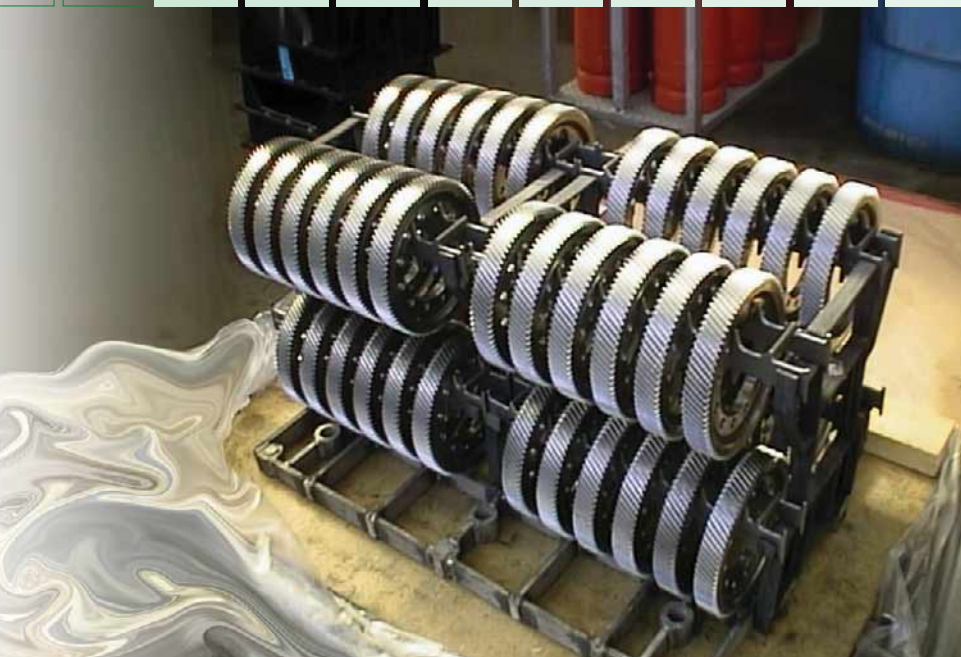


La cinetica di un impianto per cementazione a bassa pressione dimostra come questo tipo di processo sia più vantaggioso rispetto a quello tradizionale sia dal punto di vista impiantistico sia da quello del risultante metallurgico



I vantaggi della cementazione non tradizionale

La cementazione a bassa pressione nasce come sviluppo della cementazione tradizionale. A partire dalla sua posizione iniziale, che risale a circa 20 anni fa, il processo ha subito enormi sviluppi e ora ha raggiunto la piena maturità industriale. I principali vantaggi della cementazione a bassa pressione sono: forte riduzione delle deformazioni da tempra rispetto al processo tradizionale, totale assenza di ossidazioni intergranulari, miglior omogeneità nella chimica di reazione e nella cinetica di reazione, maggiore uniformità di spessore di tutti i manufatti cementati in ciascuna carica, completa ripetibilità dei risultati.

Presso lo stabilimento T.T.N. di Nerviano (Milano) è presente un impianto di cementazione a bassa pressione, le cui caratteristiche sono: impianto unico (le celle di cementazione e di tempra sono collegate da un tunnel dove vi è sempre una pressione parziale dell'ordine del millibar. In questo modo tutte le fasi avvengono in assoluta assenza d'ossigeno); il sistema di movimentazione delle cariche è completamente automatizzato; la tempra a gas ad alta pressione viene eseguita in una camera fredda; possibilità di controllare la ci-

netica di raffreddamento della carica durante lo spegnimento a gas regolando la velocità delle turbine che può essere variata da 100 a 3.600 rotazioni/min; presenza di una cella di tempra in olio che consente di coprire una gamma più ampia possibile di particolari e materiali, ad esempio pezzi di dimensioni importanti per i quali si è così in grado di conservare i vantaggi della cementazione in bassa pressione coniugandoli al contempo a una durezza e caratteristiche meccaniche idonee alla radice del dente e a cuore del manufatto.

