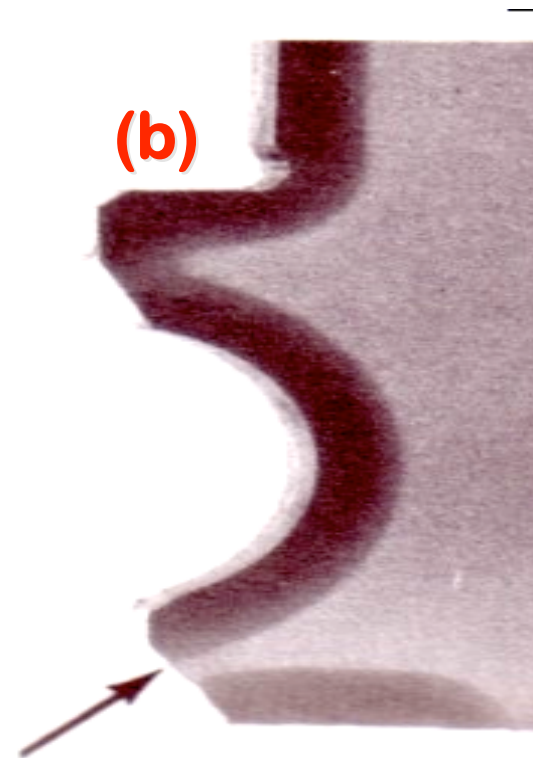
*- Acciaio 20NiCrMo2 ipercementato e temprato.
Cementite globulare uniformemente distribuita.
Attacco nital 2% - 200 x.*

UNIFORMITÀ DEGLI STRATI

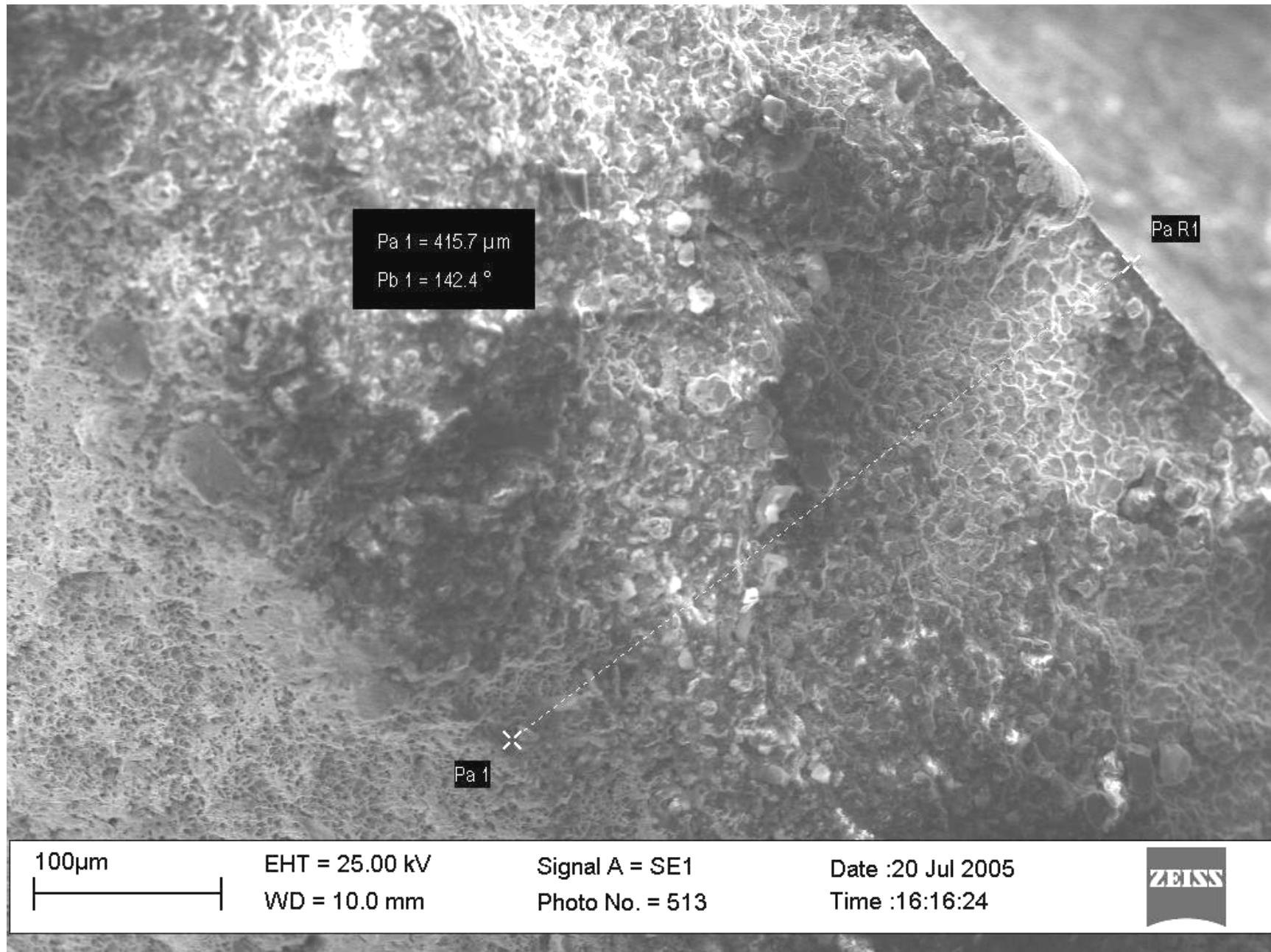
Osservando la macrostruttura è possibile valutare l'uniformità della carburazione ed anche possibile verificare l'efficacia di sistemi di protezione della superficie utilizzati per ottenere **carburazioni selettive**.



