

## Tabella sinottica AQM dei trattamenti termici

a cura di Cibaldi Dr. Cesare - Consulente Metallurgico Senior di AQM srl

N°	Trattamento termico	Scopo	Metalli e leghe	Ciclo termico caratteristico	Note
<b>Trattamenti termici fondamentali o massivi convenzionali preliminari</b>					
1	Ricottura subcritica o di lavorabilità	Riduce la durezza del metallo o lega per favorire la lavorabilità alle macchine utensili per asportazione di truciolo.	Acciai allo stato grezzo di formatura a caldo (laminazione, fucinatura, stampaggio).	Riscaldamento a temperatura 30-70°C sotto AC <sub>1</sub> per 1 ora circa in temperatura dell'intera massa. Raffreddamento in aria calma.	<u>Attenzione!</u> Per alcuni acciai a basso contenuto di carbonio contenenti nichel e con grosse placche di ferrite questo TT riduce le lavorabilità per formazione del tagliente di riporto.
2	Ricottura globulare subcritica	Globulizza la perlite lamellare conferendo una struttura ferritico-perlitica.	Acciai ipoeutetoidici o eutetoidici.	Riscaldamento a temperatura compresa tra AC <sub>1</sub> e 10°C sotto AC <sub>1</sub> per 12÷120 ore. Raffreddamento in aria calma	Per ottenere una struttura perlitica globulare omogenea bisogna austenitizzare l'acciaio (temperatura 30÷50°C > AC <sub>3</sub> , temprare e poi eseguire una ricottura subcritica.
3	Ricottura globulare pendolare	Globulizza la perlite lamellare conferendo una struttura perlitica globulare omogenea.	Acciai ipereutetoidici.	Riscaldamento a temperatura compresa tra AC <sub>1</sub> e 10°C sopra AC <sub>1</sub> per 2 ore; poi tra AC <sub>1</sub> e 10°C sotto AC <sub>1</sub> per 2 ore; ripetere il tutto ancora una volta e poi raffreddare in aria calma	<u>Attenzione!</u> L'ultima fase del ciclo deve durare almeno 2 ore a temperatura compresa tra AC <sub>1</sub> e 10°C sotto AC <sub>1</sub> .
4	Ricottura completa	Adolcire l'acciaio attraverso un'adeguata ricristallizzazione (Salita e discesa) e conferire una struttura granulare omogenea all'acciaio	Acciai ipoeutetoidici e eutetoidici.	Riscaldamento a temperatura di 10÷30°C sopra AC <sub>3</sub> e mantenimento per S/2 + 20 minuti, con S = spessore massimo o Ø del pezzo e raffreddamento molto lento in forno.	La ricottura completa è molto lunga e costosa. Di fatto è stata completamente sostituita dalla ricottura isoterma normale.
5	Ricottura di distensione	Ridurre le sollecitazioni elastiche residue (tensioni e/o compressioni) presenti nel pezzo.	Ogni tipo d'acciaio, metallo o lega.	Riscaldamento alla temperatura che conferisca al metallo un limite di snervamento a caldo pari al valore massimo della sollecitazione residua accettabile, per un tempo sufficiente per scaldare l'intera massa, seguito da raffreddamento molto lento.	Il rilascio ed azzeramento delle sollecitazioni di trazione (tensioni) è immediato e avviene non appena il metallo raggiunge la temperatura che parifica il limite di snervamento alla sollecitazione da scaricare. L'eliminazione delle tensioni si può ottenere anche a temperatura ambiente con la vibrazione (tecnica VSR – Vibration Stress Reliving), ad una frequenza multipla o sottomultipla di quella di risonanza del pezzo.
6	Ricottura di ricristallizzazione	Ripristinare la struttura cristallina del metallo, distrutta con la deformazione plastica a freddo e recuperare la duttilità (riserva plastica).	Ogni tipo d'acciaio, metallo o lega.	Riscaldare alla temperatura e per un tempo sufficiente per ottenere il totale recupero della struttura cristallina senza far ingrossare il grano.	<u>Attenzione!</u> Per gli acciai incruditi tra l'8 e il 15% (pari riduzione della sezione nella trafilatura e dello spessore nella laminazione a freddo), il grano ricristallizzato può ingrossarsi e aggraveramente.

