

# Un approccio predittivo al design degli acciai da cementazione

R. Valentini, V. Colla, L. Bacchi, E. Morgano

Viene proposto un nuovo approccio per la progettazione di componenti in acciaio da cementazione per applicazioni automobilistiche realizzati attraverso il processo di carburazione a gas a bassa pressione. Tale approccio si basa sull'identificazione della curva di temprabilità equivalente desiderata per conferire al componente le caratteristiche desiderate e sull'impegno di strumenti numerici per associare il profilo di durezza Jominy target completo alla composizione chimica necessaria per realizzarlo. Vengono inoltre impiegati strumenti numerici data-driven anche per la stima dei diagrammi di Continuous Cooling Transformation dell'acciaio considerato. Tali strumenti si rivelano efficaci nel supportare il rispetto dei severi standard di riferimento per l'applicazione considerata. I risultati sono stati validati attraverso indagini metallografiche e profili di temprabilità sperimentale, che mostrano un buon accordo tra simulazione e risultati sperimentali, dimostrando la validità dell'approccio proposto.

**PAROLE CHIAVE:** ACCIAI DA CEMENTAZIONE, RETI NEURALI, MODELLI PREDITTIVI, DIAGRAMMI CCT, PROFILO JOMINY.;

## INTRODUZIONE

Il processo di cementazione è un trattamento superficiale applicato solitamente ad acciai a basso tenore di carbonio per assicurare una buona tenacità dopo la bonifica e, allo stesso tempo, una elevata resistenza a usura, a fatica e al danneggiamento superficiale [1, 2]. Talvolta vengono aggiunti elementi di lega come Cr-Ni, Cr-Mo o Mn-Cr, per raggiungere una migliore temprabilità e quindi struttura completamente martensitica dopo tempra.

Il processo di cementazione è utile per applicazioni impegnative quali ad esempio ingranaggi per la trasmissione e alberi a camme [3]. Questo processo termomeccanico consiste in due fasi principali: innanzitutto il componente viene scaldato fino ad arrivare in campo austenitico per favorire l'arricchimento di carbonio nella superficie e la sua diffusione verso l'interno (favorita dal gradiente di concentrazione), segue poi il trattamento di tempra e rinvenimento.

La velocità è un punto chiave nella cementazione e l'arricchimento è un processo che richiede tempo, per questo motivo negli anni sono stati fatti alcuni tentativi per ridurre il tempo di processo aumentando la temperatura e al contempo cercando di mantenere sotto controllo la crescita dei grani.

**R. Valentini**

Università di Pisa

**V. Colla**

Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa

**L. Bacchi**

Letomec s.r.l., Pisa

**E. Morgano**

SILCO s.r.l., Rivalta (TO)

Proprio per questo, sono stati sviluppati modelli che riproducessero la distribuzione di carbonio nei pezzi cementati, tenendo in considerazione l'influenza dei precipitati [4], oltre che la chimica del metallo che è fondamentale per raggiungere le proprietà volute. Per esempio i comuni accia per ingranaggeria sono microlegati con alluminio e quindi non sono idonei a processi di carburazione ad alte temperature a causa della eccessiva crescita dei grani [5]. Ad oggi, esistono varie tecniche di cementazione, solida, a bagno di Sali e gassosa. Tra queste, la cementazione gassosa è quella più applicata grazie al notevole controllo di processo e velocità. In questo caso l'atmosfera carburigena consiste in idrocarburi dissociati come propano, metano o acetilene.

Un approccio abbastanza innovativo è poi la cementazione in gas a bassa pressione (LPC), che viene appunto eseguita in idrocarburi gassosi a pressione molto bassa e viene seguita poi da una tempra in gas ad alta pressione [6]. La messa a punto dei parametri di processo determina l'evoluzione microstrutturale dell'acciaio, come descritto in alcuni studi recenti [7], si ottiene una buona efficienza eseguendo una serie di piccoli boost.

Attualmente il processo LPC assicura caratteristiche meccaniche omogenee, ridotto contenuto di austenite residua, basse deformazioni e assenza di ossidazione superficiale. Oltre a benefici metallurgici poi, si hanno anche vantaggi economici quali una maggiore flessibilità degli impianti, inoltre non serve l'olio di tempra per cui si evitano anche i relativi problemi di smaltimento e pulizia delle superfici con conseguente risparmio sui prodotti per la pulizia. Tutti questi vantaggi consentono una riduzione del costo stimata intorno al 30% in confronto all'approccio standard [8].

