



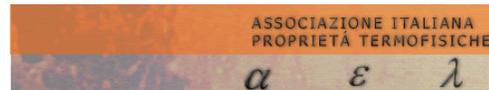
POLITECNICO DI TORINO



Microstruttura e proprietà termofisiche degli acciai per bonifica

Applicazioni per la simulazione ed ottimizzazione della tempra

Paolo Matteis



Questo intervento si iscrive nel contesto di un insieme di attività di ricerca svolte, presso il Politecnico di Torino, dal Prof. G. Ruscica e dall'Ing. E. Campagnoli (proprietà termofisiche dei materiali), nonché dal gruppo di ricerca del Prof. D. Firrao (proprietà meccaniche e metallurgiche di acciai legati), anche nell'ambito di un più ampio Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale (PRIN 2003091205).

Alcune misure di diffusività termica, presentate nel seguito, sono state svolte durante la tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica di O. Spilotro.

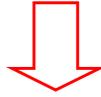
Richieste o commenti riguardanti questo intervento possono essere rivolte ai seguenti indirizzi.

Paolo Matteis (in specie per quanto concerne microstrutture e proprietà degli acciai). Dipartimento di Scienza dei Materiali ed Ingegneria Chimica, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, Torino. Telefono +390115644711, fax +390115644699, e-mail paolo.matteis@polito.it.

Elena Campagnoli (in specie per quanto concerne l'esecuzione di misure di diffusività termica). Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, Torino. Telefono +39011564506, fax +390115644499, e-mail elena.campagnoli@polito.it.

Impieghi delle misure di proprietà termofisiche

- Progettazione ed esercizio di componenti finiti
oppure
- **Simulazione ed ottimizzazione di processi di produzione**

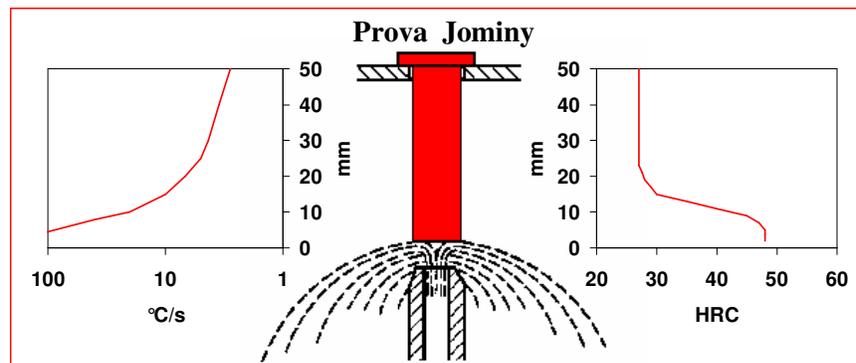


Acciai da bonifica

- Le velocità di raffreddamento di tempra sono determinate dal mezzo temprante, dalla geometria e dalle **proprietà termofisiche** dell'acciaio
- Le medesime velocità determinano (in relazione alla temprabilità dell'acciaio) il risultato finale della bonifica.

Le misure di proprietà termofisiche possono essere impiegate non solo per la progettazione e per l'esercizio di componenti finiti, ma anche nel corso della ottimizzazione di processi di produzione (ovvero di trasformazione) di tipo termofisico. I trattamenti termici degli acciai sono un esempio di quest'ultima possibilità. In particolare, il risultato finale della bonifica di un acciaio dipende in modo significativo dalle sue proprietà termofisiche (diffusività termica α e conduttività termica λ), le quali contribuiscono a determinare le velocità di raffreddamento di tempra e quindi concorrono (insieme alla temprabilità) a determinare il risultato della tempra. D'altra parte, la tempra è il passo più critico del processo di bonifica, poiché, contrariamente all'austenitizzazione ed al rinvenimento, è un fenomeno di tipo transitorio che può conseguire risultati molto diversi e disomogenei, particolarmente in funzione della geometria, del punto considerato, del mezzo di tempra e delle proprietà dell'acciaio.

Analisi quantitativa della tempra – metodi tradizionali (I)



Analisi quantitativa tradizionale:

- soluzione analitica della conduzione del calore
- calcolo di 1 parametro di raffreddamento (v_{700} oppure $t_{1/2}$)
- equivalenza tra un punto di un pezzo temprato ed una distanza Jominy

