

# Gli acciai da cementazione e il loro trattamento termico

Marco V. Boniardi  
Andrea Casaroli

La cementazione è un trattamento termochimico di diffusione che prevede un arricchimento di carbonio sulla superficie di un componente meccanico realizzato in acciaio a basso tenore di carbonio.

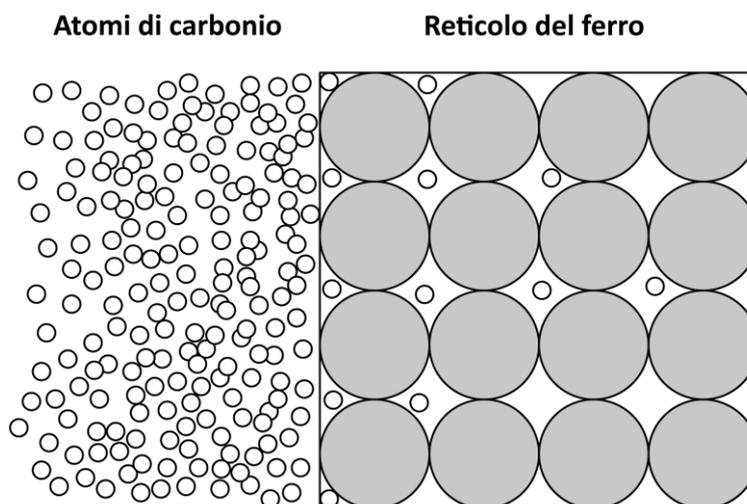
Scopo del trattamento di cementazione è quello di ottenere uno strato superficiale di elevata durezza dell'ordine del millimetro (normalmente  $0,8 \div 2$  mm) su componenti meccanici realizzati in acciaio dolce in modo da ottenere una buona resistenza all'usura e al grippaggio nonché indurre anche un notevole miglioramento della resistenza a fatica del pezzo; per contro il cuore del pezzo mantiene una buona tenacità, proprio in virtù del basso tenore di carbonio dell'acciaio.

Il trattamento di cementazione si esegue su componenti che devono resistere all'usura e a fenomeni di danneggiamento superficiale come ruote dentate in genere, coppie coniche per applicazioni automobilistiche, pignoni, alberi a camme, spinotti, perni, rulli. Il trattamento di cementazione viene effettuato a temperature comprese tra gli  $870^{\circ}\text{C}$  e  $930^{\circ}\text{C}$  ovvero superiori al punto critico di trasformazione dell'austenite in ferrite,  $A_{c3}$ , per un tempo di mantenimento di qualche ora (1-10 ore). Terminata la fase di cementazione, il pezzo viene raffreddato rapidamente (temprato) in acqua, in acqua con additivi o in olio, per indurre la trasformazione martensitica dell'acciaio. Successivamente si esegue un rinvenimento a bassa temperatura (detto anche 'distensione'), non superiore ai  $200^{\circ}\text{C}$ .

## IL TRATTAMENTO DI CEMENTAZIONE

La cementazione è nota, almeno per via sperimentale, fin dall'alba della civiltà. Svariati studi di carattere archeometallurgico su reperti greci ed etruschi, segnalano, già a partire dall' VIII sec. a.C., l'esistenza di processi di arricchimento di carbonio (cementazione) impiegati per indurire il filo delle armi da taglio e degli utensili da lavoro.

Gli aspetti teorici di questo processo sono molto più recenti e bisogna attendere la fine dell'800 per vedere applicato il trattamento di cementazione in campo industriale.



*Figura 1: Schematizzazione (non in scala) della reazione d'interfaccia che provoca l'adsorbimento di atomi di carbonio nel reticolo cristallino del ferro.*

Il trattamento di cementazione si basa sulla diffusione del carbonio in forma atomica all'interno del reticolo cristallino dell'acciaio; il fenomeno (dai chimici denominato "adsorbimento") è favorito sia da un aumento della temperatura e del tempo di mantenimento, sia dalla elevata concentrazione di carbonio.

La figura 1 rappresenta schematicamente il processo di adsorbimento all'interfaccia di reazione tra ambiente cementante e acciaio: si possono immaginare gli atomi di carbonio come palline di piccola dimensione che si 'insinuano' nel reticolo cristallino dell'acciaio costituito, invece, da atomi di