I requisiti specifici su componenti cementati, solitamente riguardano la temprabilità e quindi la curva Jominy del materiale (ad esempio in FCA lo standard dedicato a 27MnCr5 [9]).

In letteratura è già stata analizzata la correlazione fra le curve di temprabilità e la microstruttura di una classe di acciai per cementazione [10]. Tuttavia, sia la temprabilità che la microstruttura sono pesantemente influenzate dalla composizione chimica e, in particolar modo, dal contenuto di elementi microleganti. Ecco che, da un punto di vista industriale, la disponibilità di uno strumento di simulazio-

ne pratico per stimare la temprabilità può rendersi molto utile in fase progettazione della chimica di un acciaio per cementazione. Soprattutto se in grado di suggerire la chimica più idonea a raggiungere una certa curva Jominy target. Consentendo un miglioramento della risposta alla domanda del cliente e una riduzione costi.

La letteratura presenta numerosi modelli data-driven per la stima della curva di temprabilità, ad esempio le Reti Neurali Artificiali (ANN) sono state ampiamente utilizzate a partire dagli anni '90 per prevedere le curve Jominy in funzione della chimica e talvolta anche dei parametri di processo [11-14]. Più recentemente, è stato sviluppato un predittore a struttura gerarchica [15-16], costituito da un insieme di ANN connesse in cascata e ciascuna specializzata nella previsione di un punto della curva, giacché gli input di ciascuna ANN sono le frazioni di alcuni elementi di lega ed alcuni valori di durezza relativi ai punti precedentemente stimati del profilo Jominy. Tale predittore, addestrato e validato su un database di prove Jominy industriali e relative composizioni chimiche, è stato successivamente integrato in un sistema di ottimizzazione della composizione chimica dell'acciaio basato su algoritmi genetici (GA) denominato JoMiner [17]. JoMiner, data una curva Jominy di riferimento, suggerisce la composizione chimica più idonea a ottenere tale profilo. L'ottimizzazione può essere eseguita secondo diversi criteri, che possono includere sia una tolleranza prefissata su ciascun punto sia criteri di costo e/o impatto ambientale degli elementi di lega adottati.

Nel presente studio, dedicato alla realizzazione di un ingranaggio soggetto a LPC, è stato fatto un passo avanti nell'utilizzo di strumenti data-driven a supporto della progettazione della chimica dell'acciaio da cementazione, al fine di migliorare la performance del componente aggiornando il materiale e il trattamento.

Nel presente studio è stato utilizzato il metodo del Jominy equivalente per determinare la curva Jominy necessaria a migliorare il profilo di durezza del componente reale, inizialmente prodotto in 17NiCrMoS6-4. Tramite JoMiner è stata poi ottimizzata la chimica dell'acciaio LPC, individuando così una composizione idonea a soddisfare i requisiti della applicazione considerata in termini di profilo Jominy. Sfruttando un secondo modello data-driven, anch'esso sviluppato dagli autori [18], sono state estrapo-

late le curve Continuous Cooling Transformation (CCT) dell'acciaio, al fine di definire un ciclo termico adeguato a raggiungere la microstruttura e le proprietà meccaniche volute. Infine, considerando la coerenza fra la chimica predetta dagli strumenti predittivi e le specifiche, è stata realizzata una colata di prova, validando la metodologia con un'analisi metallografica del componente prodotto e valutazione sperimentale del profilo di durezza. Lo studio ha così mostrato che sistemi di simulazione di tipo data-driven, accoppiati con un predittore di curve Jominy ANN, possono effettivamente offrire supporto alla progettazione di acciai da cementazione.