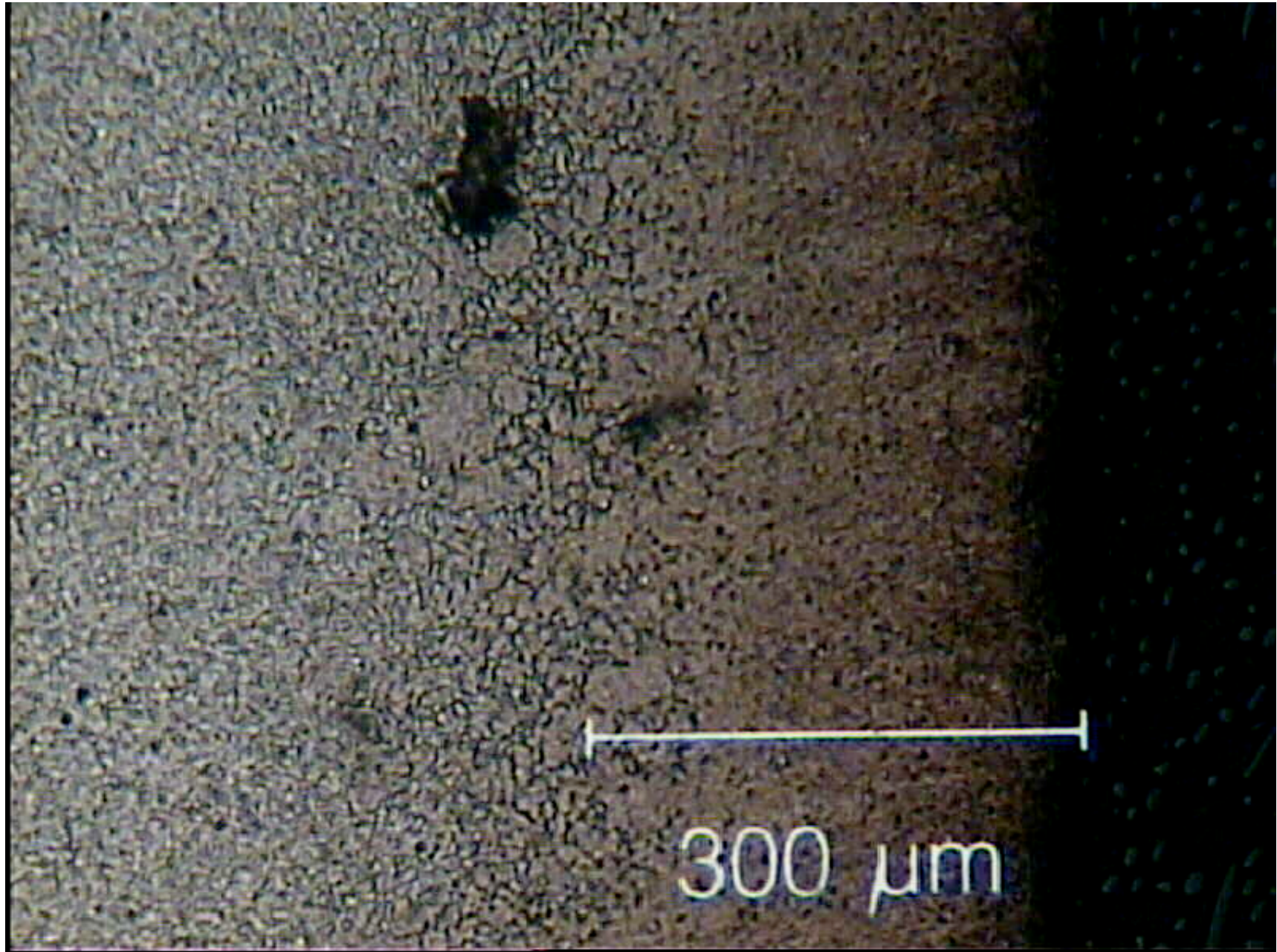
Strato carburato, esempi di: a) *non uniformità*; b) *carburazione selettiva*, la freccia indica un punto della superficie volutamente non carburato.