IMPIANTO E CINEMATICA DI PROCESSO

T.T.N. ha scelto di dotarsi di una linea di cementazione a bassa pressione in grado di gestire compiutamente il calcolo delle profondità in funzione ai tempi e al volume di iniezione dei gas cementanti. La stessa tipologia impiantistica a diversi livelli di aggiornamento è operativa dal 1992 in più di 100 stabilimenti delle maggiori Case automobilistiche mondiali dove si producono ingranaggi e componenti di sistemi diesel common rail. Tra queste le principali sono: TBI (Francia), Peugeot (Fran-

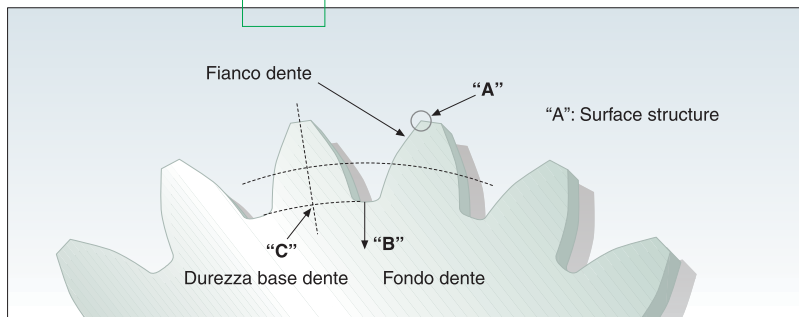
cia), Ford (USA), Delphi (Spagna), Bosch (Italia/Germania/ Brasile), Fiat GM Powertrain (Austria), Getrag (Italia), Daimler Chrysler (USA), Toyota (Giappone), SHU (Germania), LuK (Germania).

L'impianto è formato da tre celle di cementazione, una cella a camera fredda di tempra in gas ad alta pressione (fino a 20 bar) e una di tempra in olio. Il trasferimento delle cariche dalle cellule di trattamento termico a quelle di tempra avviene all'interno del tunnel a mezzo di una caricatrice schermata. Ciò al fine di ridurre al minimo le perdite di calore per irraggiamento in vuoto. Le cariche di peso fino a 750 kg vengono poi sigillate all'interno delle cellule di tempra a tenuta stagna dove poi avviene in una l'immersione in olio nell'altra l'insufflaggio di gas sino a 20 bar di sovra pressione. Ciascuna cella è separata dal resto dell'impianto da appositi sportelli la cui apertura è gestita in modo automatico e consente alle tre celle di cementazione di lavorare in modo perfettamente autonomo evitando così mutui disturbi alle atmosfere specifiche. Il PLC di supervisione garantisce il perfetto sincronismo tra tutte le fasi sia di ciclo che di processo di tutte le celle.



Figura 1. Corone coniche in acciaio 16 MnCr5 sottoposta a trattamento di cementata a bassa pressione.

Figura 2. Punti del dente nei quali è stata misurata la durezza.



Dopo essere stata posizionata nella cella di cementazione, la carica viene scaldata per poter essere portata alla temperatura di cementazione in vuoto. La gamma delle temperature d'utilizzo di questi forni va da 700 a 1300 °C, ciò permette di effettuare oltre a cicli di cementazione anche trattamenti di tempra su acciai da utensile, per cuscinetti, inossidabili, maraging, leghe di nichel. Una volta che la temperatura di cementazione è stata raggiunta, il processo di cementazione inizia con l'immissione del gas di processo a pressioni di pochi mbar (0,1 – 10 mbar). Come gas di processo vengono utilizzati propano (C₃H₈) o acetilene (C₂H₂) che a queste pressioni e temperature subiscono un processo di scissione mettendo a disposizione rispettivamente il 40–60% e l'80% di carbonio disponibile. Il carbonio messo a disposizione si diffonde nei pezzi trattati senza l'utilizzo di alcun altro gas di reazione e senza quindi la presenza di ossigeno responsabile della formazione di ossidazioni intergranulari. L'assenza di strati ossidati ai giunti dei grani comporta il vantaggio di avere delle superfici a miglior resistenza al pitting o fatica da contatto. A comandare questa fase è un sofisticato software che in funzione del tipo di acciaio, degli spessori, della durezza e profondità di cementazione richieste e infine della superficie, in cm², da trattare, regola l'afflusso di gas che viene introdotto nella cella intervallando impulsi di iniezione a periodi di diffusione nei quali il gas non viene introdotto.