## MATERIALI E METODI

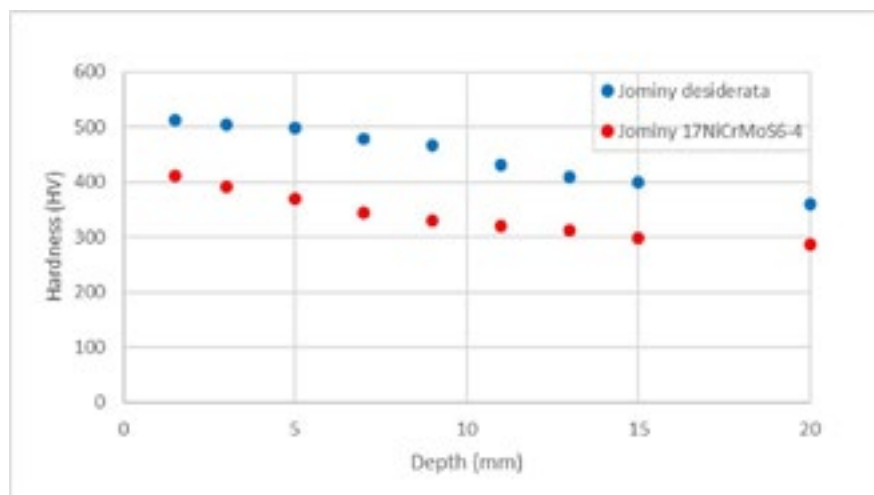
Utilizzando il metodo del Jominy equivalente è stato possibile determinare la curva Jominy del materiale in grado

di restituire un certo profilo di durezza nel componente finito, in particolare un ingranaggio per applicazione automotive attualmente realizzato in 17NiCrMoS6-4.

L'approccio del Jominy equivalente consiste nel determinare sperimentalmente l'equivalenza fra il profilo di durezza di un componente reale, prodotto secondo determinate condizioni, e la curva Jominy del materiale considerato. Conseguentemente, il profilo di durezza desiderato può essere rapportato a un requisito sulla curva Jominy [19].

Il profilo di durezza del fianco del dente dell'ingranaggio in oggetto, realizzato in 17NiCrMoS6-4, è stato misurato prima del trattamento di cementazione con prova micro-Vickers applicando un carico di 1kg.

In figura 1 sono riportati sia il profilo corrente sia il profilo desiderato.



**Fig.1** - Profilo di durezza sul fianco del dente dell'ingranaggio realizzato in 17NiCrMoS6-4 (rosso) e i valori desiderati (blu) / Hardness profile on gearbox realized with steel 17NiCrMoS6-4 (red dots) and new requirements (blue dots).

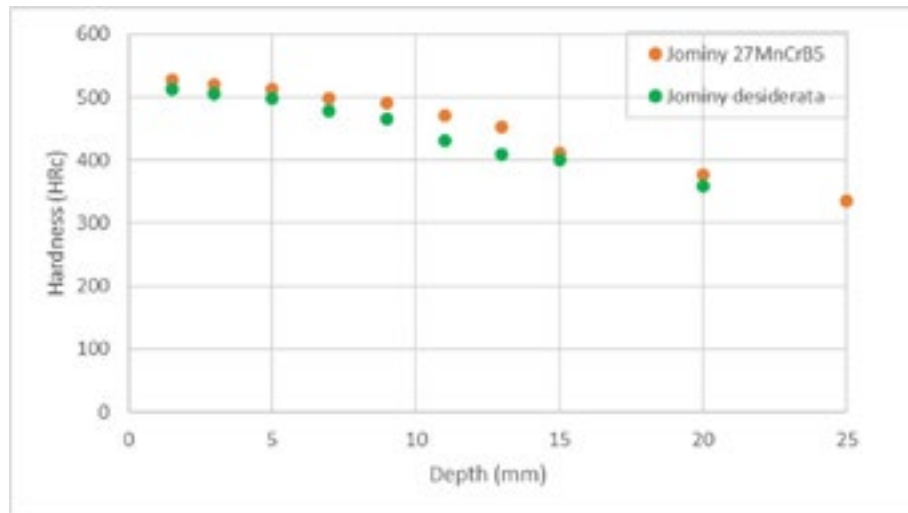
JoMiner è stato utilizzato per stimare la composizione chimica ideale dell'acciaio corrispondente alla curva Jominy desiderata e, successivamente, sono state valutate una serie di chimiche di acciai corrispondenti.

L'ottimizzazione è stata quindi eseguita per andare incontro alle specifiche del cliente, utilizzando come vincoli l'errore commesso sui primi 4 punti della curva e il costo degli elementi di lega, evitando quindi elementi come il nichel o il molibdeno. La composizione chimica risultato di questo processo è conforme a un acciaio 27MnCrB5 (figura 2).