7	Ricottura d'omogeneizzazione	Rendere omogenea la composizione chimica dei singoli grani, eterogenea a fine solidificazione per il fenomeno della microsegregazione.	Leghe leggere, leghe di rame.	Riscaldare ad alta temperatura ( $30\pm 50^{\circ}\text{C}$ sotto il solidus) per tempi relativamente lunghi, sfruttando l'auto diffusione degli atomi.	<u>Attenzione!</u> Negli acciai gli unici elementi che possono diffondere in tempi industrialmente ragionevoli sono gli interstiziali (C, N, B, ecc.). Gli altri elementi non diffondono e quindi questa ricottura non è utile per gli acciai.
8	Normalizzazione	Ricristallizzare due volte l'acciaio per ottenere strutture ferritico-perlitiche omogenee con grano fine in tutta la massa del pezzo per migliorarne la lavorabilità alle macchine utensili e predisporlo ai successivi trattamenti termici. Conferire agli acciai al carbonio caratteristiche meccaniche sufficienti per molti impegni, migliorando il limite di snervamento a parità di resistenza a trazione (Rapporto $R_{p0,2}/R_m = 0,60\pm 0,75$ )	Acciai ipoeutetoidici ed eutetoidici. Negli acciai al carbonio può essere un TT finale.	Riscaldamento a temperatura di $20\pm 50^{\circ}\text{C}$ sopra $AC_3$ e mantenimento per $S/2 + 20$ minuti, con $S =$ spessore massimo o $\varnothing$ del pezzo e raffreddamento in aria calma.	<u>Attenzione!</u> Gli acciai ipereutetoidici non possono essere normalizzati perché se riscaldati sopra $A_{cm}$ al raffreddamento darebbero un reticolo continuo di cementite o carburi al bordo del grano già austenitico che renderebbe l'acciaio fragile ed inutilizzabile. Gli acciai legati non sono usati allo stato normalizzato, perché se ne sfruttano le caratteristiche meccaniche elevate ottenibili con la bonifica (tempra martensitica seguita da rinvenimento d'addolcimento. Sarebbe uno spreco usarli allo stato normalizzato con caratteristiche medio basse visto il loro maggior costo.
9	Tempra di solubilizzazione	Migliorare la resistenza alla corrosione degli acciai inossidabili mandando in soluzione i carburi e le seconde fasi (p.e.: fase sigma). Mandare in soluzione i composti intermetallici nelle altre leghe. Addolcire gli acciai e le varie leghe.  Predisporre le leghe indurenti per precipitazione all'invecchiamento, dopo il quale s'ottiene un sensibile incremento delle caratteristiche meccaniche senza apprezzabile diminuzione della tenacità.	Acciai inossidabili austenitici, ferritici, duplex ed indurenti per precipitazione. Acciai maraging. Alluminio e rame e loro leghe bonificabili. Leghe di nichel e di altri metalli.  Acciai inossidabili indurenti per precipitazione (tipo PH) e ogni altra lega (Al, Cu, Ni, ecc.) indurente per precipitazione.	Riscaldamento a temperatura di $10\pm 30^{\circ}\text{C}$ superiore a quella di solubilizzazione dei carburi e/o delle seconde fasi mantenendo quanto basta per ottenere la loro completa solubilizzazione. Raffreddamento fino a temperatura ambiente con velocità superiore a quella critica di precipitazione dei carburi e/o delle seconde fasi.	Le leghe correttamente solubilizzate sono più tenere che allo stato ricotto e sono meglio lavorabili alle macchine utensili e formabili a freddo.  Tutte le leghe indurenti per precipitazione allo stato solubilizzato sono più tenere che allo stato ricotto.

10	Tempra martensitica diretta	Ottenere quanta più martensite tetragonale possibile evitando trasformazioni dell'austenite con diffusione del carbonio (ferrite, perlite, troostite, bainite superiore).	Acciai da costruzione soggetti al trattamento di bonifica o di tempra e rinvenimento di distensione.	Riscaldamento a temperatura di 20÷40°C sopra AC <sub>3</sub> (o tra AC <sub>1</sub> e AC <sub>m</sub> per gli acciai ipereutetoidici) e mantenimento per S/2 + 20 minuti, con S = spessore massimo o Ø del pezzo e spegnimento in mezzo di sufficiente drasticità in rapporto alla temprabilità dell'acciaio e alla massa del pezzo.	<u>Attenzione!</u> La tempra diretta dalla temperatura di carbocementazione (900÷950°C) può generare uno shock termico eccessivo, con elevato rischio di rotture o deformazioni dei pezzi. Si consiglia di ridurre la temperatura a 830÷850°C prima di temprare i pezzi.