## I PROCESSI DI CEMENTAZIONE

dimensione più consistente. Qualunque sia il processo di cementazione impiegato, l'agente cementante del processo è sempre il monossido di carbonio. Tale sostanza, all'interfaccia con l'acciaio ad una temperatura di circa 900°C, dà luogo all'arricchimento di carbonio nel reticolo cristallino, cedendo atomi di carbonio all'acciaio. In generale, quindi, maggiore sarà la quantità di monossido di carbonio presente nell'ambiente di reazione, maggiore sarà la capacità cementante dell'ambiente stesso nei confronti dell'acciaio da trattare. Tale capacità di un'atmosfera di cedere carbonio ad un dato acciaio (cioè di cementarlo) viene normalmente detta 'potenziale di carbonio'<sup>1</sup>; ne consegue che la cementazione di un componente d'acciaio dipende anche dalla natura chimica dell'ambiente di reazione. In ultima analisi, quindi, il potenziale di carbonio, la temperatura e il tempo di trattamento sono i tre parametri che permettono la regolazione del processo. In generale dopo cementazione, tempra e rinvenimento, si ottengono durezza superficiali dell'ordine dei 650-850 HV (58-65 HRC) per una profondità efficace di circa 1-2 mm, misurata convenzionalmente in corrispondenza di una durezza pari a 550 HV.

Attualmente i moderni processi industriali di cementazione fanno riferimento ad atmosfere gassose. La cementazione viene eseguita a 900°-930°C in un ambiente contenente un eccesso di ossido di carbonio rispetto alle condizioni d'equilibrio.

L'atmosfera di processo è ottenuta miscelando un gas portante (detto 'carrier') con un idrocarburo gassoso (di solito il metano di gasdotto o un altro idrocarburo). Il gas portante, che da solo non avrebbe la possibilità di cementare il pezzo, è costituito da endogas<sup>2</sup> (20% di ossido di carbonio, 40% di idrogeno e 40% di azoto) oppure da una miscela di endogas ed esogas<sup>3</sup> (si possono ottenere varie composizioni; una tipica composizione è 17% di ossido di carbonio, 23% di idrogeno e 60% di azoto).

La cementazione in fase gassosa presenta ottime possibilità di controllo del processo. Considerando, ad esempio, un tipico processo di cementazione gassosa con arricchimento di metano (CH<sub>4</sub>) in un gas portante tipo endogas, si ha un adsorbimento di carbonio alla superficie del pezzo da trattare, anche per mezzo del metano, con conseguente liberazione di vapore d'acqua.

E' possibile, attraverso la misura della quantità di vapor d'acqua (meglio del suo punto di rugiada), risalire al potenziale di carbonio dell'atmosfera e ottenere così il controllo del processo.

## IL TRATTAMENTO TERMICO DI TEMpra E RINVENIMENTO

Dopo cementazione gli acciai devono essere sempre sottoposti al trattamento termico di tempra e successivo rinvenimento (bonifica). Vi sono varie possibilità di eseguire questo trattamento anche in relazione alla tipologia di acciaio impiegato.

Nel caso degli acciai da cementazione il problema nasce dal fatto che la superficie del componente, arricchita di carbonio, ha caratteristiche metallurgiche, in particolare i punti critici di trasformazione, molto diverse da quelle del cuore. Osservando la figura 2 si nota chiaramente come la temperatura di trasformazione A<sub>c3</sub> (trasformazione  $\gamma \rightarrow \alpha$ ) sia molto più bassa nel caso dello strato superficiale rispetto al cuore: ciò comporta differenti temperature di austenitizzazione in tempra tra la superficie e il cuore del pezzo. Inoltre le abituali temperature di cementazione sono normalmente superiori alle temperature di austenitizzazione del cuore.

Un approccio semplice ed economico al trattamento di tempra e rinvenimento degli acciai da cementazione è dato dai cicli termici proposti nelle figure 3 e 4.

Tali cicli vengono anche chiamati di “tempra diretta” e prevedono di temprare il pezzo immergendolo in olio o in un fluido di tempra adeguato a partire dalla temperatura di cementazione (figura 3) o da una temperatura leggermente inferiore (figura 4); in entrambi i casi alla tempra fa seguito il trattamento di rinvenimento a 150-200°C. Questi cicli sono largamente impiegati per moltissimi componenti e ben si adattano ad acciai in cui la differenza di temperatura tra i punti critici del cuore e quelli della superficie è limitata (in genere la differenza tra  $A_{c3 \text{ cuore}}$  e  $A_{c3 \text{ superficie}}$  deve essere minore di 100°C).