LA FASE SUCCESSIVA LA CEMENTAZIONE

Terminata la fase di cementazione la caricatrice schermata preleva la carica dalla cella di cementazione e sempre

nel vuoto e alla medesima pressione la porta o nella camera di spegnimento con gas o in quella di spegnimento con olio. I pezzi cementati a bassa pressione normalmente si temprano con gas ad alta pressione perché questo tipo di raffreddamento permette di ridurre le deformazioni; la presenza comunque di una camera di tempra in olio consente di coprire una gamma più ampia possibile di particolari e materiali, ad esempio pezzi di dimensioni maggiori per i quali si è così in grado di conservare i vantaggi della cementazione in bassa pressione coniugandola alla trasformazione martensitica a base dente e cuore del manufatto. Prima che la carica venga introdotta, nella camera di spegnimento stessa viene comunque raggiunta la medesima condizione di pressione in modo tale che non si generino depressioni nell'impianto. Solo dopo che i pezzi cementati sono stati depositati e lo sportello di collegamento con il tunnel e le camere di cementazione è chiuso, nella camera di spegnimento con gas inizia a essere insufflato azoto a elevata pressione. La pressione può essere variata fino ad arrivare a 20 bar a seconda del tipo di acciaio e della drasticità richiesta. Se la tempra invece viene eseguita nella camera a spegnimento in olio al di sopra di questo si raggiunge con azoto la pressione atmosferica. Il vantaggio di avere una

camera fredda per la tempra a gas è quello di poter inserire i pezzi da trattare in un ambiente che si trova già a temperatura ambiente senza quindi avere un fattore pesantissimo di inerzia come nel caso in cui la tempra venga eseguita nel medesimo forno dove è stata precedentemente eseguita la austenitizzazione. La fluidodinamica della cella di tempra a gas è ottimizzata da turbine a velocità variabile che, a differenza di impianti con a velocità fisse, permettono di adattare la drasticità del mezzo

temprante ottenendo velocità di spegnimento più adeguate su una vasta gamma dimensionale e/o geometrica. Il gas immesso a elevata pressione nella cella attraverso appositi ugelli, essendo la camera fredda inizialmente a temperatura ambiente, non si scalda per effetto del calore della camera e asporta calore solo dalla carica. La sua capacità di asportare calore è per questo enormemente superiore a parità di pressione e agitazione dell'aeriforme. Il gas una volta scaldatosi viene convogliato e raffreddato in appositi scambiatori di calore e una volta raffreddatosi viene di nuovo immesso nella cella. Il flusso di gas è regolato attraverso la velocità delle turbine. Il vantaggio quindi di poter regolare la velocità delle turbine è notevole perché permette di controllare la maggiore o minore sottrazione del calore dalla carica e quindi in funzione del tipo di acciaio, di poterne controllare la sua velocità di raffreddamento con effetti notevoli sulla tempra dei pezzi e sulla diminuzione delle deformazioni. Un vantaggio non meno rilevante della presenza nell'impianto di camere a freddo è quella legata alla minor necessità di manutenzione delle camere di cementazione i cui materiali di tenuta e di rivestimento (soprattutto la grafite) sarebbero viceversa sottoposti a continui shock termici e di pressione.

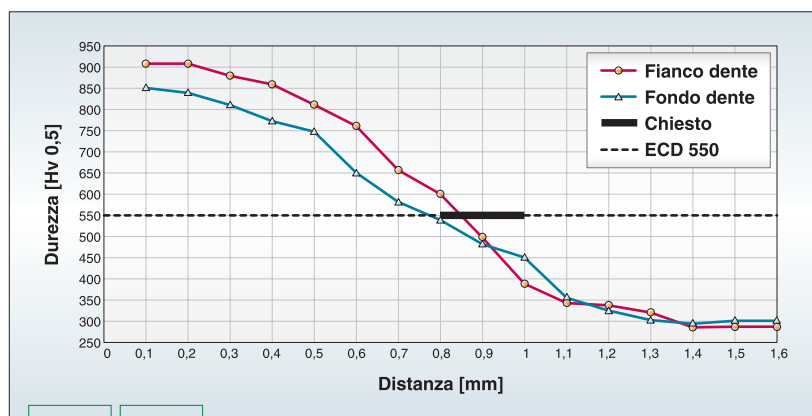


Figura 3. Profilo di durezza misurata sul fianco e sul fondo del dente.