11	Tempra martensitica scalare	Ottenere quanta più martensite tetragonale possibile evitando trasformazioni dell'austenite con diffusione del carbonio (ferrite, perlite, troostite, bainite superiore), mitigando lo shock termico della tempra diretta.	Pezzi di grosso spessore o Ø (≥ 70 mm) d'acciai da costruzione soggetti al trattamento di bonifica o di tempra e rinvenimento di distensione. Acciai da utensili	Riscaldamento a temperatura di 20÷40°C sopra AC <sub>3</sub> (o tra AC <sub>1</sub> e AC <sub>m</sub> per gli acciai ipereutetoidici) e mantenimento per S/2 + 20 minuti, con S = spessore massimo o Ø del pezzo. Spegnimento in bagno di sale a temperatura di 10-100°C sopra Ms. Mantenimento quanto basta per uniformare la temperatura superficie-cuore; estrarre e raffreddare in aria calma fino a temperatura ambiente.	La tempra scalare attenua molto il rischio di deformazioni e rotture di pezzi di grosse dimensioni o di geometrie complicate con forti variazioni di spessore o diametro.
12	Rinvenimento di distensione	Trasformare la martensite tetragonale, dura e fragile, ottenuta con la tempra, in martensite cubica (ferrite + ZGP, Zone di Guinier Preston) altrettanto dura ma tenace.	Si esegue su pezzi d'acciaio temprati martensiticamente o carbocementati o carbonitrurati e temprati, subito dopo la tempra.	Riscaldamento tra 150 e 200°C per 2÷4 ore intertemperatura dell'intera massa.	<u>Attenzione!</u> La temperatura ottimale del rinvenimento di distensione è quella che conferisce la massima resilienza all'acciaio nell'intervallo 150÷250°C (vedere il diagramma di rinvenimento).
13	Rinvenimento d'addolcimento	Trasformare la martensite tetragonale dura e fragile, ottenuta con la tempra, in sorbite (ferrite + carburi finissimi, dispersi omogeneamente nella matrice) che conferisce all'acciaio il migliore compromesso tra caratteristiche tensili, riserva plastica e tenacità.	Si esegue su pezzi d'acciaio temprati martensiticamente destinati al trattamento termico di bonifica.	Riscaldamento tra 550 e 650°C per 2÷4 ore intertemperatura dell'intera massa.	<u>Attenzione!</u> Alcuni acciai sono sensibili all'ingrossamento da rinvenimento o malattia di Krupp se riscaldati nell'intervallo tra 450°C e 550°C o se raffreddati lentamente in questo intervallo da più alta temperatura. L'antesignano di questo fenomeno è il 35MnCr5, che dopo rinvenimento d'addolcimento a 600°C deve essere raffreddato in olio se si desidera mantenere elevata la resilienza.
14	Invecchiamento	Formare quante più ZGP possibile nelle leghe indurenti per precipitazione correttamente solubilizzate (tempra di solubilizzazione) per indurre il materiale senza significativo calo della tenacità.	Acciai inossidabili indurenti per precipitazione; acciai maraging. Leghe di Al, Cu e Ni indurenti per precipitazione o bonificabili.	Riscaldamento per 1÷16 ore alla temperatura più appropriata per la specifica lega: 150÷190°C per le leghe d'Al; 450÷750°C per gli acciai e leghe di Ni; 260÷425°C per leghe di rame.	L'invecchiamento produce più ZGP e più fini se condotto alla minore temperatura consigliata per tempi talvolta assai più lunghi. In queste condizioni si ottiene la massima durezza abbinata alla migliore tenacità possibile.

15	Bonifica	Si definisce bonifica l'insieme: <ul style="list-style-type: none"> <li>• tempra martensitica seguita da rinvenimento d'addolcimento;</li> <li>• della tempra di solubilizzazione seguita da invecchiamento (vedisopra).</li> </ul>	Acciai da bonifica, per molle, da nitrurazione, datempra superficiale e resistenti al creep. Leghe indurenti per precipitazione.	Vedi tempra martensitica + rinvenimento d'addolcimento.  Vedi tempra di solubilizzazione + invecchiamento.	\
16	Ricottura globulare	Globulizza la perlite lamellare conferendo una struttura perlitica globulare omogenea in tempi relativamente brevi, rendendo l'acciaio il più dolce e duttile possibile.	Acciai ipoeutettoïdici, eutettoïdici e ipereutettoïdici.	Austenitizzazione a 20÷40°C sopra AC <sub>3</sub> , per gli acciai ipoeutettoïdici e tra AC <sub>1</sub> e AC <sub>m</sub> , per gli ipereutettoïdici, per 20 + S/2 minuti (S = spessore o Ø del pezzo). Raffreddamento rapido fino alla temperatura tra AC <sub>1</sub> e 10°C sotto AC <sub>1</sub> per 2÷4 ore, poi raffreddamento anche lento fino a temperatura ambiente.	Quando non si conosce esattamente la temperatura AC <sub>1</sub> dell'acciaio si può operare come segue: Dopo austenitizzazione raffreddare rapidamente a circa 30°C sopra la presunta temperatura AC <sub>1</sub> , anche calcolata teoricamente. Attendere 2 ore e poi scendere di 10°C. Ripetere per altre 5 volte fino ad arrivare ad una temperatura sotto 30°C sotto la presunta temperatura AC <sub>1</sub> ed attendere le solite 2 ore. Almeno in un caso si sarà raggiunta la condizione di globulizzazione: almeno 2 ore tra AC <sub>1</sub> e 10°C sotto AC <sub>1</sub> .