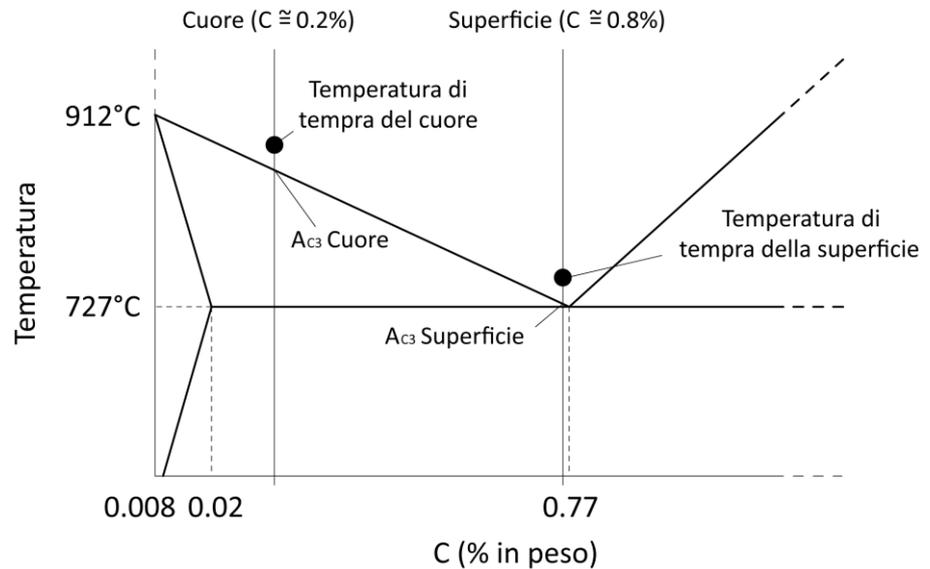


Figura 2: Particolare del diagramma Fe-C con in evidenza la posizione della superficie e del cuore di un pezzo in acciaio cementato.

Qualora, però, i componenti siano di medie o grosse dimensioni e la qualità/affidabilità del prodotto finito debba essere molto elevata è opportuno passare ad un ciclo termico con “doppia tempra” come quello mostrato in figura 5. Con questo ciclo si esegue un primo trattamento di tempra (dalla temperatura di cementazione o da una temperatura leggermente inferiore), quindi si riscalda nuovamente il pezzo ad una temperatura superiore al punto critico  $A_{c3}$  della superficie (ma inferiore a quello del cuore) per poi raffreddare nuovamente in modo drastico; successivamente viene eseguito il trattamento di rinvenimento a bassa temperatura o distensione. In questo modo con il primo trattamento si esegue la tempra del cuore mentre, con il secondo trattamento, viene eseguita la tempra della superficie ad una temperatura corretta rinvenendo, nel contempo, il cuore del pezzo.

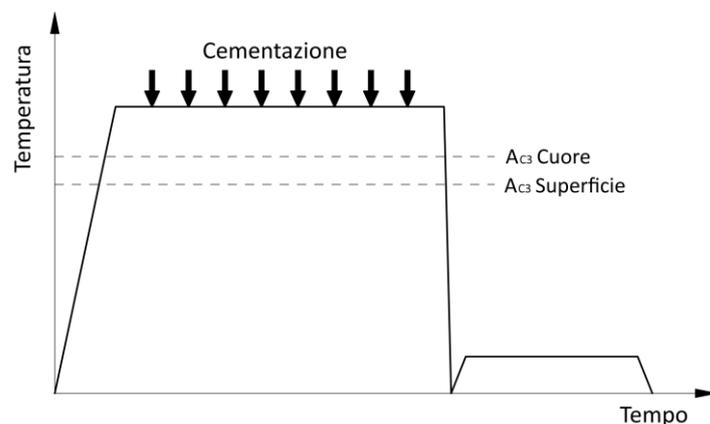


Figura 3: Ciclo termico di “tempra diretta” su acciai da cementazione.

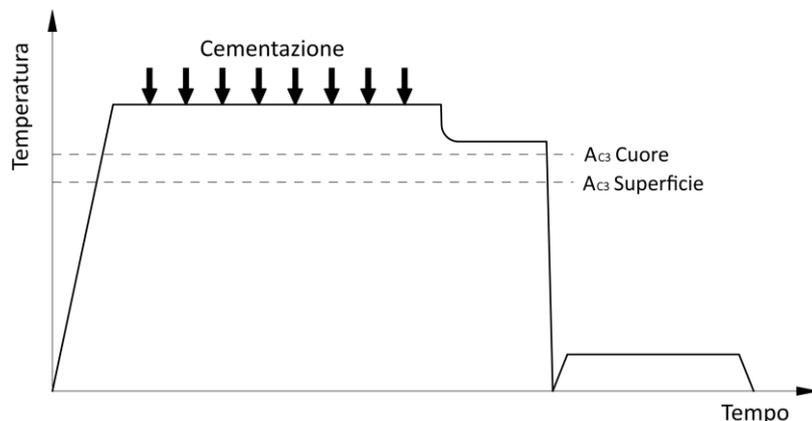


Figura 4: Ciclo termico di "tempra diretta" su acciai da cementazione (abbassamento della temperatura dopo la fase di cementazione).