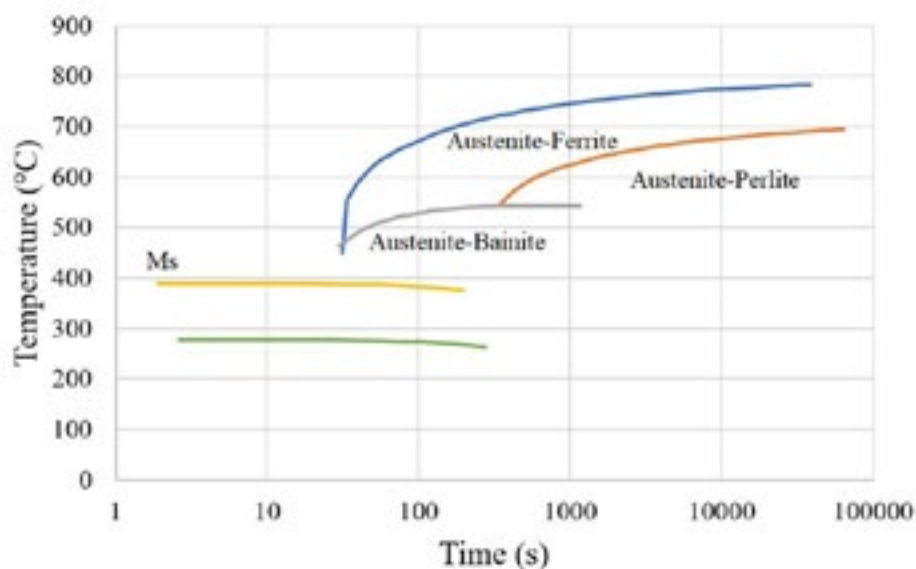
Una volta trovata una buona coerenza fra le curve Jominy, è stato ulteriormente affinata la valutazione andando a stimare le proprietà meccaniche e la microstruttura in funzione della velocità di raffreddamento. Per fare questo, le curve CCT sono state calcolate tramite un modello data-driven [17] e basato sull'approccio di Wierszyllowski [20] per la definizione del tempo di inizio trasformazione bainitica e ferritica. Per temperature inferiori viene utilizzato un modello basato sull'equazione di Koistinen and Marburger [20] per determinare la cinetica della trasformazione martensitica. La temperatura di Bainite Start ( $B_s$ )

è calcolata sulla base della chimica dell'acciaio tramite equazioni di letteratura, mentre quella di Martensite Start ( $M_s$ ) si calcola da ulteriore modello di regressione lineare

messso a punto su dati sperimentali. In figura 3 è riportato il diagramma CCT stimato.



**Fig.2** - curva Jominy dell'acciaio 27MnCr5 (arancione) e curva desiderata (verde) / Jominy curve of 25MnCr5 steel (orange dots) and new requirements (green dots).



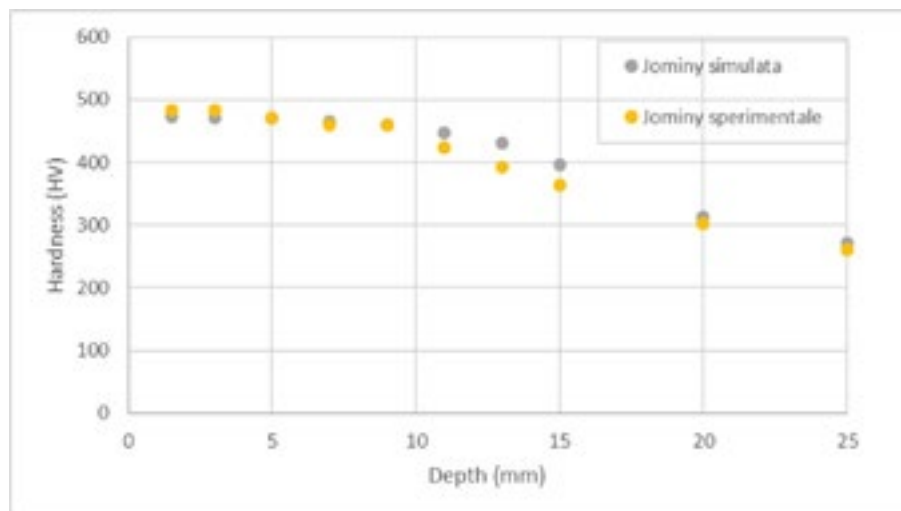
**Fig.3** - Diagramma CCT stimato per la colata selezionata / Estimated CCT diagrams for the selected casting.