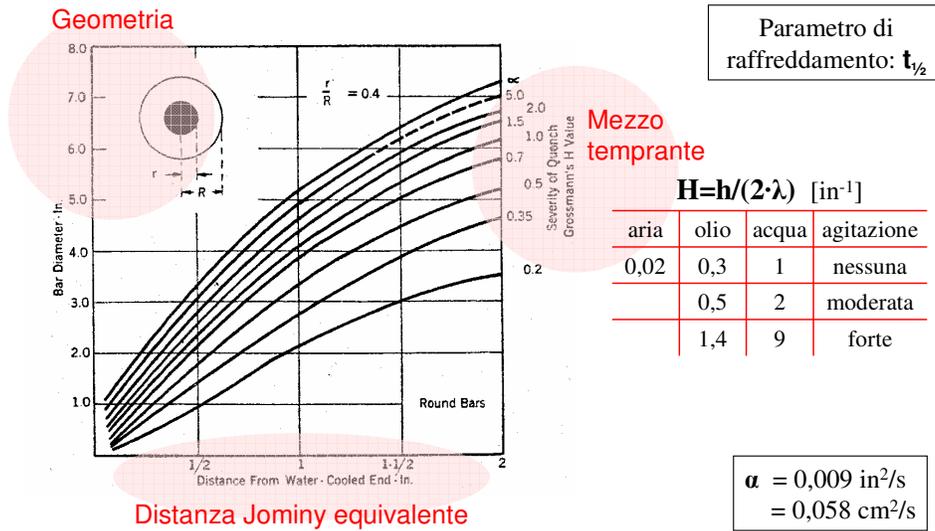
L'analisi quantitativa della tempra tradizionalmente è rivolta a determinare la durezza dopo tempra, in funzione della posizione entro il pezzo temprato.

La prova Jominy (norma UNI EN ISO 642:2003), impiegata da oltre 60 anni, consiste nel raffreddare con un getto d'acqua (di caratteristiche normate) l'estremità di un cilindro di acciaio precedentemente austenitizzato, di diametro 25 mm e lunghezza 100 mm, e nel misurare la durezza ottenuta in funzione della distanza dall'estremità temprata (distanza Jominy). La durezza decresce, in funzione della distanza Jominy, perché si verificano microstrutture diverse al decrescere della velocità di raffreddamento.

L'analisi quantitativa tradizionale della tempra viene svolta confrontando un punto in un pezzo con una distanza Jominy. Si considerano equivalenti punti in cui un parametro, caratteristico del raffreddamento, è uguale. Per determinare tale parametro nel pezzo e nel punto in esame si impiegano soluzioni analitiche approssimate della conduzione del calore.

Due parametri caratteristici del raffreddamento, frequentemente impiegati, sono la velocità di raffreddamento a 700 °C, v_{700} , ed il tempo di dimezzamento della differenza di temperatura (differenza tra la temperatura del punto e quella del mezzo di tempra), $t_{1/2}$.

Analisi quantitativa della tempra – metodi tradizionali (II)



J.L. Lamont. How to estimate hardening depth in bars. The Iron Age, Oct. 14, 1943, 64-70.

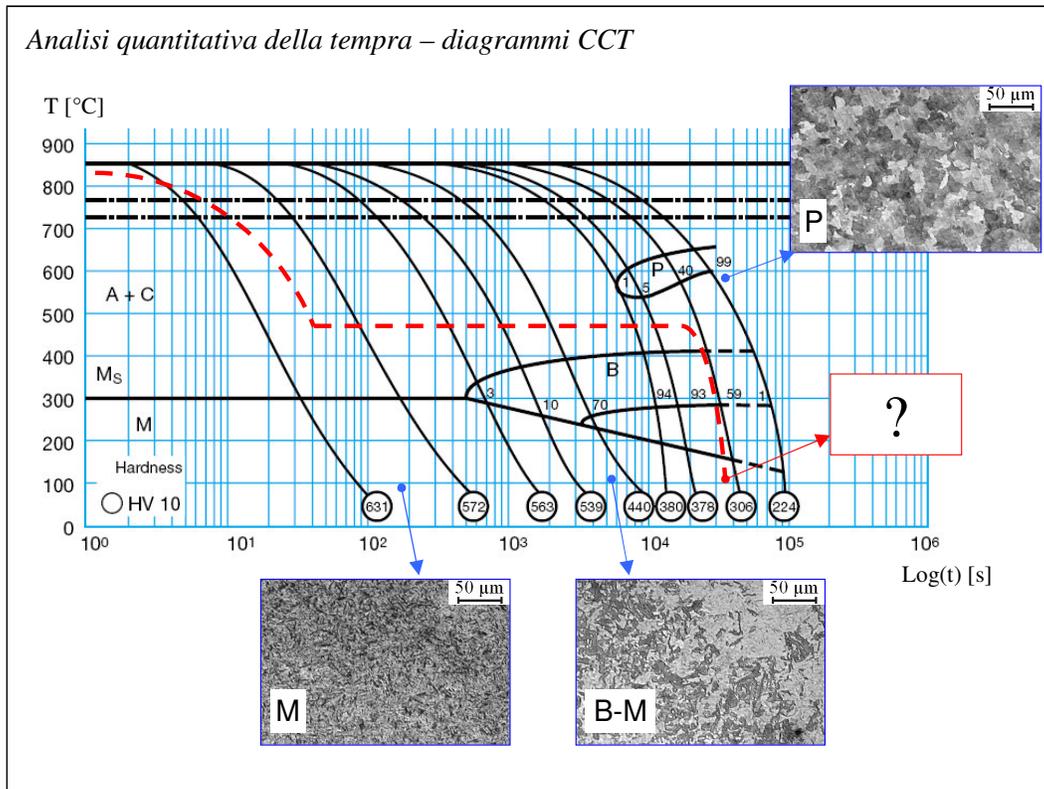
Con l'approccio precedentemente descritto, sono state redatte, fin dagli anni '40, raccolte di diagrammi che consentono di determinare rapidamente la distanza Jominy equivalente ad un punto specifico entro un pezzo in acciaio di geometria semplice. Questi diagrammi sono tuttora usati per calcoli di prima approssimazione. Per esempio, si riporta uno dei diagrammi pubblicati da Lamont nel 1943 (in unità di misura anglosassoni), realizzato impiegando come parametro di equivalenza il tempo di dimezzamento $t_{1/2}$.