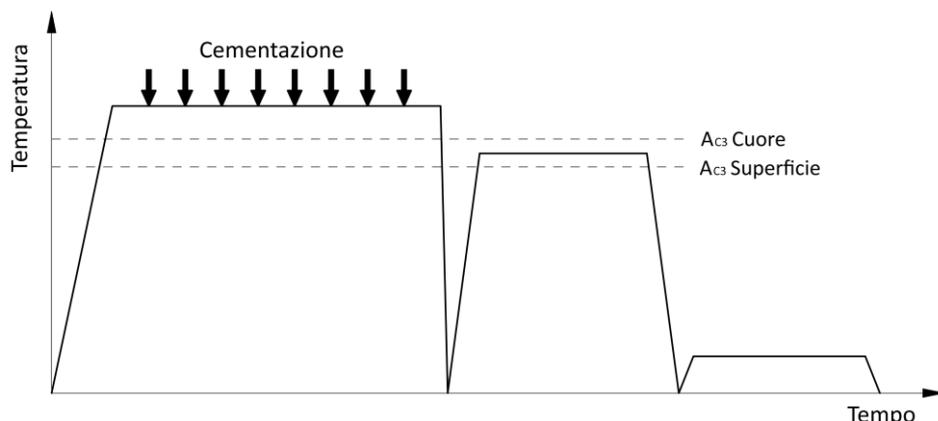


Figura 5: Ciclo termico con "doppia tempra" per acciai da cementazione.

## GLI ACCIAI DA CEMENTAZIONE

Gli acciai impiegati per realizzare componenti meccanici da cementare sono tutti acciai a basso tenore di carbonio. Anche se è possibile utilizzare acciai al solo carbonio di tipo C10 o C15 (storicamente sono i primi acciai da cementazione che si sono affermati sul mercato), abitualmente si fa ricorso ad acciai debolmente legati al cromo-molibdeno o al nichel - cromo - molibdeno. Se da un lato il tenore di carbonio deve essere mantenuto basso per favorire il processo di cementazione e per mantenere una buona tenacità a cuore dei pezzi, è, per contro, opportuno aggiungere elementi di lega per favorire la temprabilità dell'acciaio. Tale proprietà consente, durante il trattamento di tempra, di garantire la trasformazione martensitica dell'acciaio anche nelle zone prossime al cuore del pezzo, ottenendo, conseguentemente, notevole uniformità delle caratteristiche meccaniche lungo tutta la sezione del componente meccanico. In quest'ottica si inquadra il 18NiCrMo5 che risulta essere, almeno in Italia, l'acciaio più impiegato nel settore meccanico ove sono richieste ottime caratteristiche di affidabilità: pignoni, alberi a camme, ruote dentate, spinotti, perni e rulli sono tra le tipiche applicazioni di questo materiale. Per condizioni di carico più gravoso sono comunque disponibili acciai da cementazione ad alto tenore di nichel (quindi più costosi) quali il 18NiCrMo7 o il 16NiCrMo12 che permettono di garantire elevatissimi valori di tenacità. Sul fronte opposto, quando sono cioè previsti materiali meno costosi, si ripiega su acciai da cementazione al cromo-nichel (12NiCr3, 16CrNi4), al cromo-molibdeno (18CrMo4) o al manganese-cromo (16MnCr4, 20MnCr4). In quest'ultimo caso si fa spesso uso dell'alligazione con boro che migliora notevolmente la temprabilità dell'acciaio. Anche se si tratta di acciai con tenacità inferiore rispetto agli acciai legati con nichel, le proprietà degli acciai al manganese-cromo sono più che accettabili in molte applicazioni, specialmente nel settore automobilistico.

In tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche degli acciai da cementazione più utilizzati unitamente alle condizioni ottimali di trattamento termico.

Acciaio (UNI 10084)	Composizione chimica media						Diametro medio* (70% martensite)	Proprietà meccaniche (φ30) <sup>^</sup>			
	C	Mn	Cr	Ni	Mo	altri		Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	R [MPa]	A%	KCU [J]
C10	0,10	0,50	--	--	--	--	--	245	390-640	15	35
C15	0,15	0,50	--	--	--	--	--	295	540-780	13	30
16MnCr5	0,16	1,10	0,90	--	--	--#	22-25 (27 con B)	540	780-1080	9	27
20MnCr5	0,20	1,20	1,10	--	--	--#	28-35 (37 con B)	690	930-1230	8	22
18CrMo4	0,18	0,70	1,00	--	0,20	--	25-32	540	780-1080	9	27
16CrNi4	0,16	0,90	1,00	1,00	--	--	30-35	640	830-1130	10	32,5
20CrNi4	0,20	0,90	1,00	1,00	--	--	32-39	785	1030-1325	9	29,5
18NiCrMo5	0,18	0,80	0,80	1,30	0,20	--	35-42	835	1080-1370	10	35
16NiCrMo12	0,16	0,50	1,00	2,90	0,35	--	45-60	930	1180-1470	9	39

Note

\* rappresenta il diametro medio (in mm) di un tondo in corrispondenza del quale si ottiene, a cuore, il 70% di martensite dopo tempratura in olio.