17	Ricottura normale	Conferisce una struttura ferritica perlitica omogenea agli acciai ipoeutettoïdici e eutettoïdici.	Acciai ipoeutettoïdici e eutettoïdici	Austenitizzazione a 20÷40°C sopra AC <sub>3</sub> , per gli acciai ipoeutettoïdici e AC <sub>1</sub> e AC <sub>m</sub> , per gli eutettoïdici, per 20 + S/2 minuti (S = spessore o Ø del pezzo). Raffreddamento rapido a 600÷680°C e mantenimento quanto basta per la completa trasformazione isoterma dell'austenite (vedi diagrammi TTT) e poi raffreddamento anche lento fino a temperatura ambiente.	Non si usa per gli acciai ipereutettoïdici perché è sempre richiesta la ricottura globulare.
18	Ricottura bianco e nero	Conferisce all'acciaio una struttura a grano ingrossato con grossi blocchi di ferrite e di perlite, che dovrebbero conferire una migliore lavorabilità alle macchine utensili.	Acciai ipoeutettoïdici con medio basso contenuto di carbonio.	Austenitizzazione a 1000÷1100°C per ingrossare molto il grano austenitico. Raffreddamento rapido a 600÷680°C e mantenimento quanto basta per la completa trasformazione isoterma dell'austenite (vedi diagrammi TTT) e poi raffreddamento anche lento fino a temperatura ambiente.	Dopo questo trattamento e le lavorazioni meccaniche di sgrossatura e semi finitura i pezzi devono essere normalizzati per ripristinare una struttura a grano fine, indispensabile per i successivi trattamenti termici finali. Poiché il miglioramento della lavorabilità non è sempre conseguito, il maggior costo della normalizzazione spesso non giustifica la scelta della ricottura bianco e nero, che di fatto è stata quasi totalmente abbandonata.

19	Patentamento	Conferire agli acciai al carbonio eutetoidici e ipereutetoidici una struttura di troostite pura, di altissima duttilità, sebbene già dura, capace d'incrudirsi moltissimo durante successivi passaggi di trafilatura, ed ottenere i fili armonici concui sono costruite le funi.	Acciai al carbonio eutetoidici (C80) e ipereutetoidici (fino al C140).	Austenitizzazione a 780÷830°C per 20 + S/2 minuti (S = Ø della vergella laminata a caldo).Raffreddamento un bagno di sale alla temperatura del naso perlitico (vedi diagramma TTT), per la durata necessaria alla completa trasformazione dell'austenite (1÷2 minuti), poi raffreddamento anche lento fino a temperatura ambiente.	In questo stato si possono trafilare vergella Ø 12 mm a fili Ø 3 mm e vergella Ø 5,5 mm a fili Ø 0,75 mm (fili da chitarra) senza ricotture intermedie, con resistenze a trazione Rm rispettivamente di 1600 e 3600 MPa, detti appunto fili armonici, usati soprattutto per la costruzione di trefoli, funi e cavi.
<b>Trattamenti isotermici finali</b>					
20	Tempra bainitica o austempering	Conferire una struttura bainitica inferiore agli acciai che possiedono un diagramma TTT sufficientemente spostato a destra e la massima durezza e resistenza a trazioneabbinate alla massima resilienza: caratteristiche, non raggiungibili con qualsiasi altro trattamento termico od operazione meccanica.	Acciai ipoeutetoidici legati.	Riscaldamento a temperatura di 20÷40°C sopra AC3 e mantenimento per S/2 + 20 minuti, con S = spessore massimo o Ø del pezzo. Spegnimento in bagno di sale a temperatura di 10-100°C sopra Ms. Mantenimento fino a completa trasformazione bainitica (vedi diagramma TTT) e raffreddamento anche lento fino a temperatura ambiente	Il limite di questo trattamento termico è la dimensione dei pezzi, che non possono avere Ø> 18÷20 mm. Infatti non sarebbe possibile raffreddare con sufficiente rapidità per scapolare le trasformazioni a temperature superiori ottenendo strutture miste meno dure e anche fragili.