È stata quindi prodotta una colata di prova di un acciaio al Cr-Mo-B, in particolare il 27MnCrB5. Su tale colata è stata quindi eseguita una prova Jominy sperimentale in accordo alla ASTM A255. La composizione chimica della cola-

ta è riportata in tabella 1, inoltre in figura 4 è riportato il confronto fra il profilo Jominy simulato e i valori ottenuti sperimentalmente.

**Tab.1** - Composizione chimica della colata sperimentale (contenuti espressi in massa%) / Chemical analysis of the considered casting (contents are expressed in wt%).

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	Nb	Ti	B
0.25	1.21	0.24	0.012	0.020	0.34	0.06	0.01	0.19	0.024	0.004	0.001	0.05	0.003

**Fig.4** - curva Jominy simulata vs curva reale della prova Jominy eseguita sulla colata di prova per acciaio 27MnCr5 / Estimated vs real Jominy curves for the selected casting.

La stessa colata è stata poi utilizzata per la produzione dell'ingranaggio, sul quale è stato poi eseguito il processo di cementazione in bassa pressione e tempra in gas. Al termine è stato anche eseguito il tipico trattamento di distensione a 180°C. Successivamente, dal componente sono stati prelevati alcuni campioni per l'analisi metallografica e la misura del profilo di durezza, necessari al fine di validare il processo.

## RISULTATI

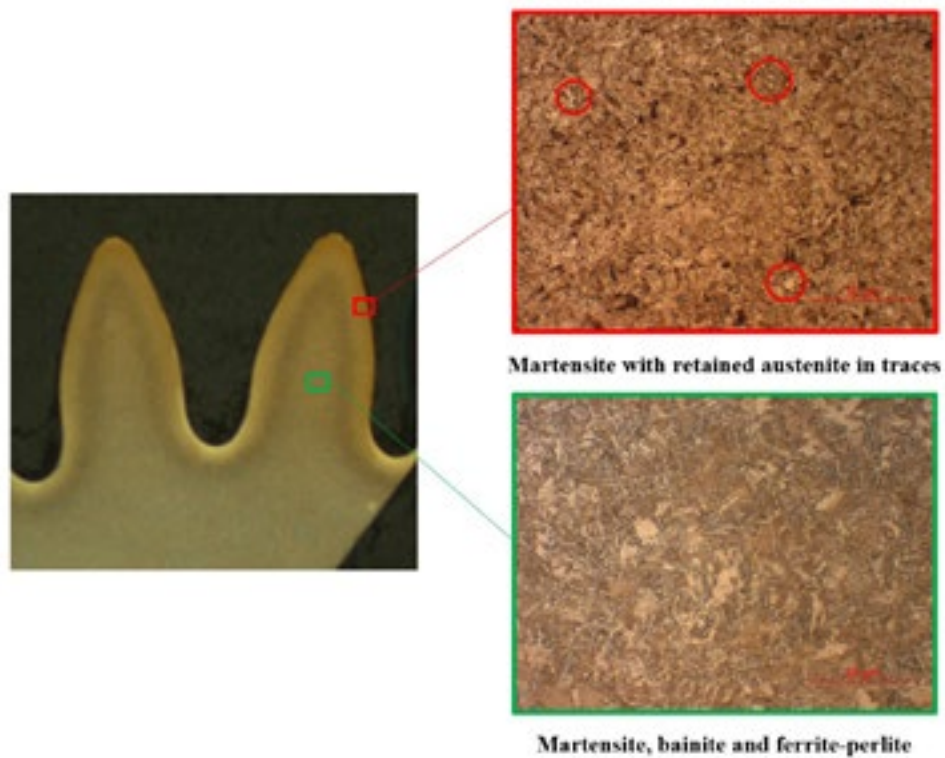
La microstruttura finale è stata valutata sia sulla superficie del fianco del dente sia in profondità, previo attacco metallografico Nital. La figura 5 mostra uno strato cementato interamente martensitico con alcune tracce di austenite residua, mentre l'interno è caratterizzato da martensite mista a bainite.