# può essere alligato con boro.

<sup>^</sup> le proprietà meccaniche sono date per un tondo del diametro di 30mm temprato e disteso a 150°-200°C.

*Tabella 1: Composizione chimica media e caratteristiche meccaniche / metallurgiche indicative per alcuni tra i principali acciai da cementazione.*

## NORMATIVE

La normativa relativa agli acciai da cementazione è la UNI EN 10084 - Acciai da cementazione - Condizioni tecniche di fornitura ICS 77.140.10.

Tale norma specifica i requisiti tecnici di fornitura dei semilavorati (barre, vergelle, larghi piatti, nastri, lamiera, fucinati, e stampati) utilizzati per produrre i particolari meccanici da sottoporre al trattamento termochimico di cementazione. In particolare la norma definisce i minimi requisiti del processo di produzione degli acciai, la composizione chimica, la durezza, la temprabilità; inoltre prescrive le caratteristiche tecnologiche che sono da concordare con il produttore dell'acciaio al momento dell'ordine (lavorabilità, idoneità al taglio, struttura, integrità interna, stato superficiale e dimensioni e tolleranze dimensionali e di forma). I controlli e prove minimi richiesti dalla normativa sono i seguenti: per tutti gli acciai, verifica della grossezza del grano, controllo visivo e dimensionale. Per gli acciai ordinati senza prescrizioni di temprabilità devono essere verificate le prescrizioni di durezza indicate dalla norma (prospetto 1 della norma UNI 10084) per il rispettivo stato di trattamento termico, mentre per gli acciai ordinati con le prescrizioni di temprabilità (+H, +HH, +HL) le durezze HRC vanno effettuate su una provetta a determinate distanze dall'estremità temprata (si vedano prospetti 5 e 6 della UNI 10084).

È possibile secondo la norma UNI richiedere una serie di prove aggiuntive da concordare al momento dell'ordine: tenore di inclusioni non metalliche, prove non distruttive, analisi su prodotto, rapporto di riduzione, marcature particolari. Unitamente alla normativa già indicata sono da considerare anche le seguenti: UNI 5381-Trattamenti termici dei materiali – Cementazione e UNI 11153 - 1 Misurazione dello spessore di strati superficiali induriti su elementi di lega ferrosa – Carbocementazione e carbonitrurazione.

La UNI 5381 stabilisce gli spessori di cementazione e di indurimento efficaci (la scelta dello spessore efficace dipende per gli ingranaggi dal modulo di dentatura prima della rettifica), le classi di durezze superficiali; stabilisce le caratteristiche fisico-chimiche che devono avere gli strati sottoposti a trattamento di cementazione ed i metodi di prova (contenuto superficiale di carbonio, gradiente di carbonio dalla superficie verso il cuore, gradiente di durezza dalla superficie verso il cuore, durezza superficiale, durezza a cuore, microstruttura).

## CARATTERISTICHE DEGLI STRATI CEMENTATI

La normativa definisce anche i trattamenti termici da effettuare sui pezzi da sottoporre a cementazione (da concordare all'atto dell'ordine): trattamenti preliminari (ricottura, normalizzazione, bonifica) per assicurare una buona omogeneità strutturale e i trattamenti da eseguire dopo cementazione (ricottura subcritica, tempra diretta, tempra indiretta, doppia tempra, tempra dopo mantenimento isotermico, trattamento sottozero, rinvenimento di distensione). La misurazione degli spessori cementati (spessore di cementazione totale, spessore di cementazione efficace, spessore di indurimento totale e spessore di indurimento efficace) viene effettuata in accordo alla norma UNI 11153-1.

Un strato superficiale cementato appare, dopo tempra e rinvenimento, formato da martensite rinvenuta come osservabile in figura 6. La microstruttura si riferisce ad un dente di modulo 10, prelevato da un pignone di un riduttore; il profilo di microdurezza è mostrato in figura 7 unitamente all'indicazione della profondità efficace ( $p_{\text{eff}} = 1,9\text{mm}$  quando HV 550).