<b>Trattamenti termici superficiali</b>					
21	Tempra martensitica ad induzione	Indurire uno strato superficiale di opportuno spessore di una parte del pezzo trattato, per aumentarne la resistenza all'usura, al pitting e alla fatica.	Acciai da bonifica destinati alla tempra superficiale. In casi particolari anche alcuni acciai da utensili.	Riscaldamento rapido tramite induzione della superficie desiderata, per austenitizzare uno strato d'opportuno spessore a temperatura di 50÷100°C maggiore di quella per la tempra martensitica. Raffreddamento rapido con acqua, olio o fluidi sintetico per ottenere martensite tetragonale. Rinvenimento di distensione a 150÷200°C per almeno 2 ore.	Per ottenere i migliori risultati, gli acciai devono essere bonificati e poi temprati superficialmente, per favorire l'austenitizzazione della tempra superficiale. <u>Attenzione!</u> Se non richiesto all'ordine, il rinvenimento di distensione non è di solito eseguito, perché si crede erroneamente che non sia necessario, ma è indispensabile per trasformare la martensite tetragonale in cubica.
22	Tempra martensitica alla fiamma o fiammatura	Indurire uno strato superficiale di opportuno spessore di una parte del pezzo trattato, per aumentarne la resistenza all'usura, al pitting e alla fatica.	Acciai da bonifica destinati alla tempra superficiale.	Riscaldamento rapido tramite fiamma ossiacetilena della superficie desiderata, per austenitizzare uno strato d'opportuno spessore a temperatura di 50÷100°C maggiore di quella per la tempra martensitica. Raffreddamento rapido con acqua, olio o fluidi sintetico per ottenere martensite tetragonale. Rinvenimento di distensione a 150÷200°C per almeno 2 ore.	Per ottenere i migliori risultati, gli acciai devono essere bonificati e poi temprati superficialmente, per favorire l'austenitizzazione della tempra superficiale. <u>Attenzione!</u> Il rinvenimento di distensione dopo la tempra alla fiamma è indispensabile.

23	Tempra martensitica Laser	Indurire uno strato superficiale di opportuno spessore di una parte del pezzo trattato, per aumentarne la resistenza all'usura, al pitting e alla fatica.	Acciai da bonifica destinati alla tempra superficiale. In casi particolari anche alcuni acciai da utensili.	Riscaldamento rapido tramite Laser della superficie desiderata, per austenitizzare uno strato d'opportuno spessore a temperatura di 50÷100°C maggiore di quella per la tempra martensitica. Raffreddamento rapido con acqua, olio o fluidi sintetico per ottenere martensite tetragonale. Rinvenimento di distensione a 150÷200°C per almeno 2 ore.	<b>Attenzione!</b> Il Laser è un'onda elettromagnetica che viene riflessa e non cede calore alle superfici metalliche lucide o argentee. Pertanto vanno fosfatate o annerite prima del riscaldamento. Il rinvenimento di distensione dopo la tempra Laser è indispensabile.
24	Rinvenimento di distensione	Trasformare la martensite tetragonale dura e fragile, ottenuta con la tempra martensitica superficiale, in martensite cubica (ferrite + ZGP, Zone di Guinier Preston) altrettanto dura ma tenace.	Si esegue su pezzi d'acciaio temprati martensiticamente subito dopo la tempra superficiale.	Riscaldamento tra 150 e 200°C per almeno 2 ore in temperatura dello strato superficiale temprato.	<b>Attenzione!</b> La temperatura ottimale del rinvenimento di distensione è quella che conferisce la massima resilienza all'acciaio nell'intervallo 150÷250°C (vedere il diagramma di rinvenimento).