FRATTURA DI UNO STRATO CARBOCEMENTATO (SEM)



STRATO CARBOCEMENTATO



NITRURAZIONE

Trattamento termico di indurimento superficiale per diffusione di AZOTO su materiali ferrosi (ghise, acciai al C e legati) a temperature comprese tra **500 ÷ 570 °C** → in campo **ferritico**.

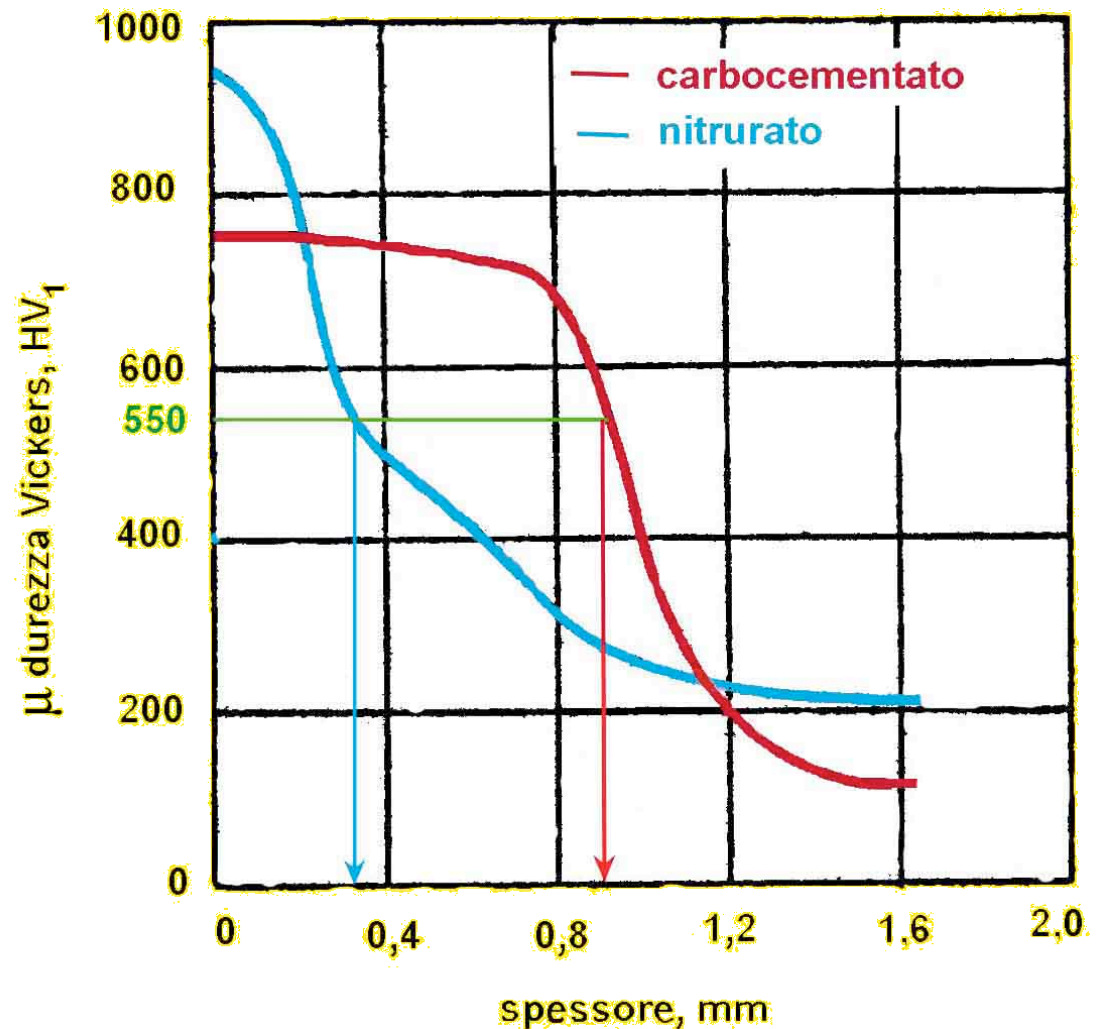
L'indurimento è dovuto alla formazione di nitruri molto duri di ferro e soprattutto di elementi di lega come **alluminio**, **cromo**, **vanadio**.

Per le basse temperature (500÷570 °C) ⇒ bassa velocità di diffusione ⇒ lunghi tempi di trattamento.