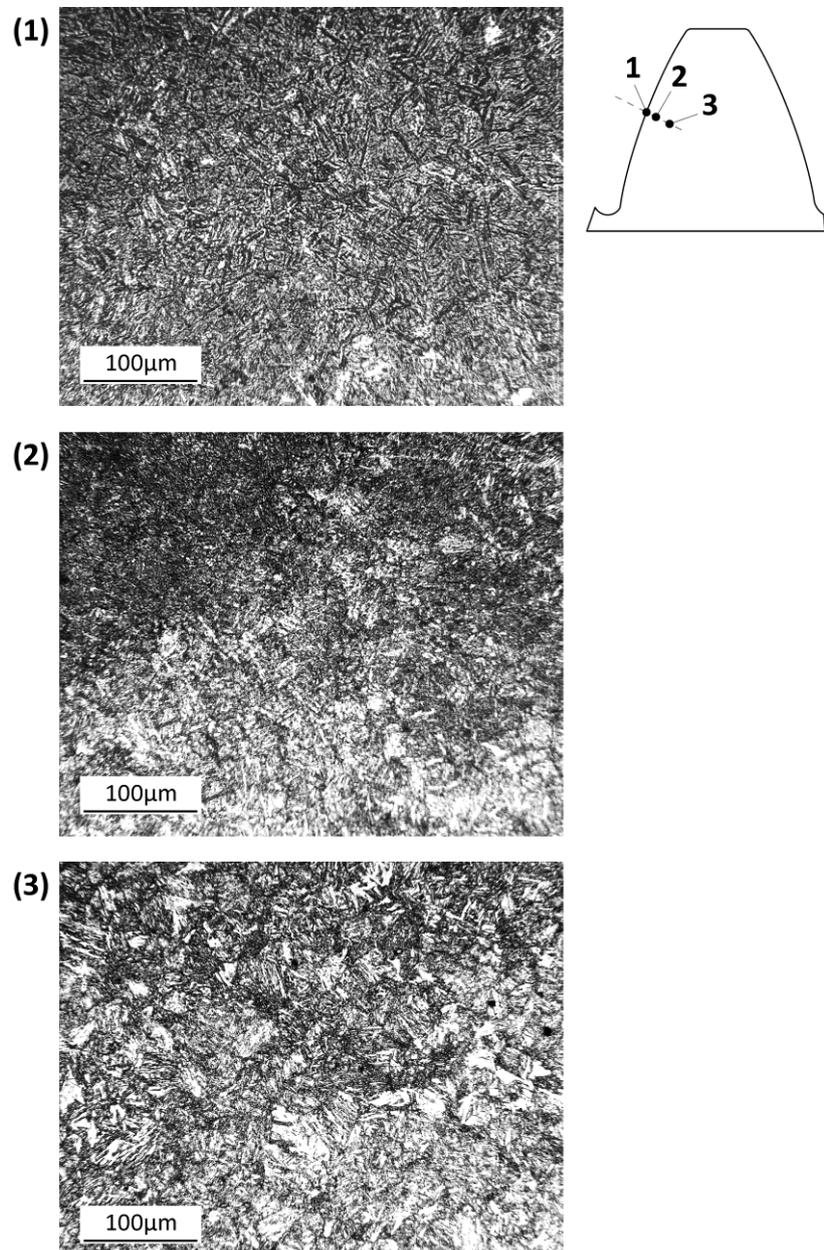
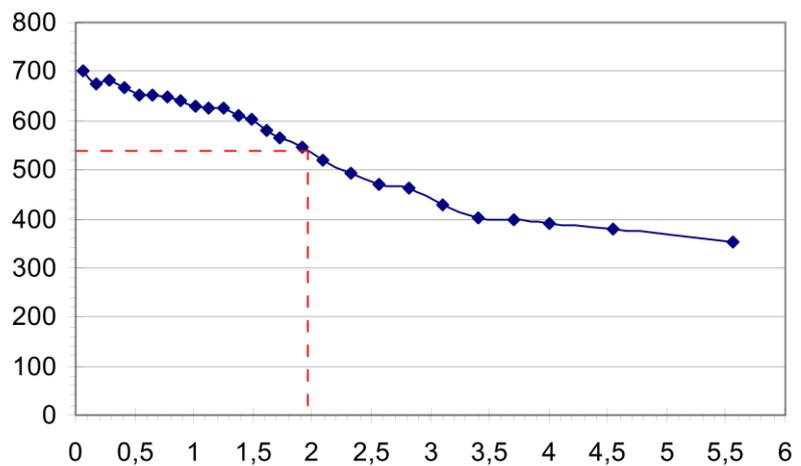
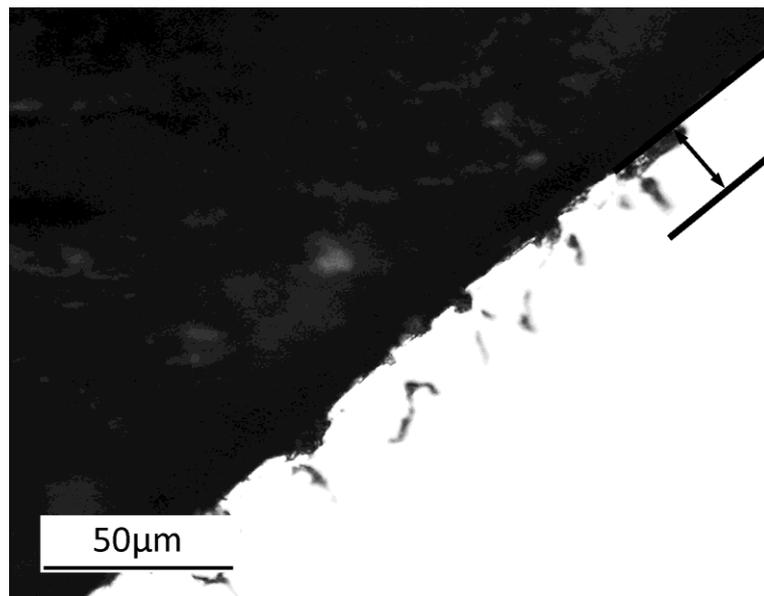