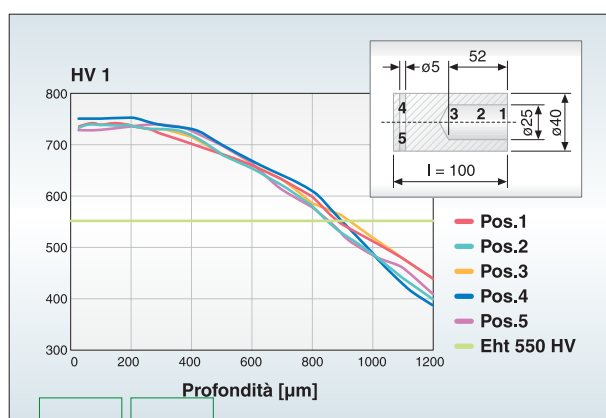


Figura 4. Profilo di durezza di alcuni punti nei fori.

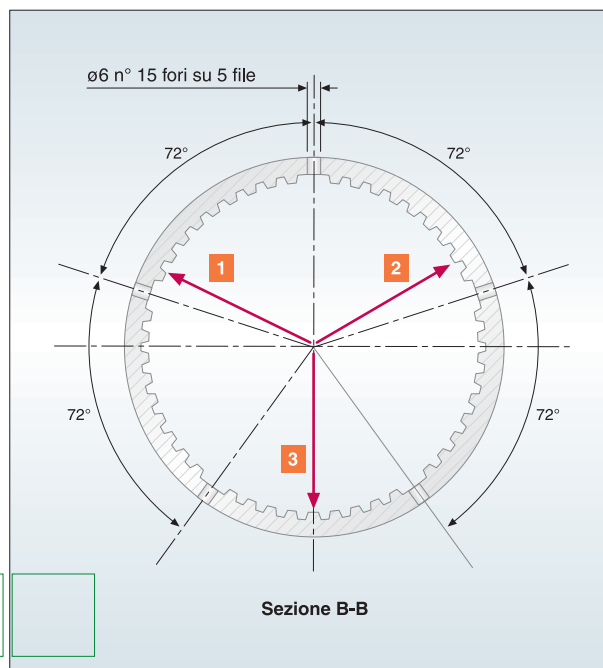


Figura 5. Freccie in blu: orientamento della geometria di rilievo su sezione trasversale. La sfera di controllo è in situ nella dentatura su fondo dente.

Lo spegnimento in gas a elevata pressione, unito al raffreddamento in camera fredda, assicura non solo una migliore qualità della superficie, anche e soprattutto un controllo e una riduzione delle distorsioni. Ciò comporta un ri-

sparmio per riduzione o annullamento dei tempi di rettifica.

I RISULTATI DEL PROCESSO

La figura 1 mostra una sezione di una corona conica in acciaio 16 MnCr5 sot-

toposta a trattamento di cementazione a bassa pressione sulla quale sono state condotte prove di durezza sul fianco del dente e sul fondo del dente (figura 2). La cementazione è stata effettuata a 940 °C e il tempo totale di cementazione e diffusione è stato di 155 min, mentre la tempra è stata eseguita a 880 °C per 30 min con successivo raffreddamento eseguito con azoto a 15 bar. La sezione del disegno identifica le aree critiche sottoposte alla sollecitazione da pitting, cioè l'evolvente, e il bendig,

ovvero il fondo. È anche identifico lo spigolo del case depth.