PROPRIETÀ DELLA NITRURAZIONE

- Durezza:
900÷1150 HV₁
fino a 1250 HV₁ con
iononitrurazione
- Spessori:
Da 0,1 a 0,75 mm

- ◆ Produce basse
distorsioni dei pezzi
(piccolo incremento di
volume < 5%).
- ◆ Scarso
ingrossamento dei
grani cristallini.



Confronto schematico durezza-
profondità in acciai cementati e
nitrurati.

COMPARAZIONE CICLI DI LAVORAZIONE

Carburazione e tempra

- Stampaggio o fucinatura
- Ricottura isoterma
- Lavorazione meccanica
- Carbocementazione o carbonitrurazione
- Tempra (1 o 2)
- Raddrizzatura (eventuale)
- Sgrassaggio
- Prova di durezza
- Rinvenimento di distensione
- Collaudo
- Sabbiatura
- Rettifica
- Montaggio

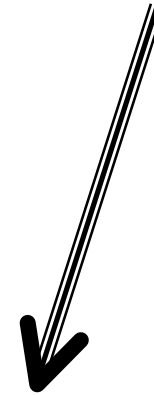
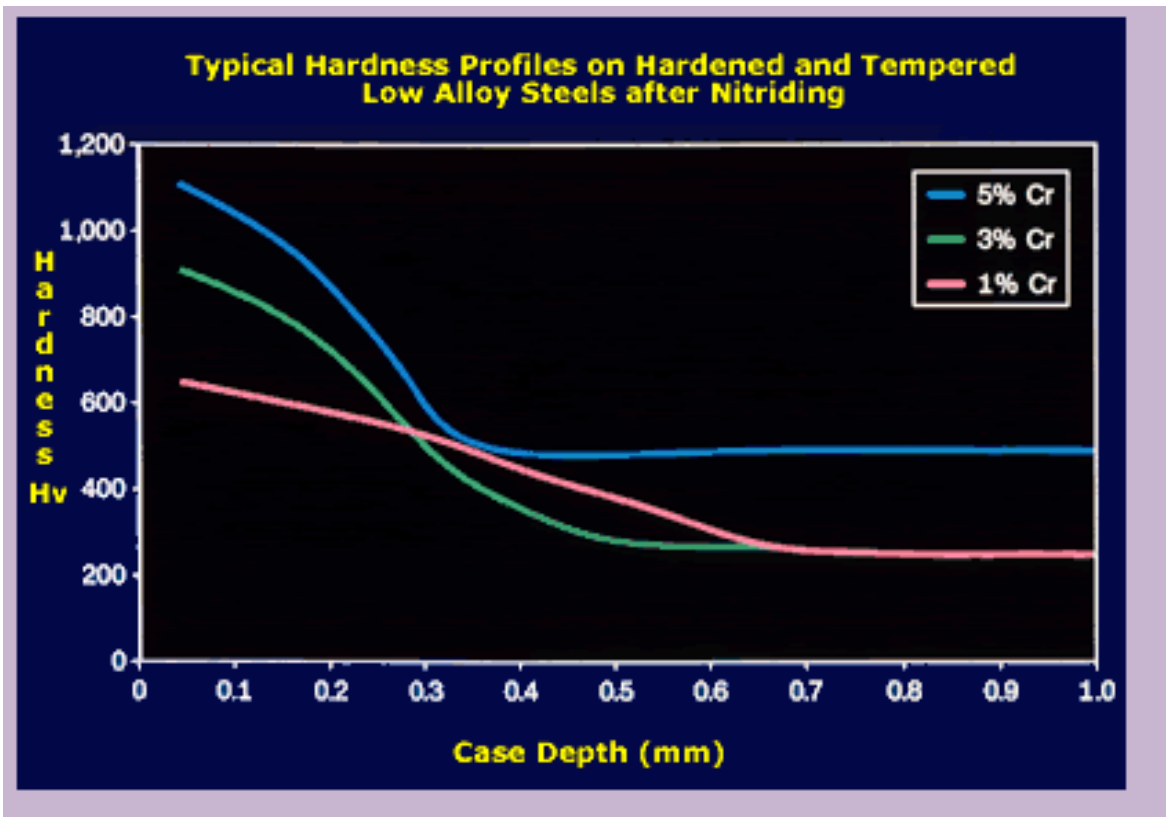
Nitrurazione

- Stampaggio o fucinatura
- Bonifica
- Lavorazione meccanica
- Distensione (eventuale)
- Nitrurazione
- Collaudo
- Montaggio

DESTINAZIONE DELLA NITRURAZIONE

Conferire ai pezzi un **alto incremento di durezza (fino a 1100-1200 HV)** e quindi **aumentarne la resistenza ad usura, e migliorare il comportamento a fatica**

La durezza viene mantenuta fino a T di circa 500 °C, a differenza di quanto avviene con gli strati cementati.