Il profilo di durezza è stato quindi misurato mediante me-

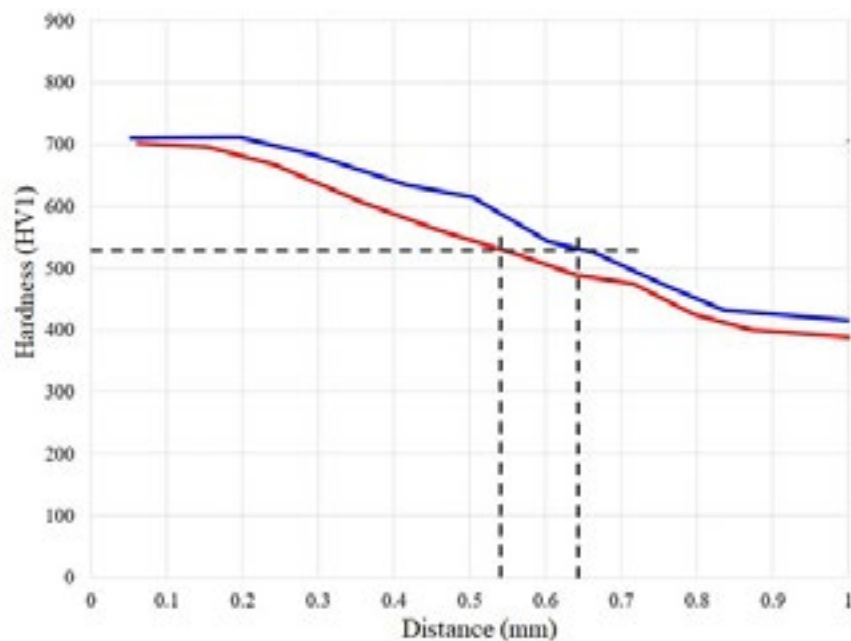
todo Vickers, applicando un carico di 1kg. il test è stato eseguito sia sul fianco del dente sia nella zona di raccordo alla base del dente. I risultati sono riassunti in figura 6.

Assumendo un contenuto di carbonio stimato di circa 0.80-0.85% nello strato cementato, la durezza che si estrapola è pari a circa 850HV [21]. Il contenuto di carbonio è stato poi misurato, risultando pari a 0.83%, la durezza relativa è risultata leggermente inferiore a quanto atteso, compatibilmente con la presenza di tracce di austenite residua. La profondità effettiva di cementazione, corrispondente a 525HV, è stata inoltre misurata ed è risultata corrispondente a 0.55-0.65mm.

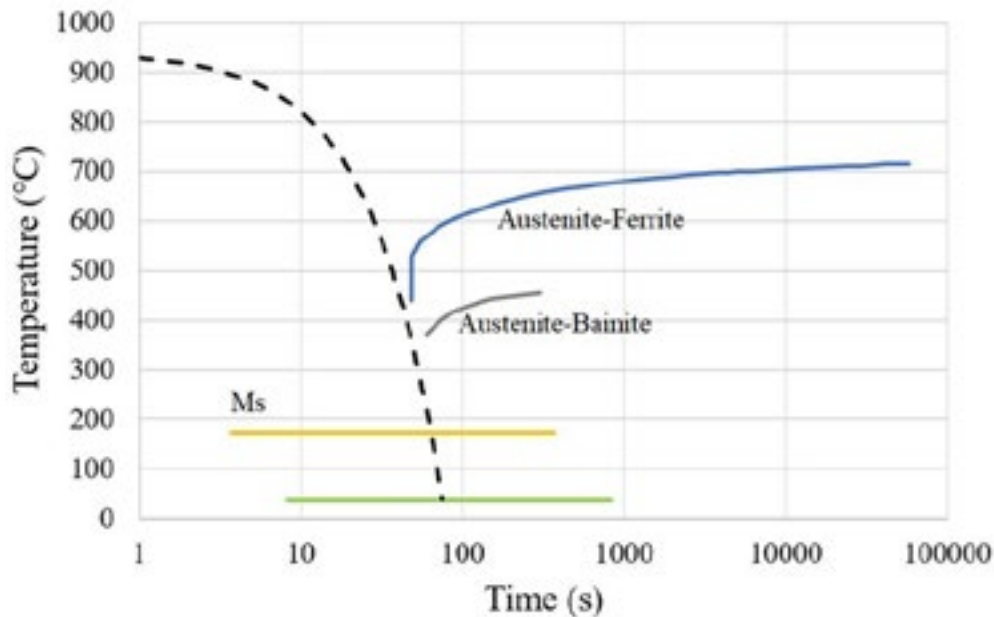
Il diagramma CCT è stato conseguentemente simulato anche per lo stato cementato utilizzando la specifica composizione chimica (figura 7).