In questo tipo di diagrammi l'influenza delle proprietà termofisiche dell'acciaio non è immediatamente evidente, e talvolta questi stessi diagrammi ed altri simili vengono diffusi senza indicare i valori delle proprietà termofisiche impiegati nei calcoli.

Nel caso portato ad esempio, si impiega un singolo valore di diffusività termica α , considerato non soltanto come un valore medio ed efficace a fronte delle variazioni causate dalla temperatura e dalle trasformazioni di fase, ma anche come un valore rappresentativo di tutta la categoria degli acciai da bonifica.

Analogamente, si caratterizza la drasticità di ciascun mezzo di tempra con un singolo valore (efficace) del coefficiente H di Grossman (definito come il rapporto tra il coefficiente di scambio termico liminare h ed il doppio della conduttività termica λ dell'acciaio), benchè sia noto che il coefficiente di scambio termico liminare varia molto con la temperatura (particolarmente in funzione dell'ebollizione del fluido di tempra, se quest'ultimo è olio oppure acqua).

Analisi quantitativa della tempra – diagrammi CCT



I metodi sopra esposti, per la determinazione diretta della durezza dopo tempra, non considerano esplicitamente le trasformazioni di fase dell'acciaio nel corso della tempra, trasformazioni che sono la causa diretta delle differenze di durezza finale.

La cinetica di queste trasformazioni di fase può essere descritta mediante i diagrammi CCT (Continuous Cooling – Temperature), nei quali si indicano gli istanti di inizio e di fine delle diverse possibili trasformazioni, e si tracciano le curve di raffreddamento impiegate nelle misure, in un piano temperatura – logaritmo del tempo.

A titolo di esempio, si riporta il diagramma CCT dell'acciaio ISO 1.2738, pubblicato da una acciaieria (Edelstahl Witten-Krefeld).

Le velocità di raffreddamento minori comportano la trasformazione dell'austenite, ad alta temperatura, in perlite (P). Velocità intermedie comportano invece la trasformazione in bainite (B), a temperature minori. Infine, le velocità di raffreddamento superiori ad un valore critico comportano la trasformazione in martensite (M); quest'ultima trasformazione, contrariamente alle precedenti, evolve in funzione soltanto della temperatura. È possibile ottenere microstrutture miste.

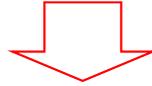
Austenite, perlite, bainite e martensite vengono detti 'costituenti metallografici' dell'acciaio.

Anche questo tipo di diagrammi può essere impiegato per determinare i risultati di un processo di tempra. È tuttavia opportuno notare che i costituenti indicati in ciascun punto nel grafico sono corretti soltanto nel caso in cui il raffreddamento dell'acciaio, fino al punto considerato, avvenga con la medesima legge impiegata nelle misure sperimentali (velocità di raffreddamento circa costante). Se, per esempio, un campione venisse raffreddato in due passi, secondo la curva rossa tratteggiata, non si otterrebbe bainite, bensì martensite, benché il punto finale di tale curva si trovi nella zona della bainite.