Eccellente resistenza ad usura anche in condizioni in cui si riscalda per attrito.

MECCANISMI DI RINFORZO NELLA NITRURAZIONE

- ✧ Per soluzione solida da parte degli atomi N che restano intrappolati negli interstizi della cella c.c.c. di Fe- α , dal momento che i pezzi nitrurati vengono di norma bruscamente raffreddati dalla T di nitrurazione
- ✧ Per precipitazione dei nitruri molto duri degli elementi di lega, come *alluminio*, cromo e vanadio.

Esigenza di acciai di
opportuna composizione,
contenenti gli elementi in
grado di formare i nitruri.

PROCEDIMENTI DI NITRURAZIONE

- ✧ **Nitrurazione gassosa**
- ✧ **Nitrurazione in bagno di sali o nitrurazione morbida (o nitrocarburazione)**
- ✧ **Nitrurazione assistita da plasma o iononitrurazione**

NITRURAZIONE GASSOSA

Avviene in flusso continuo di ammoniaca (NH_3) che, dissociandosi sulla superficie dell'acciaio cede azoto che quindi diffonde formando nitruri, di elevatissima durezza e composizione diversa a seconda dell'acciaio:

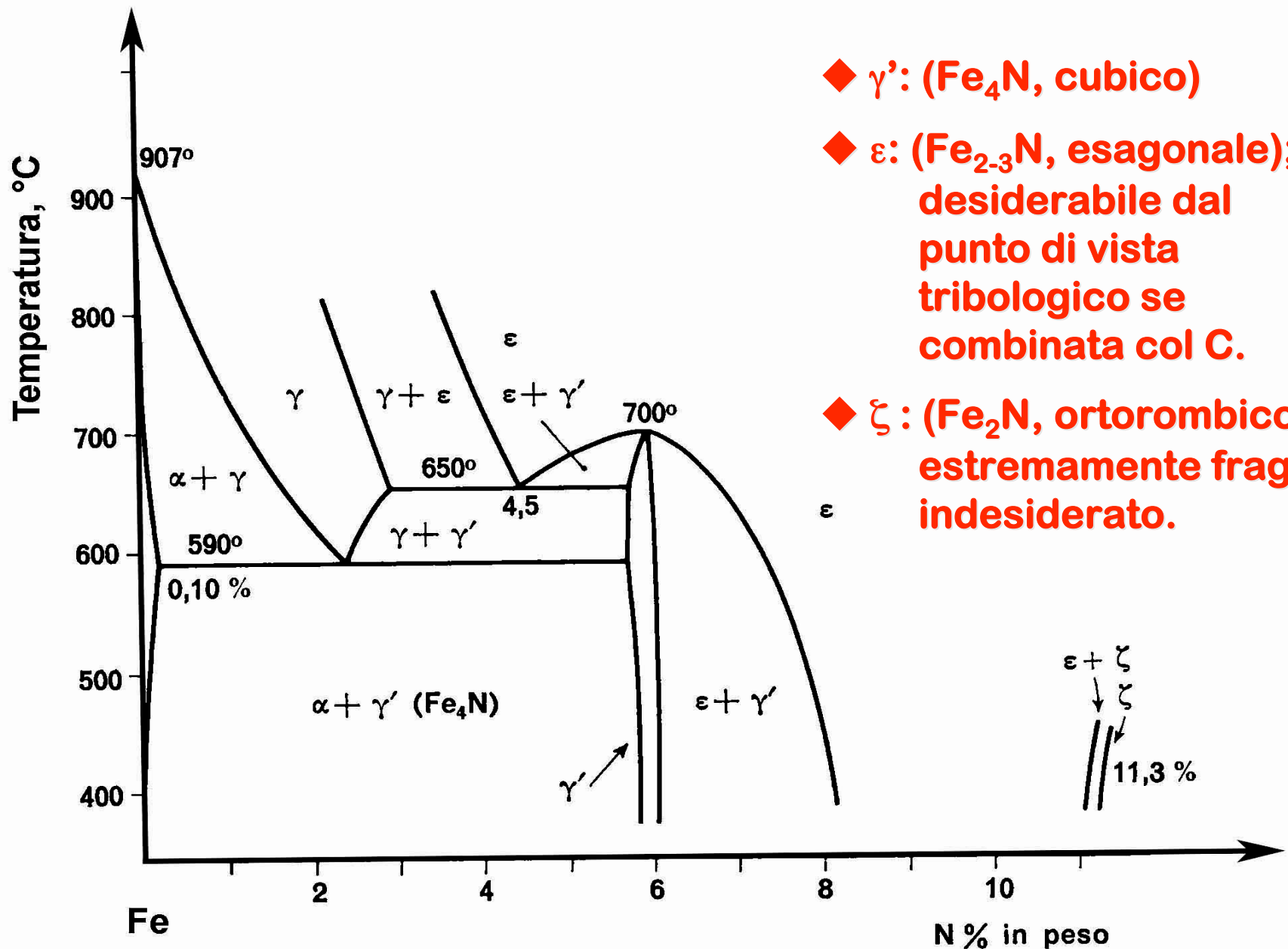


$T \sim 500 - 560$
 $^{\circ}\text{C}, t = 40 \div$
 100 h

Svantaggi:

- *tempi di diffusione molto lunghi*
- *necessità di acciai di particolare composizione*

DIAGRAMMA D'EQUILIBRIO Fe-N

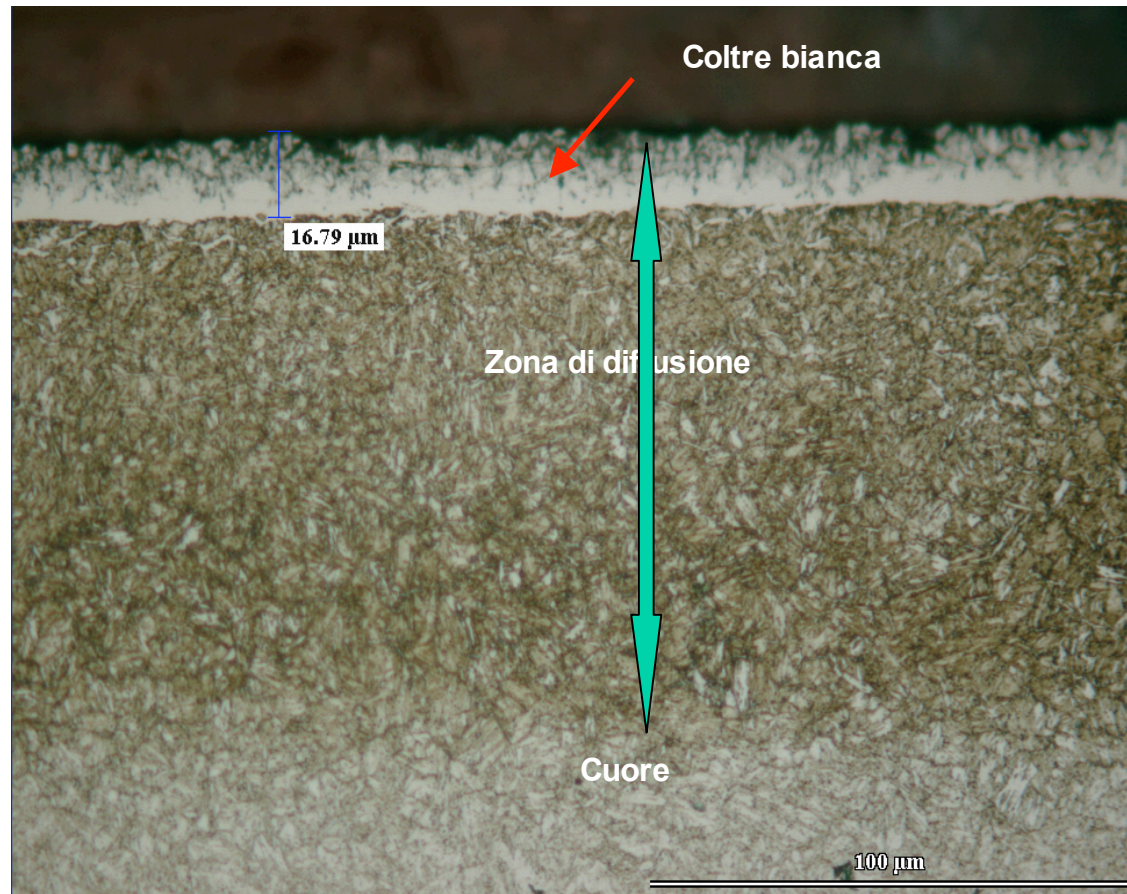


◆ γ' : (Fe₄N, cubico)

◆ ϵ : (Fe₂₋₃N, esagonale);
desiderabile dal
punto di vista
tribologico se
combinata col C.

◆ ζ : (Fe₂N, ortorombico)
estremamente fragile,
indesiderato.

MORFOLOGIA DI STRATI NITRURATI



Coltre bianca:
sottile (5-20 mm)
pellicola
superficiale di
nitruri di Fe
generalmente γ'
(Fe_4N) e ϵ (Fe_{2-3}N).