**Fig.5** - Immagine al microscopio ottico della sezione dell'ingranaggio prodotto post processo di cementazione e relative analisi metallografiche in superficie e a cuore / Microscope image of gear box tooth section after CH with micrographs of the case-hardened surface and of the inner core.



**Fig.6** - Profilo di micro durezza Vickers sul fianco del dente (blu) e sul raccordo alla base del dente (rosso) / Hardness profile assessed through micro-Vickers method on tooth flank (blue line) and radius area (red line).



**Fig.7** - Curve CCT stimate per la composizione chimica dello strato cementato / Estimated CCT diagrams for the chemical composition of the carburized film.

Assumendo un rateo di raffreddamento pari a  $12^{\circ}\text{C/s}$  (rappresentato dalla linea tratteggiata in figura 7), la microstruttura finale restituita dalla simulazione mediante un modello data-driven, include una frazione di austenite residua del 6-8% nella microstruttura finale, con martensite la restante parte. La misura del contenuto di austenite residua è essenziale per garantire un trattamento di pallinatura adeguato e conseguentemente le tensioni residue di compressione. La misura sperimentale è stata eseguita mediante diffrattometria a raggi X.

## CONCLUSIONI

Questa memoria propone un approccio innovativo per l'ottimizzazione di processi di cementazione in bassa pressione e per la definizione dei range di composizione chimica in funzione di specifiche da rispettare, basate su proprietà desiderate e/o vincoli economici.

La presente analisi è stata supportata da due strumenti data-driven, il primo per la previsione del profilo Jominy e determinazione della chimica ottimale al raggiungimento di una certa forma target della curva, l'altro per la determinazione dei diagrammi CCT.

Il primo strumento ha consentito di identificare gli acciai

al Mn-Cr-B per la specifica applicazione, evitando così elementi costosi quali nichel e molibdeno. Il secondo strumento ha fornito i valori delle caratteristiche meccaniche e la microstruttura dei vari punti del componente di cui sono state estrapolate le velocità di raffreddamento grazie al confronto con la curva Jominy.