<b>Trattamenti termochimici o cementazioni</b>					
25	Carbocementazione	Arricchire di carbonio la superficie del pezzo per uno strato di profondità desiderata da 0,3 a 3 mm circa affinché sia indurito con la tempra martensitica e conferisca resistenza all'usura e alla fatica. Idealmente si mira a conferire la concentrazione dello 0,8% di C in superficie e gradienti con curva a S.	Acciai da cementazione. Raramente acciai da bonifica.  La carbocementazione è anche usata per ripristinare il carbonio negli strati decarburati di getti micro-fus.	Austenitizzazione a 900÷950°C (tipicamente 925°C) per il tempo necessario per ottenere la profondità desiderata:  $P = \frac{803\sqrt{h}}{10^{\frac{3722}{T}}}; Pe = 2/3$ Con: P = profondità totale dello strato; Pe = profondità d'indurimento efficace dopo tempra (550 HV1); h = tempo in ore, T = temperatura assoluta di cementazione.	La carbocementazione non è idonea per cementazioni di spessore inferiore a 0,25 mm (Cmt3) perché i tempi necessari sarebbero brevissimi e non consentirebbero di governare il processo. Per cementazioni profonde (P ≥ 1 mm) si la vora con cementazione attiva (Potenziale di carbonio $\mu_C \approx 1,2 \div 1,6 \%$ ) per 1/3 durata processo, seguita da diffusione ( $\mu_C \approx 0,8 \%$ ) per 2/3 durata, a temperatura di 830÷850°C, per ridurre lo shock della tempra diretta.
26	Carbonitrurazione sopra AC <sub>3</sub>	Arricchire di carbonio e azoto la superficie del pezzo per uno strato di profondità desiderata da 0,05 a 1 mm circa affinché sia indurito con la tempra martensitica e conferisca resistenza all'usura e alla fatica. Idealmente si mira a conferire la concentrazione dello 0,8 % di C in superficie e gradienti con curva a S.	Acciai da cementazione.	Austenitizzazione a 780÷850°C (tipicamente 830°C) per il tempo necessario per ottenere la profondità desiderata:  $P = \frac{803\sqrt{h}}{10^{\frac{3722}{T}}}; Pe = 2/3$ Con: P = profondità totale dello strato; Pe = profondità d'indurimento efficace dopo tempra (550 HV1); h = tempo in ore, T = temperatura assoluta di cementazione.	La carbocementazione sopra AC <sub>3</sub> si esegue a temperatura più bassa della carbocementazione sfruttando l'allargamento del campo $\gamma$ dovuto all'azoto, perciò è idonea per cementazioni sottili e non per cementazioni profonde che richiederebbero tempi industrialmente inaccettabili. Conferisce maggior resistenza all'usura della carbocementazione, ottima resistenza al grippaggio, ma minore aumento della resistenza a fatica.

27	Carbonitrurazione sotto AC <sub>1</sub>	Arricchire di carbonio e azoto un sottile strato superficiale del pezzo (0,05 a 0,20 mm circa) affinché sia indurito con la tempra martensitica, senza apprezzabili deformazioni. Conferisce ottima resistenza all'usura abrasiva e al grippaggio anche in assenza di lubrificazione.	Acciai ad alta lavorabilità risolforati con basso contenuto di carbonio destinati a pezzi soggetti a basse pressioni specifiche superficiali.	Austenitizzazione a 690÷700°C in bagni di sale contenenti cianuri per il tempo necessario ad ottenere la profondità desiderata.	Carbonitrurazione sotto AC <sub>1</sub> non modifica la struttura ferritica dell'acciaio base, ma solo quella dello strato che si trasforma in austenite per assorbimento dell'azoto. Perciò durante la tempra si forma martensite solo nello strato superficiale, mentre il cuore resta invariato, riducendo fortemente i rischi di deformazioni.
28	Nitrurazione gassosa	Arricchire d'azoto in fase gassosa uno strato superficiale ( $\approx 0,08 \div 0,5$ mm) del pezzo d'acciaio in campo ferritico, affinché sia indurito per precipitazione e migliorino sensibilmente la resistenza all'usura, alla fatica e soprattutto al grippaggio, senza apprezzabili deformazioni.	Tutti gli acciai da costruzione e da utensili rinvenibili a temperatura $\geq 600^\circ\text{C}$ , se la nitrurazione è condotta con procedimento a potenziale d'azoto ( $\mu\text{N}$ ) controllato. Solo acciai da nitrurazione per la nitrurazione gassosa tradizionale.	Riscaldamento a temperatura di 525÷550°C in atmosfera d'ammoniaca dissociata per 15÷72 ore. Raffreddamento senza contatto con l'aria nella storta del forno, eventualmente ventilata per accelerare il raffreddamento.	La nitrurazione è condotta tassativamente a temperatura inferiore a 590°C (eutettoide del sistema Fe-N) per evitare la formazione di braunite ( <i>nitride perlite</i> ) molto fragile. Non richiede la tempra post nitrurazione. I pezzi che devono sopportare carichi importanti devono essere precedentemente bonificati con temperatura di rinvenimento $\geq 600^\circ\text{C}$ .