Figura 6: Aspetto microstrutturale di uno strato cementato rilevato su un dente di un ingranaggio; campione lucidato e attaccato con Nital 2% (posizione 1: superficie; posizione 2: 1mm sotto la superficie; posizione 3: 2 mm sotto la superficie) - fonte: Marco Boniardi - Laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano.



*Figura 7: Profilo di microdurezza misurato lungo la circonferenza primitiva per il dente mostrato in figura 6; a tratteggio la determinazione della profondità efficace.*

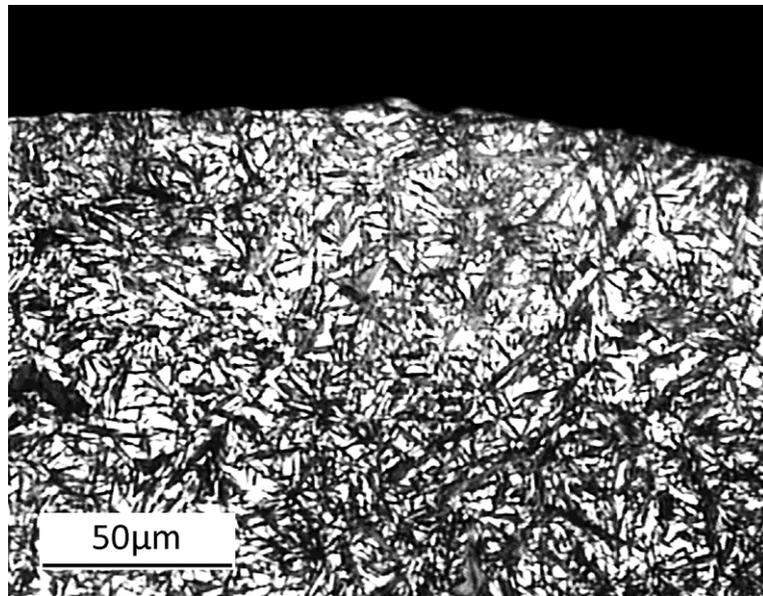
Alcuni aspetti vanno tenuti in debita considerazione studiando la microstruttura di uno strato cementato onde evitare l'insorgenza di problemi in esercizio sui componenti così trattati. Innanzitutto si deve evitare la formazione di zone ossidate in prossimità della superficie come osservabile ad esempio in figura 8; tale danneggiamento deriva dalla presenza indesiderata di ossigeno libero nell'atmosfera del forno di cementazione.



*Figura 8: Particolare di uno strato cementato interessato da fenomeni di ossidazione intergranulare; campione lucidato e non attaccato (la freccia indica lo spessore dal difetto ~20µm) - fonte: Marco Boniardi - Laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano.*

Il difetto si manifesta nella forma di un'ossidazione a bordo grano della microstruttura dell'acciaio (grano austenitico) e, se il suo spessore non è particolarmente accentuato, durante la successiva operazione di rettifica viene completamente eliminato. In caso contrario la presenza dell'ossidazione intergranulare provoca un rapido danneggiamento dello strato cementato con formazione di *pitting* distruttivo dopo tempi brevi di esercizio del componente anche in presenza di sollecitazioni meccaniche di entità limitata.

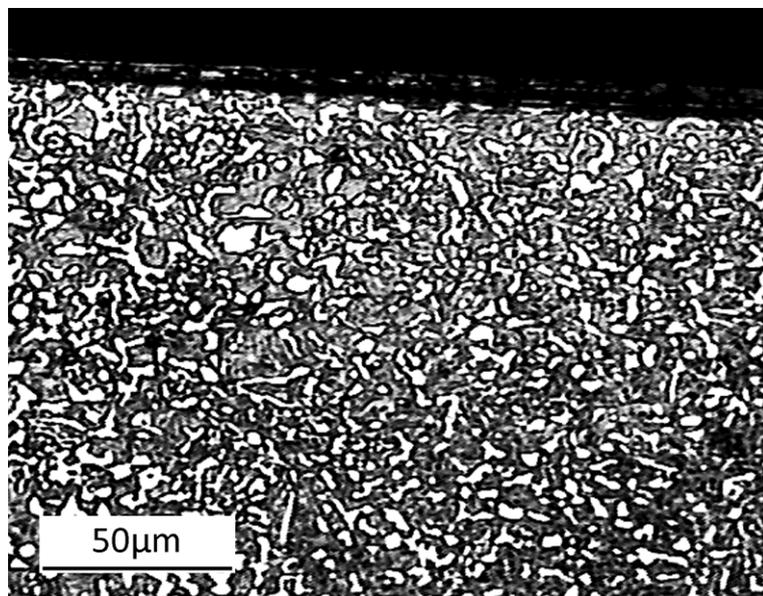
Un secondo problema che spesso si associa alla formazione di uno strato cementato, è la presenza di austenite residua; tale struttura, difficilmente rilevabile con un normale microscopio ottico metallografico, può essere determinata con tecniche di diffrazione ai raggi X. Un caso evidentissimo di austenite residua in matrice martensitica è mostrato in figura 9.