Come mostra il profilo di durezza (figura 3), si può osservare l'uniformità della cementazione sul fianco e sul fondo del dente e la profondità di cementazione a 550 HV rispettivamente per il fianco del dente di 0,85 mm e per il fondo del dente di 0,77 mm. Il processo di cementazione a bassa pressione, con l'utilizzo dell'acetilene come gas di reazione, offre anche la possibilità di cementare in modo uniforme fori passanti stretti e lunghi e, in egual misura, fori ciechi, come è visibile dalla figura 4. L'acciaio è il 18CrNiMo7-6, con profondità di induri-

Parametri	Valori
Descrizione pezzo	Corone lavorate da anello forgiato e ricotto
Materiale	20 Ni Cr 12
Temperatura di cementazione	960°C
Tempo totale	240 min
Tempra usata	Gas azoto a 18 bar - 3.600 giri/min velocità turbine
Temperature rinvenimento	175°C
Tempo di rinvenimento	120 min
Tempra usata	Gas azoto a 18 azoto
Temperature rinvenimento	175°C
Tempo di rinvenimento	120 min
Risultati	
Durezza superficie dopo tempra	65 HRC
Profondità di cementazione (550 HV)	0,79 mm
Durezza a cuore	32 HRC
Variazione profondità di cementazione nel carico	0,05 mm

Tabella 1. I valori di un tipico ciclo di trattamento a basse pressioni.

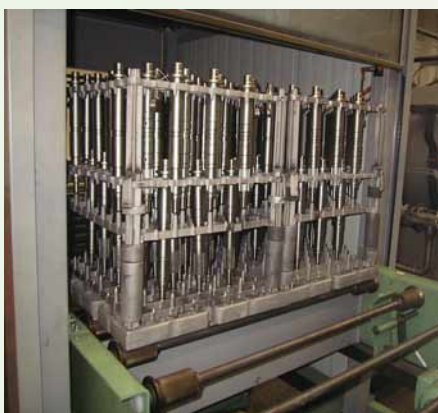
mento efficace richiesta di 0,7 - 0,9 mm. Da notare come il risultato della cementazione sia per il foro passante che per quello cieco sia molto uniforme. La cementazione a bassa pressione offre anche la possibilità di cementare materiali sinterizzati, che presentano una porosità residua danno luogo a difficoltà nei processi di cementazione gassosa per il fatto che la grande superficie dei canali di porosità produce la cementazione completa in un tempo brevissimo. La cementazione a bassa pressione, invece, ha il vantaggio di limitare la cementazione alla sola superficie del pezzo quando le dimensioni dei pori sono molto inferiori a 100 mm. In questo caso, il rapporto lunghezza/diametro è solitamente molto inferiore a 15 e il processo di cementazione a bassa pressione non permette la cementazione di questi piccolissimi 'fori ciechi', perché il gas cementante fresco non penetra nei pori. Inoltre, i brevissimi tempi di trattamento della cementazione a bassa pressione (qualche minuto soltanto) possono essere controllati molto meglio che nella cementazione gassosa convenzionale di pezzi sinterizzati.

ESEMPI DIMENSIONALI

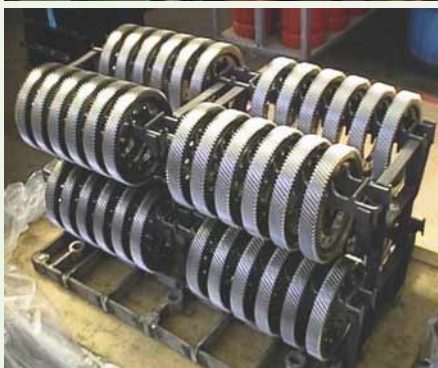
Su corone a denti dritti, con dentatura esterna e interna, sottoposte a un ciclo di cementazione a bassa pressione sono state effettuate da un'azienda che progetta e costruisce ingranaggi rilievi dimensionali prima e dopo il trattamento. La tabella 2 ne riporta i dati. I numeri 1, 2 e 3 indicano la posizione del rilievo lungo la circonferenza interna della dentatura con uno splitting di 120° (figura 5 e figura 6); le notazioni 'sopra' e 'sotto' sono invece le posizioni sulla lunghezza dell'intero dente alle due estremità. Le misure hanno quindi consentito di testare l'ovalizzazione, la conicità e la minorazione, ovvero la contrazione dimensionale. I due ingranaggi sono stati volutamente posizionati nella carica con differenti geometrie – corona A in verticale, corona B in senso orizzontale; ciò ha contribuito a una diversità anche nella variazione dimensionale. Di norma, un raffreddamento in olio può produrre alterazioni più consistenti, data l'impossibilità di regolare con precisione la fluidodinamica dell'asportazione del calore.