29	Nitrurazione ionica	Arricchire d'azoto in fase gassosa rarefatta e sotto scarica ionica uno strato superficiale ( $\approx 0,08 \div 0,5$ mm) del pezzo d'acciaio in campo ferritico, affinché sia indurito per precipitazione e migliorino sensibilmente la resistenza all'usura, alla fatica e soprattutto al grippaggio, senza apprezzabili deformazioni.	Tutti gli acciai da costruzione e da utensili rinvenibili a temperatura $\geq 450^\circ\text{C}$ .	Riscaldamento a temperatura di 430÷550°C in atmosfera rarefatta contenente azoto, ionizzato da una scarica ionica che scalda anche i pezzi disposti nel forno all'anodo per 4÷15 ore. Raffreddamento senza contatto con l'aria nel forno. La carica può essere raffreddata rapidamente in azoto ventilato, per ridurre eventuali precipitazioni di nitridi indesiderate.	La nitrurazione ionica è molto versatile per i tipi di nitridi che può formare e più rapida della nitrurazione tradizionale o a potenziale d'azoto ( $\mu\text{N}$ ) controllato. Tuttavia tende a iper nitrurare gli spigoli e i vertici dei pezzi ( <i>effettopunta</i> ), non riesce a nitrurare l'interno di fori a profondità superiori a 2 volte il diametro, ha limiti di dimensioni dei pezzi da trattare ed è più costosa della nitrurazione gassosa tradizionale o a $\mu\text{N}$ controllato.
30	Nitrocarburazione gassosa	Arricchire d'azoto in fase gassosa uno strato superficiale ( $\approx 0,08 \div 0,5$ mm) del pezzo d'acciaio in campo ferritico, affinché sia indurito per precipitazione e formare strati superficiali di carbonitridi estremamente utili per migliorare la resistenza all'usura, alla fatica e soprattutto al grippaggio, senza apprezzabili deformazioni.	Tutti gli acciai da costruzione e da utensili rinvenibili a temperatura $\geq 600^\circ\text{C}$ .	Riscaldamento a temperatura di 575±5°C in atmosfera di gas endotermico e d'ammoniaca in rapporto da 3:1 a 1:1 per 2÷5 ore. Raffreddamento senza contatto con l'aria nella storta del forno, eventualmente ventilata per accelerare il raffreddamento.	Le proprietà dello strato di diffusione nitrocarburato in gas sono simili a quelle dello strato di diffusione nitrurato in gas con potenziale d'azoto ( $\mu\text{N}$ ) controllato, ma lo strato superficiale (zona dei composti) è diversa da quella che s'ottiene con la nitrurazione gassosa (coltre bianca). Essa è formata da carbonitridi $\gamma'$ con reticolo esagonale, generalmente autolubrificanti e molto efficaci contro il grippaggio anche in assenza di lubrificazione.

31	Nitrocarburazione salina	Arricchire d'azoto in bagno di sali fusi uno strato superficiale ( $\approx 0,05 \div 0,5$ mm) del pezzo d'acciaio in campo ferritico, affinché sia indurito per precipitazione e formare strati superficiali di carbonitruri estremamente utili per migliorare la resistenza all'usura, alla fatica e soprattutto al grippaggio, senza apprezzabili deformazioni.	Tutti gli acciai da costruzione e da utensili rinvenibili a temperatura $\geq 600^\circ\text{C}$ .	Riscaldamento a temperatura di $570 \pm 5^\circ\text{C}$ in bagni di sali aerati contenenti cianati per $0,5 \div 2$ ore. Raffreddamento in aria o in bagni di Sali contenenti nitrati e nitriti capaci di ossidare leggermente la zona dei composti ed elevare la resistenza alla corrosione.	La nitrocarburazione salina è molto più rapida ed efficiente di quella gassosa anche perché il bagno di sale è considerabile un forno sempre aperto dove i pezzi possono essere inseriti ed estratti a piacimento, senza dover preparare cariche omogenee. Così ogni pezzo può essere trattato singolarmente col ciclo più idoneo. La zona dei composti è generalmente costituita da due strati, uno compatto e uno poroso più esterno, che trattiene il lubrificante e migliora la resistenza al grippaggio.