*Figura 9: Austenite residua in quantità anomala (aree biancastre) in uno strato cementato; campione lucidato e attaccato con Nital 2% (fonte: Colmegna S.p.A., Siziano - PV).*

L'aumento del tenore di carbonio negli strati superficiali induce uno spostamento verso il basso della temperatura di fine trasformazione della martensite ( $M_f$ ) e ciò favorisce, conseguentemente, un aumento della quantità di austenite residua<sup>4</sup>. L'austenite residua, che risulta essere meno dura e più duttile rispetto alla matrice martensitica, costituisce una disomogeneità microstrutturale all'interno dello strato cementato.

Vi sono pareri contrastanti sull'effetto che l'austenite residua induce nello strato cementato con riferimento ai fenomeni di danneggiamento per usura e fatica da contatto.



*Figura 10: Strato cementato ipercarburato; carburi a bordo grano in quantità abnorme (aree biancastre); campione lucidato e attaccato con Nital 2% (fonte: Colmegna S.p.A., Siziano - PV).*

In generale si può affermare che l'elevata deformabilità della fase  $\gamma$  (austenite) produca effetti differenti a seconda delle caratteristiche dello strato indurito e del materiale base. Sotto l'azione di elevati carichi di contatto, le isole di austenite presenti nella matrice martensitica tendono a deformarsi facilmente, aumentando l'area di contatto con conseguente diminuzione della pressione locale; d'altra parte una diffusa plasticizzazione delle isole di austenite tende a scaricare parzialmente lo stato tensionale residuo di compressione tipico dello strato cementato peggiorando le caratteristiche dello strato stesso.

Un ultimo aspetto da considerare è l'eventuale presenza di carburi a bordo grano. Il difetto deriva da un'eccessiva carburazione dello strato, con formazione di carburi (prevalentemente di ferro) che si depositano a bordo grano, talvolta anche in quantità abnorme. Una situazione particolarmente anomala è mostrata in figura 10.

## NOTE

<sup>1</sup> Il potenziale di carbonio di un'atmosfera è definito come la quantità di carbonio che si raggiunge sulla superficie di un campione di acciaio dolce al carbonio all'equilibrio in quell'atmosfera.

<sup>2</sup> Ottenibile in un generatore, ad esempio, dalla combustione stechiometrica del metano ( $2\text{CH}_4 + \text{O}_2 + 4\text{N}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 4\text{H}_2 + 4\text{N}_2$ ). È un'atmosfera riducente.

<sup>3</sup> Ottenibile in un generatore per combustione parziale di metano, propano o altri gas di città. La miscela prodotta contiene azoto in quantità maggiori del 70%, oltre ad idrogeno e  $\text{CO}_2$ ; se non arricchita, è un'atmosfera decarburante.

<sup>4</sup> Lo spostamento di  $M_f$  è al di sotto della temperatura ambiente. In questo modo l'austenite inizia la sua trasformazione (in corrispondenza di  $M_s$  - martensite start) senza poterla però ultimare poiché la temperatura di fine trasformazione ( $M_f$ ) si trova al di sotto della temperatura ambiente.

## PER APPROFONDIRE

- W. Nicodemi, Metallurgia - principi generali, Zanichelli, Bologna, 2000.
- W. Nicodemi, Acciai e leghe non ferrose, Zanichelli, Bologna, 2000.
- Burdese, Metallurgia e tecnologia dei materiali metallici, UTET, Torino, 1992.
- M. Boniardi, P. Davoli, C. Longoni, L. Cattini, M. Caprioglio, A. Mancuso, F. Pasetti, Resistenza a fatica di ingranaggi cementati e nitrurati, rivista "Organi di Trasmissione", Gennaio 2006, pag. 90-93.
- H. E. Boyer, Case Hardening of Steel, ASM International, Metals Park Ohio, 1987.

## DIRITTI

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

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



# Gli acciai da cementazione e il loro trattamento termico

Marco V. Boniardi

Andrea Casaroli

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