Alcuni risultati

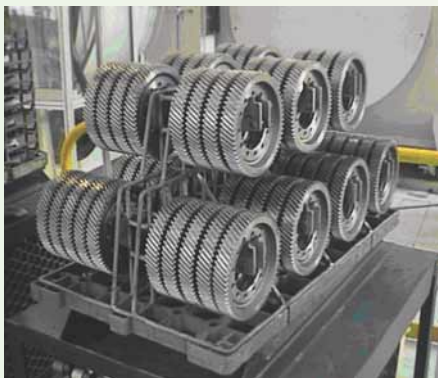
Di seguito vengono presentati i risultati di possibili applicazioni della cementazione a bassa pressione a partire da acciai tipicamente utilizzati nel processo di cementazione fino ad acciai tipicamente non da cementazione.



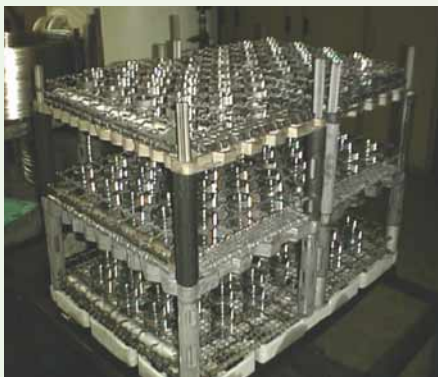
Particolare	Materiale	Peso della carica
Albero scanalato	20MoCr4	340 Kg
Ciclo	Temperatura	Tempo
Cementazione	960°C	2 h 30'
Tempra	15 bar N ₂	
Risultati	DC 550 HV = 0,6 mm	
	Durezza a cuore	320 HV30



Particolare	Materiale	Peso della carica
Corona	15CrNi6	250 Kg
Ciclo	Temperatura	Tempo
Cementazione	940°C	2 h
Tempra	20 bar N ₂	
Risultati	DC 550 HV = 0,6 mm	
	Durezza a cuore	360 HV30



Pezzo	Materiale	Peso della carica
Corona	27MnCr5	256 Kg
Ciclo	Temperatura	Tempo
Cementazione	960°C	1 h 53'
Tempra	8 bar N ₂	
Risultati	DC 650 HV = 0,5 - 0,6 mm	
	Durezza a cuore	440 HV30



Pezzo	Materiale	Peso della carica
Pignone	30CrMo4	283 Kg
Ciclo	Temperatura	Tempo
Cementazione	940°C	2 h 50'
Tempra	15 bar N ₂	
Risultati	DC 650 HV = 0,45 mm	
	Durezza a cuore	53 HRC

Corona A			
Prima del trattamento termico			
Posizione	1	2	3
misura sfere $\varnothing 6$	140,17	140,17	140,16
Dopo trattamento termico			
sopra	139,77	139,79	139,69
sotto	139,86	139,84	139,83
Ovalizzazione	0,1		
Conicità	0,14		
Minorazione	0,47		
Corona B			
Prima del trattamento termico			
Posizione	1	2	3
misura sfere $\varnothing 6$	140,04	140,00	140,06
Dopo trattamento termico			
sopra	139,86	139,84	139,96
sotto	140,07	140,07	140,10
Ovalizzazione	0,1		
Conicità	0,23		
Minorazione	0,18		

Tabella 2. Corone a denti dritti sottoposte a cementazione prima e dopo il trattamento.