<b>Altri trattamenti termochimici o cementazioni meno usati</b>					
32	Cromizzazione	Arricchire di cromo (fino al 13 %) un sottile strato superficiale dell'acciaio ( $0,02 \div 0,08$ mm) per aumentarne fortemente la durezza ( $1200 \div 1800$ HV) e la resistenza all'ossidazione a caldo, fino a $850^\circ\text{C}$ in servizio continuo.	Acciai basso legati e con basso contenuto di carbonio da indurire; acciai legati ad alto contenuto di nichel per elettrodi delle candele d'accensione dei motori a scoppio per aumentare la resistenza all'ossidazione a caldo.	Riscaldamento in cassetta, immergendo i pezzi nel cemento solido polverulento, a $950^\circ\text{C}$ è circa $6 \div 7$ ore a regime. Raffreddamento lento in cassetta a temperatura ambiente, se si desidera solo la resistenza all'ossidazione; tempra diretta o differita, con riscaldamento alla giusta temperatura d'austenizzazione e spegnimento in olio, se si desidera indurire i pezzi.	Lo spessore dello strato di diffusione del cromo diminuisce sensibilmente al crescere del contenuto di carbonio dell'acciaio.
33	Borizzazione	Arricchire di boro la superficie dell'acciaio per formare boruri complessi ( $\text{Fe}_2\text{B}$ e $\text{FeB}$ ) d'elevatissima durezza (circa $2000$ HV) che conferiscono eccellenti proprietà antiusura e al grippaggio (strati autolubrificanti), ma purtroppo molto fragili.	Tutti gli acciai da costruzione. Quelli al carbonio e basso legati sono i più idonei, per la maggior profondità di diffusione del boro e per la miglior aderenza dello strato.	Riscaldamento a $800 \div 1100^\circ\text{C}$ in cassetta con polveri, in sali fusi, o in atmosfere, capaci di cedere boro all'acciaio. Dopo la borurazione è consigliabile temprare e rinvenire i pezzi che devono sopportare pressioni specifiche elevate. Temprare in olio dopo austenizzazione a temperatura $\leq 900^\circ\text{C}$ in atmosfera protettiva o in vuoto.	La borurazione è applicata soprattutto per i componenti soggetti a forte usura abrasiva in assenza d'urto; per esempio: matrici e filiere di trafila, guidafile di macchine tessili, organi di movimentazione di carta e cartoni, elementi di trasporto di polveri abrasive.
34	Silicizzazione	Arricchire di silicio la superficie dell'acciaio per conferirgli ottime caratteristiche di resistenza alla corrosione ed all'ossidazione a caldo fino a $1000^\circ\text{C}$ .	Acciai dolci a basso tenore di zolfo ( $< 0,015\%$ ), per esempio il C10.	Riscaldamento a temperatura $900 \div 1200^\circ\text{C}$ in atmosfera gassosa di tetracloruro di silicio e/obidrogeno e raffreddamento lento fino a temperatura ambiente.	Se lo zolfo è elevato lo strato silicizzato diventa troppo poroso e non garantisce più le caratteristiche protettive contro la corrosione e l'ossidazione a caldo.



35	Alluminizzazione	Arricchire d'alluminio la superficie dell'acciaio per formare strati compatti ed aderenti d'alluminuri (composti intermetallici tra alluminio e ferro e tra alluminio ed elementi di lega dell'acciaio), capaci di conferire un'elevata resistenza all'ossidazione all'erosione, alla cavitazione ed alla corrosione in generale.	Acciai al carbonio o basso legati; acciai inossidabili austenitici e ferritici	Spruzzatura al plasma o rivestimento PVD con alluminio e diffusione mediante trattamento termico ad alta temperatura in atmosfera neutra.	Questo trattamento non ha trovato significativi sbocchi industriali.
36	Sulfinitazione a bassa temperatura oSulf-BT	Depositare e far diffondere lo zolfo in microstrati superficiali dei pezzi per creare superfici autolubrificanti ed anti-grippanti.	Acciai già induriti superficialmente con qualsiasi tecnologia disponibile (carbocementazione, carbonitrazione, tempra a induzione).	Riscaldamento a circa 180°C in bagni di sali fusi a base di litio, con i pezzi che fungono da anodo in un circuito elettrico a corrente continua.	Questo trattamento è di solito attuato su piccoli pezzi anche con la tecnica del rotobarile. In tal caso può capitare che piccole scintille sviluppino durante il contatto elettrico fra pezzi, con formazione di microcrateri inaccettabili.