È stato quindi realizzato un componente reale, in particolare un ingranaggio per applicazioni automotive, il quale è stato analizzato mediante analisi metallografiche e profilo di durezza, evidenziando l'effettiva profondità di cementazione. Il contenuto di austenite residua è molto importante per garantire un adeguato trattamento di pallinatura e ottenere adeguati livelli di tensioni residue di compressione sulla superficie. Ecco che la differenza di durezza nell'area di interesse e nel resto del componente deve essere inferiore ai 50HV. Sia il profilo di durezza sperimentale che le curve CCT stimate con la simulazione, indicano una piccola frazione di austenite residue nello strato cementato, in accordo ai range di accettabilità del controllo qualità del prodotto. La suddetta procedura ha quindi consentito di confermare la bontà della metodologia proposta.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Schmid, M. Kluge, E. Roos, Fatigue strength under vibratory stresses and notch reduction of casehardened steel 25Mocr4 depending on various manufacturing processes for hollow transmission shafts, *Steel Research International*, 82 (11), pp. 1278-1286 (2011).
- [2] Y.-G. Cao, L. Xu, G.-Q. Zhang, J. Shi, M.-Q. Wang, Rolling Contact Fatigue Properties of SAE 8620 Steel after Case Carburizing, *Journal of Iron and Steel Research International*, 23 (7), pp. 711-716 (2016).
- [3] G. Kripak, M. Sharma, R. Kohlmann, B. Clausen, U. Prah, H.-W. Zoch, W. Bleck, Development of an aluminium-reduced niobium-microalloyed case hardening steel for heavy gear manufacturing, *HTM - Journal of Heat Treatment and Materials*, 74 (1), pp. 36-49 (2019).
- [4] J. Rudnizki, B. Zeislmaier, U. Prah, W. Bleck, Thermodynamical simulation of carbon profiles and precipitation evolution during high temperature case hardening, *Steel Research International*, 81 (6), pp. 472-476 (2010).
- [5] Y.-H. Yang, M.-Q. Wang, J.-C. Chen, H. Dong, Microstructure and mechanical properties of gear steels after high temperature carburization, *Journal of Iron and Steel Research International*, 20 (12), pp. 140-145. (2013).
- [6] M. Dahlström, M. Larsson, Y. Giraud, High performance PM components heat treated by low pressure carburizing and gas quenching, *Int. Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM* (2013).
- [7] O.B. Tapar, M. Steinbacher, J. Gibmeier, J. Epp, Investigation of the Effects of Low-Pressure Carburizing Process Parameters on Microstructural Evolution by Means of In Situ Synchrotron X-Ray Diffraction, *Advanced Engineering Materials* (2021).
- [8] G. Hiller, Advantages of low-pressure carburising and high-pressure gas quenching technology in manufacturing, *Int. Heat Treat. Surf. Eng.*, 8(1) 35-41 (2014).
- [9] Fiat Group Automobiles standard 52414. Acciai da Cementazione Acciai al Manganese – Cromo (2010).
- [10] S.R. Elmi Hosseini, H. Khosravi, R. Sohrabi, Z. Hosseini, E. Zohour Karimi, M. Makarem, Correlation between hardenability curves and microstructure of a cementation steel carburized in the presence of  $Na_2CO_3$  as an energizer material, *ISIJ International*, 53 (12), pp. 2213-2217 (2013).
- [11] B. Chan, M. Bibby, N. Holtz, Predicting HAZ hardness with artificial neural networks. *Can. Metall. Quart.* 34(4) 353-356 (1995).
- [12] W.G. Vermeulen, P.J. Van Der Wolk, A.P. De Weijer, S. Van Der Zwaag, Prediction of jominy hardness profiles of steels using artificial neural networks. *J. Mater. Eng. Perform.* 5(1): 57-63 (1996).
- [13] L.A. Dobrzański, W. Sitek, Modelling of hardenability using neural networks. *J. Mater. Process. Tech.*, 92-93, pp 8-14 (1999).
- [14] V. Colla, L.M. Reyneri, M. Sgarbi, Neuro-wavelet parametric characterization of Jominy profiles of steels. *Integr. Comput.-Aid.E.* 7(3), pp 217-228 (2000).
- [15] S. Cateni, V. Colla, M. Vannucci, M. Vannocci, Prediction of steel hardenability and related reliability through neural networks. *IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, AIA*, 169-174 (2013).
- [16] V. Colla, M. Vannucci, L. Bacchi, R. Valentini, Neural networks-based prediction of hardenability of high-performance carburizing steels for automotive applications, *Metall. Ital.*, 112(1), 47-53 (2020).
- [17] M. Vannucci, V. Colla, Automatic steel grades design for Jominy profile achievement through neural networks and genetic algorithms, *Neural Computing and Applications* 13(23), 16451-16470 (2021).
- [18] V. Colla, M. Desanctis, A. Dimatteo, G. Lovicu, R. Valentini, Prediction of continuous cooling transformation diagrams for dual-phase steels from the intercritical region, *Metall. Mater. Trans. A.*, 42(9) 2781-2793 (2011).
- [19] R.C: Sharma, Principles of heat treatment of steels, pp 202 (1996).
- [20] I.A. Wierszylowski The effect of the thermal path to reach isothermal temperature on transformation kinetics. *Metall. Mater. Trans. A.* 22A, 993-999 (1991).
- [21] Hardness and Hardenability of Steels, *ASM Handbook* (2013).



# A predictive approach to case hardening steel design

A novel approach for case hardening steel design in automotive application is proposed. Such approach is based on the identification of the desired equivalent hardenability curve to provide the component with the desired characteristics and on the use of numerical tools to associate the complete Jominy target hardness profile to the required chemical composition. Moreover, data-driven numerical tools are applied to estimate Continuous Cooling Transformation diagrams of this steel. These tools are effective in supporting compliance with the strict reference standards for the considered application. The results were validated through metallographic investigations and experimental hardenability profiles, which show a good agreement between simulation and experimental results, demonstrating the validity of the proposed approach

**KEYWORDS:** CASE HARDENING STEELS, NEURAL NETWORKS, MATERIAL PROPERTIES PREDICTION, CONTINUOUS COOLING TRANSFORMATION DIAGRAMS, JOMINY PROFILE;

[TORNA ALL'INDICE >](#)