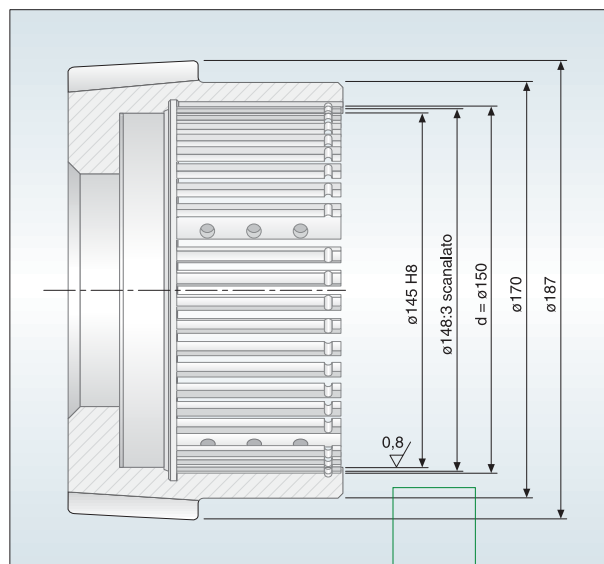


Figura 6. I due punti notati in blu sono le due zone testate lungo il dente e indicate come 'sopra', in prossimità della variazione di sezione, e 'sotto', in prossimità del piano parallelo che funge da base.

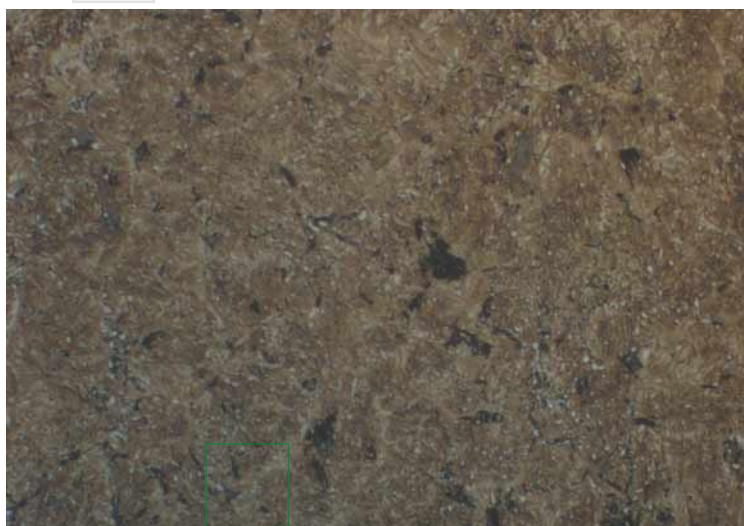


Figura 7. Martensite e isole di bainite sparse.



Figura 8. Martensite completa.

ACCIAI A BASSA TEMPERABILITÀ

Un aspetto importante di quanto si può ottenere con questo tipo di impianto lo si vede mettendo a confronto due casi con massa di carica identica: componente automotive progettato in 100Cr6 e trattato in forno sottovuoto con spegnimento a 20 bar in elio, insufflaggio del gas in camera ancora in temperatura di austenitizzazione; medesimo componente automotive in 100Cr6 trattato nell'impianto con spegnimento in camera fredda con azoto a 15 bar. Lo spessore medio massimo del particolare è di 16 mm. Sono state confrontate

durezze e strutture su campioni prelevati a centro carica. Le figura 7 e figura 8 documentano l'esame dopo tempra e mettono alla luce i vantaggi impiantistici. Il confronto, oltre a mettere in evidenza la criticità nell'eseguire una tempra in gas su questo acciaio già quando le dimensioni superano i 15 mm, chiarisce la risoluzione delle problematiche sfruttando le potenzialità dello scambio termico immediato nella camera fredda. Infatti, nonostante le piccole dimensioni del manufatto, le considerevoli maggiori proprietà dell'elio nell'asportare calore e l'elevata pressione scelta, la trasformazione strutturale non è perfettamente completa; al contrario una pressione regolarizzata camera fredda con azoto produce una morfologia martensitica totale. Ne ri-

sulta, in conclusione, un estremo vantaggio per tutte quelle applicazioni dove i capitolati indicano una trattamento sottovuoto su tutti i materiali di bassa temprabilità, non solo il 100Cr6, e che esigono complete caratteristiche strutturali e variazioni dimensionali contenute.

Daniele Canziani svolge la propria attività presso il Politecnico di Milano, Luigi Cislaghi è Analyst manager di T.T.N. e Marco Pirovano è Chief executive officer di T.T.N.