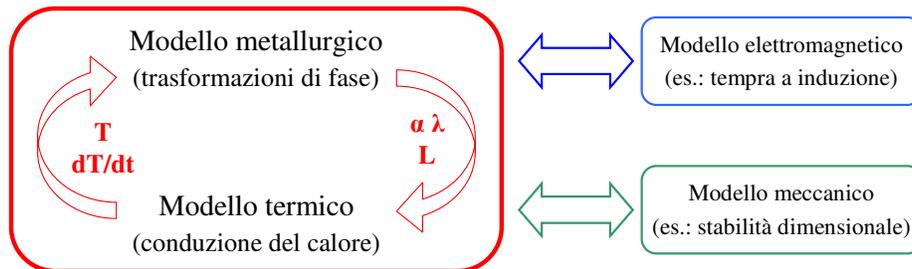
I diagrammi CCT, e più in generale gli esperimenti e le misure rivolti a determinare la cinetica delle trasformazioni di fase, possono essere usati per costruire modelli quantitativi semiempirici delle stesse trasformazioni, che, a loro volta, possono essere impiegati per eseguire simulazioni termometallurgiche della tempra.

Analisi quantitativa della tempra – metodi tradizionali ed innovativi

Metodi tradizionali	Parametri α , λ , h costanti rispetto a temperatura e costituenti Nessuna influenza dei calori latenti di trasformazione Geometrie semplici (cilindri, piastre, ...) Caratterizzazione delle curve di raffreddamento con un solo parametro
---------------------	--



Simulazioni termometallurgiche ad elementi finiti



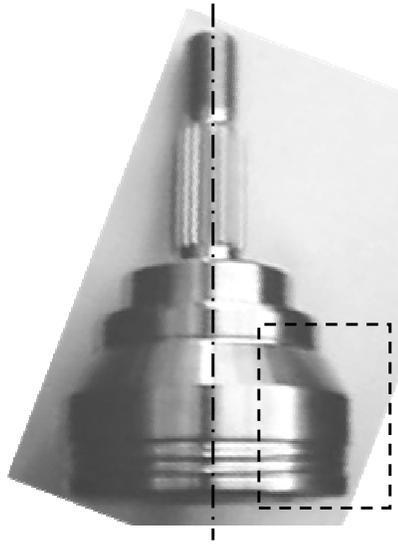
Perciò, l'analisi quantitativa della tempra può essere svolta con metodi tradizionali, generalmente basati sull'impiego delle prove Jominy, di un singolo parametro di raffreddamento, e di soluzioni analitiche della conduzione del calore, oppure con metodi innovativi, generalmente ad elementi finiti, computazionalmente molto più onerosi (quindi resi possibili solo dal recente sviluppo degli strumenti di calcolo numerico), i quali considerano l'interazione tra la cinetica delle trasformazioni di fase (modello metallurgico) e la conduzione del calore (modello termico).

Nei metodi tradizionali le proprietà termofisiche (ed anche il coefficiente di scambio termico liminare) devono essere introdotte come costanti e possono essere esaminate solo geometrie semplici. Nella pratica, si impiegano valori approssimativi di queste proprietà e si operano semplificazioni geometriche per ridurre il pezzo in esame ad una delle geometrie note.

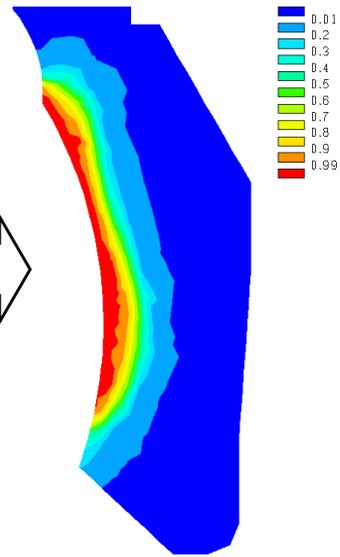
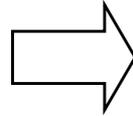
Al contrario, nelle simulazioni ad elementi finiti è possibile considerare la geometria effettiva dei pezzi, introdurre condizioni al contorno più complesse e dipendenti dalla temperatura, considerare il calore latente delle trasformazioni, ed anche introdurre proprietà termofisiche più precise, funzione della temperatura e dei costituenti metallografici.

Inoltre, le simulazioni ad elementi finiti possono essere estese a fenomeni fisici diversi e concomitanti, elettromagnetici (come nel caso dei processi di tempra ad induzione) oppure meccanici (per calcolare le tensioni e le deformazioni causate dalla dilatazione termica e dalle trasformazioni di fase); talvolta la possibilità di esaminare questi ulteriori fenomeni costituisce la ragione principale per l'esecuzione delle simulazioni medesime.

Simulazioni termometallurgiche ad elementi finiti – un esempio



Giunto omocinetico Rzeppa



Austenite al termine del riscaldamento ad induzione

Si riporta, a titolo di esempio, un risultato di una simulazione numerica della tempra ad induzione di un componente di geometria complessa.

Analisi quantitativa della tempra – influenza del numero di Biot

$$Bi = \frac{h \cdot R}{\lambda} = H \cdot D$$

Bi << 1

Flusso di calore determinato principalmente dalla **condizione al contorno**.
Piccole differenze di temperatura nel pezzo.