**Molto dura ma
fragile e
scarsamente
compatta.**

**La coltre bianca deve essere asportata mediante
rettifica delle superfici prima dell'uso, ma è più
vantaggioso evitarne la formazione**

ACCIAI DA NITRURAZIONE (legati con Cr, Al, Mo)

ACCIAI SPECIALI DA NITRURAZIONE UNIFICATI (TABELLA UNI 8077)

Gruppo	Designazione	Composizione chimica (%) (*)				Caratteristiche meccaniche			
		C	Cr	Mo	altri	R_{min} N/mm ²	$R_{p0.2}$ N/mm ²	A min %	KCU min J
Acciaio al Cr-Mo	31CrMo12	0,31	3,00	0,35	—	1080	880	10	24,5
Acciaio al Cr-mo-V	31CrMoV10	0,31	2,50	0,35	V = 0,15	1030	835	12	34,5
Acciai al Cr-Al-Mo	34CrAlMo7	0,34	1,65	0,32	Al = 1,10	785	590	14	24,5
	41CrAlMo7	0,41	1,65	0,32	Al = 1,00	930	735	12	22,5

(*) Inoltre per tutti i tipi: Mn = 0,0% ; Si ≤ 0,40% ; S ≤ 0,035% e P ≤ 0,030%.

CEMENTAZIONE MEDIANTE BORO → BORURAZIONE

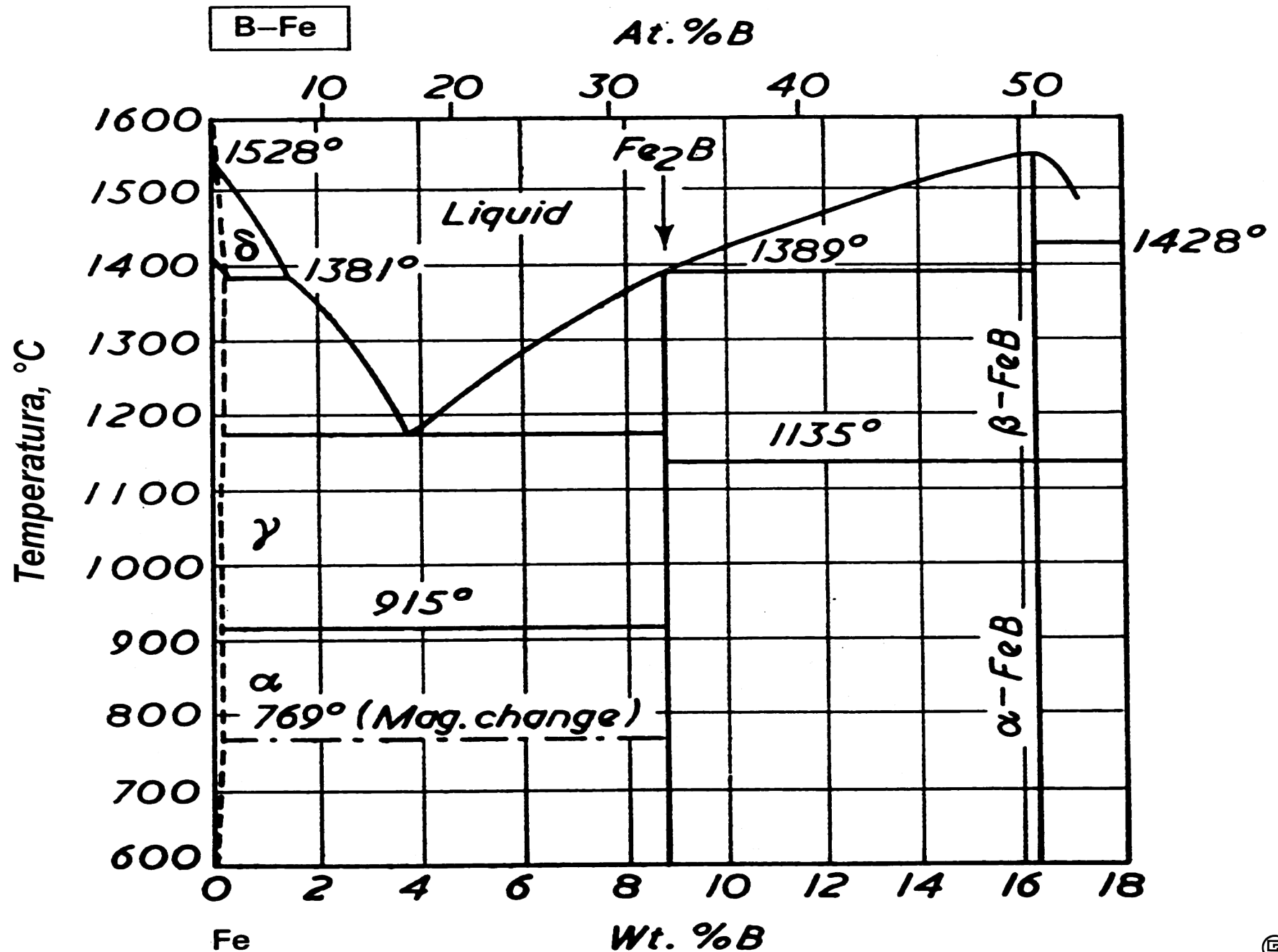
Mezzi di trattamento:

- *solido* ⇒ $B_4C + KBF_4 + SiC$
- *liquido , in sali fusi* ⇒ $Na_2B_4O_7^{(*)}$ (☠)
- *gassoso* ⇒ $B_4H_{10}^{(*)}$ (💣)

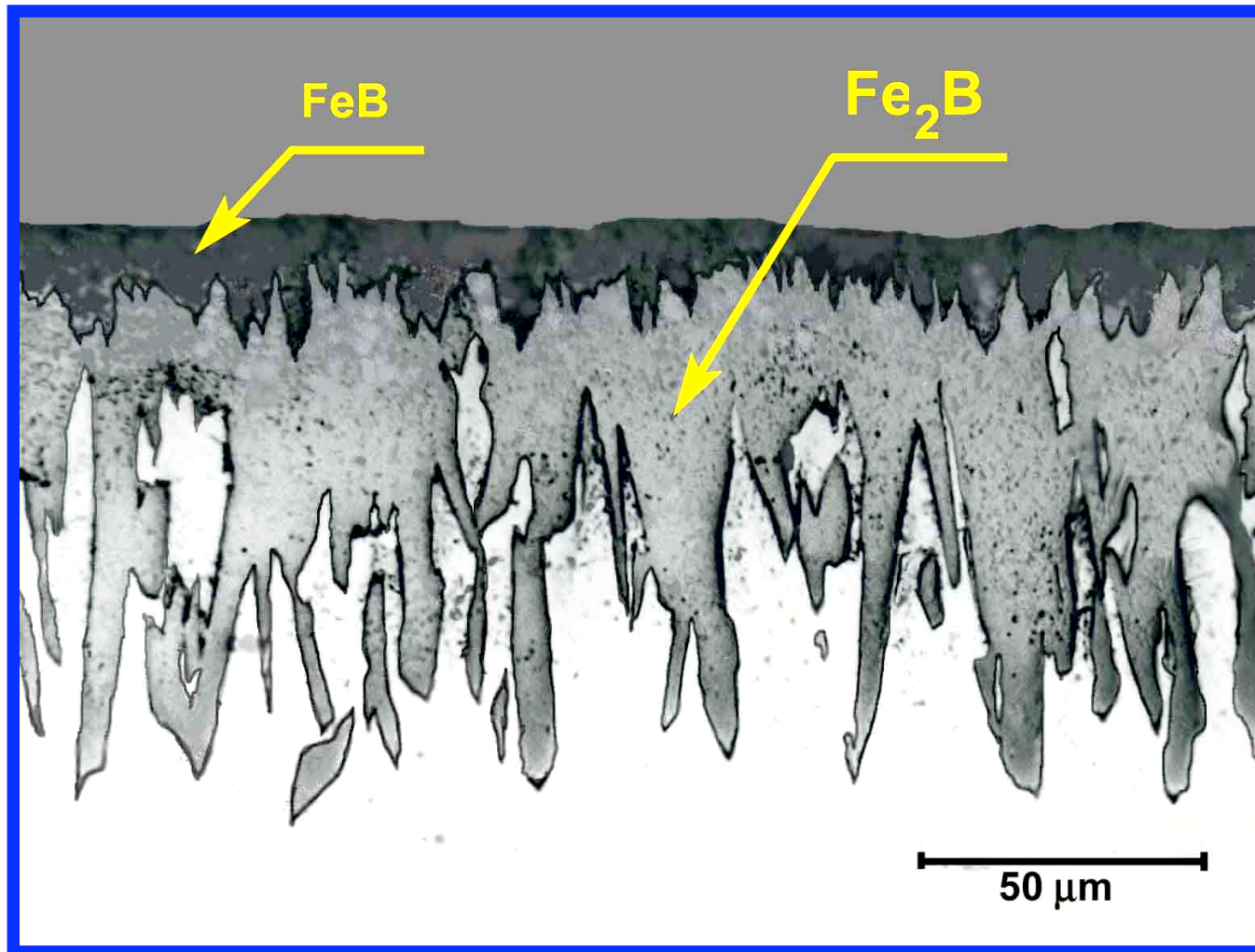
◆ Temperatura di trattamento $850^{\circ}\div 1100^{\circ}C$

(*) poco usati industrialmente per difficoltà di conduzione del trattamento

DIAGRAMMA D'EQUILIBRIO Fe-B



STRATI DI BORURI DI FERRO



Microdurezze $HV_{0,1}$

$\text{FeB} \Rightarrow 1800 \div 2000$

$\text{Fe}_2\text{B} \Rightarrow 1400 \div 1600$