La qualità della simulazione numerica dipende soprattutto dalla precisione del modello di **scambio termico superficiale**.

Bi >> 1

Flusso di calore determinato principalmente dalla **diffusività termica dell'acciaio**.
Grandi differenze di temperatura nel pezzo.



La qualità della simulazione numerica dipende soprattutto dalla precisione dei valori delle **proprietà termofisiche dell'acciaio**.

I metodi innovativi di analisi della tempra, precedentemente descritti, consentono, contrariamente a quelli tradizionali, di introdurre una grande quantità di informazioni concernenti le proprietà termofisiche dell'acciaio e la natura dello scambio termico superficiale. Raramente, però, queste informazioni sono disponibili in relazione allo specifico caso esaminato, cioè per un determinato acciaio da bonifica ed una determinata condizione di scambio termico superficiale, ed in tutto l'intervallo di temperature di interesse.

Pertanto occorre cercare un compromesso tra la precisione delle proprietà introdotte nel modello ed il costo di esecuzione di misure specifiche. A questo scopo, una semplice analisi del numero di Biot può essere utile per determinare quali grandezze fisiche hanno maggior influenza sulla soluzione del problema termico (e quindi sulle velocità di raffreddamento e sul risultato della tempra), e dunque meritano di essere determinate con maggiore precisione.

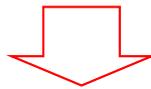
Il numero di Biot è il rapporto (adimensionato) tra il coefficiente di scambio termico liminare h ed una dimensione tipica del corpo (per esempio il raggio R di una barra), a numeratore, e la conduttività termica λ , a denominatore; si può anche esprimere come il prodotto del coefficiente di Grossman H e del diametro di una barra.

Nei casi in cui il numero di Biot è piccolo, è prevalente l'influenza delle condizioni al contorno; in questi casi, tuttavia, il risultato della tempra è tendenzialmente omogeneo nella sezione (perché lo è la temperatura durante il raffreddamento), e quindi la simulazione termometallurgica medesima è di minor interesse.

Viceversa, la stessa simulazione può rendere risultati di maggiore importanza, allo scopo di valutare la disomogeneità delle proprietà meccaniche del pezzo e le tensioni residue, nei casi in cui il campo delle temperature durante il raffreddamento è più disomogeneo; questi casi si verificano quando il numero di Biot è grande e sono influenzati in modo prevalente dalla diffusività termica dell'acciaio.

Analisi quantitativa della tempra e proprietà termofisiche

Metodo di calcolo	Proprietà termofisiche (α , λ) in funzione di:
metodi analitico	→ nulla (valori medi efficaci)
simulazioni F.E. termiche	→ temperatura (valori medi rispetto ai costituenti metallografici)
simulazioni F.E. termometallurgiche	→ temperatura e costituenti metallografici

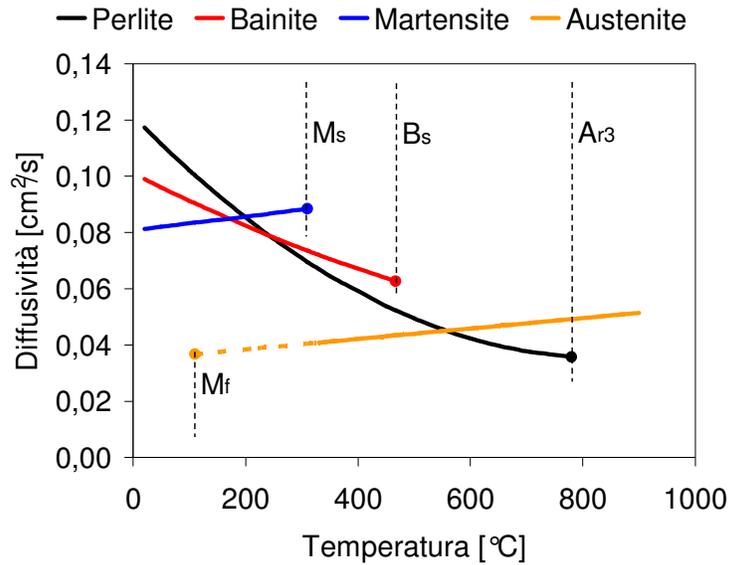


Misura delle proprietà termofisiche dei costituenti metallografici degli acciai da bonifica

La possibilità e l'utilità di impiegare, nella simulazione numerica della tempra (ed anche di altri trattamenti termici e termochimici) degli acciai, proprietà termofisiche (ed in particolare la diffusività termica) espresse in funzione della temperatura e delle fasi, attribuisce un nuovo scopo alla misura di queste stesse proprietà.

Pertanto, nel seguito si discuteranno i metodi di misura della diffusività termica dei costituenti metallografici degli acciai da bonifica, rilevanti per il processo di tempra.

Diffusività termica dei costituenti di un acciaio da bonifica



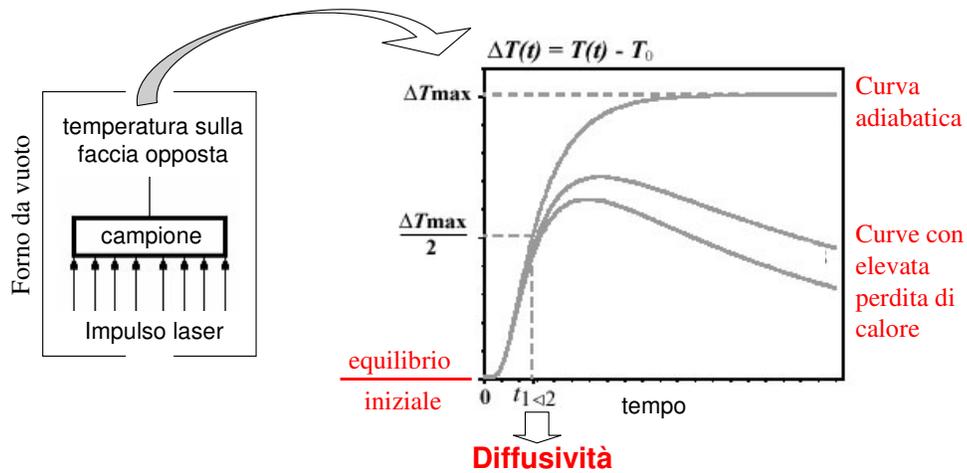
(risultati preliminari)

Si riportano, a titolo di esempio, le curve diffusività – temperatura, concernenti diversi costituenti metallografici, nel caso dell'acciaio ISO 1.2738, ottenute con i metodi descritti nel seguito e con alcune estrapolazioni ed interpolazioni.

Si può notare la considerevole differenza tra l'austenite e gli altri costituenti, e in particolare, il rapporto 2:1 tra la diffusività termica della martensite e quella dell'austenite alla temperatura di inizio della trasformazione martensitica (M_s)

Poiché queste misure sono rivolte allo scopo di simulare un processo di tempra durante il quale la temperatura si riduce sempre, perlite bainite e martensite sono state esaminate soltanto al di sotto della temperatura alla quale possono comparire, per la prima volta, durante il raffreddamento dell'austenite (rispettivamente A_{r3} , B_s e M_s). Viceversa, l'austenite deve essere presa in considerazione ad ogni temperatura superiore a M_f (temperatura alla quale la trasformazione martensitica è completa), che in questo caso è poco superiore alla temperatura ambiente.

Diffusività termica dei costituenti di un acciaio da bonifica: il metodo impulsivo laser flash



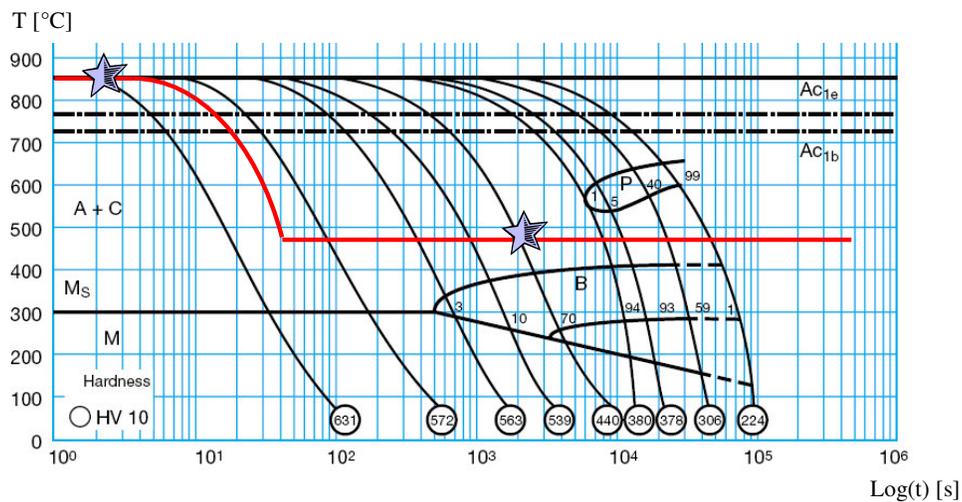
Perlite & Bainite	misure di campioni ottenuti da un precedente trattamento termico.
Martensite	metastabile (misure solo fino ad Ms)
Austenite	non è sempre possibile eseguire misure

La diffusività termica può essere misurata direttamente con il metodo impulsivo (anche noto come metodo flash o laser flash), proposto per la prima volta da Parker et. al. nel 1961. Questo metodo si basa sull'analisi di un transitorio termico. Una faccia di un disco sottile (inizialmente in equilibrio termico con l'ambiente circostante) viene sottoposta ad un impulso di energia radiante (di solito realizzato con un laser) e viene registrata la curva temperatura-tempo sulla faccia opposta, che presenta una transizione tra la temperatura iniziale e quella finale del disco; tipicamente queste differiscono di 1 °C circa. La diffusività termica si determina confrontando la forma di questa curva con la corrispondente soluzione analitica. A questo scopo, se non si verificano altri scambi termici, in prima approssimazione è sufficiente considerare il tempo di metà salita $t_{1/2}$; risulta $\alpha = 0,138 \cdot b^2 / t_{1/2}$ in cui b è lo spessore del campione. Se, invece, si vuole conseguire una maggior precisione, oppure considerare anche il flusso termico ceduto dal disco all'ambiente (perché, a causa della misura stessa, il disco perviene ad una temperatura lievemente maggiore di quella dell'ambiente), è possibile considerare nel calcolo più punti della curva (al limite tutti i punti registrati).

La perlite e la bainite sono stabili a temperatura ambiente e pressoché stabili in tutto l'intervallo di temperature di interesse (precedentemente descritto), pertanto, è possibile realizzare questi costituenti con un trattamento termico (svolto in un forno diverso) e misurarli a temperature crescenti ed in condizioni di equilibrio iniziale con l'ambiente. La stessa procedura può essere utilizzata per la martensite, in quanto l'intervallo di temperatura di interesse corrisponde prevalentemente al solo primo stadio di rinvenimento. Invece, l'austenite richiede una procedura diversa, descritta nel seguito.

Metodi di misura della diffusività termica dell'austenite sottoraffreddata (I)

★ Misure laser flash in condizione di equilibrio iniziale (normali)



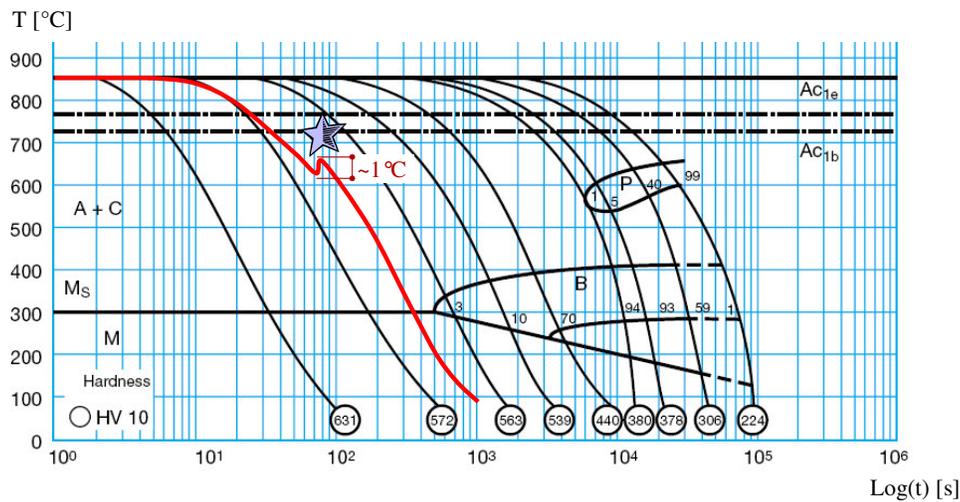
La misura della diffusività termica dell'austenite con il metodo laser flash presenta particolari difficoltà.

Poiché l'austenite non è stabile a temperatura ambiente, deve essere prodotta nel forno stesso di misura. Inoltre, alla maggior parte delle temperature di interesse, l'austenite non è stabile e quindi non è possibile attendere, alla temperatura di misura, un tempo sufficiente a conseguire l'equilibrio termico con l'ambiente circostante (cioè con il forno di misura) prima di eseguire la misura.

Nel caso dell'acciaio 1.2738, portato ad esempio, e, più in generale, degli acciai da bonifica legati che presentano una separazione tra le trasformazioni perlitica e bainitica, è possibile eseguire misure normali (cioè in condizioni iniziali di equilibrio termico) non solo alla temperatura di austenitizzazione, ma anche ad una temperatura intermedia tra quelle delle due trasformazioni citate.

Misura della diffusività termica dell'austenite sottoraffreddata (II)

★ Misure laser flash in corso di raffreddamento continuo



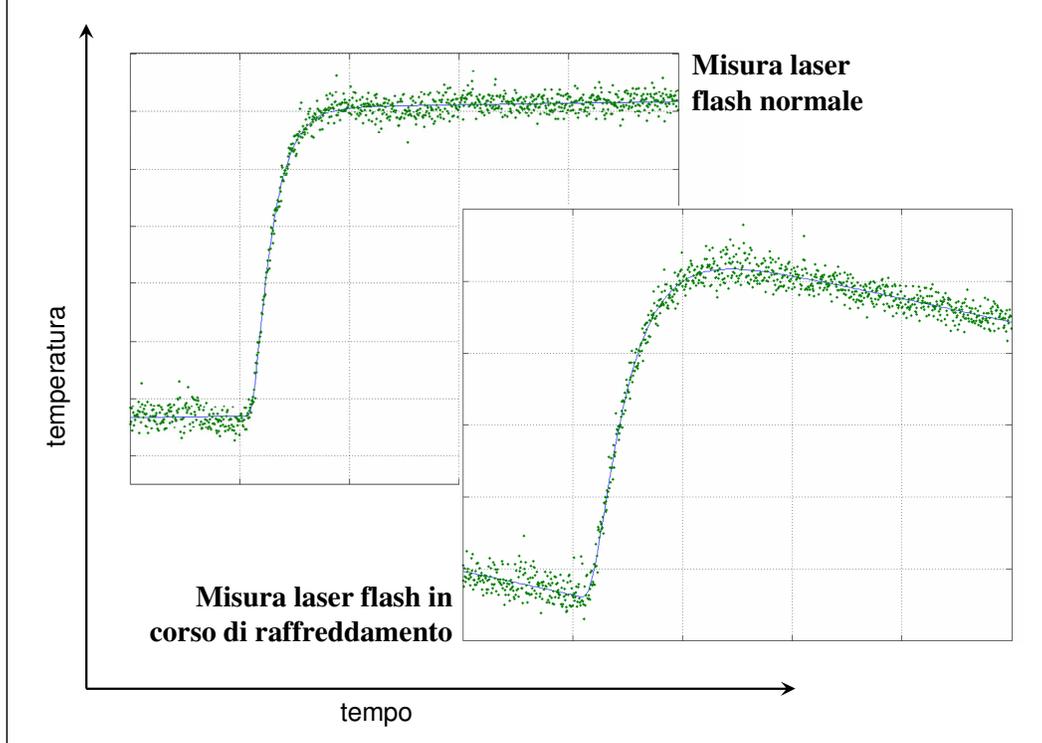
Inoltre, è possibile eseguire misure sull'austenite metastabile (sottoraffreddata), nel corso di un raffreddamento continuo, impiegando una variante del metodo di misura laser flash (P. Matteis, Tesi di Dottorato, Torino, 2006, in corso di pubblicazione).

Infatti, avendo eseguito una misura laser flash nel corso del raffreddamento (quindi senza che si sia conseguito l'equilibrio iniziale), si può ritenere, in determinate circostanze, che il flusso di calore uscente la campione (durante il raffreddamento continuo) sia quasi costante nel corso della misura medesima (la cui durata è brevissima rispetto al tempo totale di raffreddamento del campione). Con questa ipotesi, si può concludere che il transitorio termico indotto dall'impulso laser si sommi ad un decremento lineare della temperatura, dovuto al raffreddamento continuo.

Pertanto, si può determinare la diffusività termica con lo stesso principio sopra esposto, e con un modello matematico poco più complesso. Questa procedura può essere agevolmente ripetuta più volte nel corso del raffreddamento continuo.

In figura, il gradino prodotto, in una curva di raffreddamento continuo, da una tale misura, è stato disegnato in scala molto ampliata.

Misura della diffusività termica dell'austenite sottoraffreddata (III)



A titolo di esempio, si riportano due curve di misura laser flash, ottenute, rispettivamente, in condizione di equilibrio iniziale (misura normale) ed in corso di raffreddamento continuo. In entrambi i casi la curva interpolante (blu) è stata determinata considerando tutti i punti di misura, e la diffusività è stata ottenuta come parametro di interpolazione. Nel secondo caso, è stata considerata una sensibile componente lineare decrescente, attribuita al raffreddamento in corso ed osservata sia prima, sia dopo l'istante in cui il campione ha ricevuto l'impulso.

Conclusioni

- I più recenti strumenti di analisi quantitativa della tempra consentono di simulare contemporaneamente le trasformazioni di fase ed i flussi termici.
- Particolarmente nel caso di pezzi di grandi dimensioni, è utile introdurre la diffusività termica dell'acciaio in funzione sia della temperatura, sia dei costituenti metallografici.
- Questa grandezza si può misurare con il metodo laser flash.
- Nel caso dell'austenite sottoraffreddata, il metodo laser flash normale non è sempre applicabile, ma può essere adattato eseguendo misure in corso di raffreddamento continuo.