

Sperimentazione e modellistica del processo di ricottura in campana ad idrogeno

G. L. Garagnani, C. Mapelli, L. Villani

La ricottura statica in campane alimentate ad idrogeno è uno dei trattamenti di ricottura maggiormente utilizzati durante il ciclo di lavorazione a freddo di acciai destinati alla formatura per impieghi automobilistici. L'impiego di idrogeno all'interno dei forni viene realizzato per migliorare la rapidità ed uniformità del trattamento di ricottura. D'altra parte, nonostante questo metodo di ricottura sia impiegato da diversi anni, ancora oggi la regolazione viene realizzata su basi empiriche e senza conoscere alcuni aspetti fondamentali, quali la conducibilità termica e l'influenza delle velocità di riscaldamento sul processo di ricottura. Per questa ragione sono state implementate delle misure termiche durante il processo di ricottura mediante piazzamento delle termocoppie in diverse punti delle bobine di nastro trattato e a questa analisi è stato affiancato un processo di simulazione al calcolatore che ha consentito di stabilire i valori di conducibilità termica propri dei moti gassosi convettivi che si instaurano all'interno del forno. È stato valutato l'effetto di diverse procedure di ricottura sulla struttura metallografica degli acciai ricotti, ma va segnalato che i risultati ottenuti circa quest'ultimo aspetto necessiteranno di ulteriori approfondimenti.

Parole chiave: acciaio, ricottura, siderurgia, modellazione, processi, forno a idrogeno

INTRODUZIONE

Nella realtà industriale, si usano due metodi per implementare il processo di ricottura, in quanto essa può essere di tipo statico o di tipo dinamico.

Nella ricottura di tipo dinamico si utilizzano i forni in continuo, che attualmente possono consentire velocità di riscaldamento e di raffreddamento assai consistenti. I forni di questo tipo sono spesso dotati di induttori elettromagnetici che consentono di operare con velocità di riscaldamento comprese anche tra $500^{\circ}\text{Cs}^{-1}$ e $1000^{\circ}\text{Cs}^{-1}$ [1].

Sistemi di ricottura più frequenti e di notevole impiego nei cicli di lavorazione a freddo, soprattutto quando vi sia la necessità di trattare grosse quantità di materiale sono i forni a campana per la ricottura statica. Lo schema fondamentale di questi forni è costituito da una base su cui poggiano i rotoli da ricuocere ed un sistema a due campane che isola il rotolo (coil) dall'ambiente esterno, in modo da poter generare nel volume sottostante un'atmosfera controllata che non provochi fenomeni di decarburazione del materiale o alterazione delle caratteristiche superficiali in presenza di significativi fenomeni di ossidazione che possono svilupparsi durante processi di ricottura della durata di diverse ore.

Nel presente studio viene indagato il processo di ricottura all'interno di un forno a campana con atmosfera caratterizzata da una concentrazione di H_2 pari al 100% ed in presenza di elevata convezione. Per quanto tale sistema sia in grado di garantire ottime finiture superficiali, consistenti in una apprezzabile omogeneità relativa alla microstruttura e alle proprietà meccaniche, non sono noti gli aspetti fundamenta-

li relativi ai fenomeni di trasmissione del calore. Tale problematica è però di estrema importanza per giungere ad una corretta gestione del processo di riscaldamento e raffreddamento che varia da punto a punto del rotolo in funzione della posizione rispetto alle superfici esterne.

La conducibilità termica dell'acciaio, la natura dell'atmosfera dei forni, lo spessore del laminato, il metodo di caricamento e il grado di ricircolo dell'atmosfera di ricottura sono tutti fattori che influenzano il percorso termico ed il tasso di riscaldamento del metallo fino alla temperatura richiesta. Attraverso la conoscenza degli aspetti di trasmissione del calore è possibile impostare le velocità di riscaldamento del forno in modo da ottenere i desiderati cicli termici reali sulle diverse zone del materiale trattato, che possono differenziarsi significativamente dal ciclo teorico imposto al forno.

Il controllo di tale aspetto consente di strutturare un corretto ciclo di ricottura che può essere completamente definito da quattro parametri: tempo di riscaldamento, tempo di mantenimento (soaking time), temperatura di mantenimento (soaking temperature), tempo di raffreddamento [2]. Più in dettaglio, si intende come tempo di riscaldamento quel tempo necessario perché la spira esterna di un rotolo (hot spot) raggiunga la temperatura massima, mentre viene considerato come tempo di mantenimento l'intervallo necessario affinché il cuore (o nucleo) del rotolo (cold spot) raggiunga tale temperatura. Già la corretta determinazione della posizione del nucleo e del suo ciclo termico può consentire di strutturare il trattamento in modo opportuno.

Nel caso di una ricottura statica, in cui una pila di rotoli viene ricotta sotto un forno a campana, il calore dalla campana interna di protezione è trasferito ai rotoli (inner-bell) secondo la modalità convettiva in cui il mezzo di trasmissione è costituito dall'idrogeno. La modalità di trasmissione termica radiativa riveste un'importanza inferiore. Il trasferimento di calore per convezione dipende fortemente dall'entità del flusso di gas ai bordi, in quanto questa è la regione da cui il gas stesso riesce ad insinuarsi fra le spire dei rotoli. Una volta caratterizzati i fenomeni di trasmissione del calore, per migliorare la comprensione degli aspetti metallurgici

G. L. Garagnani, Università degli Studi di Ferrara

C. Mapelli, Politecnico di Milano

L. Villani, Gruppo Marcegaglia-Ravenna

Memoria presentata al 19° Convegno Nazionale Trattamenti Termici, Salsomaggiore, 20-22 maggio 2003

connessi ai parametri di ciclo termico è spesso opportuno applicare un modello di ricristallizzazione per la ricottura. In prima approssimazione è possibile formulare tale approccio sotto l'ipotesi semplificata di curve lineari di riscaldamento e raffreddamento, al fine di correlare i risultati del modello con le caratteristiche meccaniche rilevate sul prodotto ricotto.

DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI RICOTTURA

Il processo oggetto del presente studio è noto come HICON-H₂ proposto dalla Ebner.

Prima di iniziare il ciclo viene effettuato un lavaggio preliminare dell'atmosfera che circonda i rotoli tramite N₂, con lo scopo di eliminare l'aria che ha un elevato potere ossidante. La miscela aria-N₂ viene dispersa nell'atmosfera esterna tramite un camino. Il lavaggio procede fino ad ottenere all'interno della campana N₂ puro ad una pressione di 50/60 mbar circa.

Si realizza un successivo test di tenuta della campana che inibisce l'inizio del ciclo di ricottura qualora si rilevi che l'ambiente interno non è a tenuta stagna. Terminato il test di tenuta viene immesso H₂ al fine di creare l'atmosfera riducente che dovrà persistere durante l'intero ciclo di ricottura. Durante questo periodo, posizionato il forno sopra la campana che protegge i rotoli è possibile cominciare il riscaldamento degli stessi. Il forno è dotato di diversi bruciatori e di un post bruciatore; i primi vengono alimentati tramite metano, l'ultimo è alimentato tramite l'idrogeno contenuto nella campana di protezione, che viene immesso in continuo.

In questo modo, oltre a sfruttare il potere di trasmissione del calore dell'idrogeno vengono anche eliminate le particelle di polvere e di olio emulsionante che rimane sui rotoli dalle precedenti lavorazioni, che subiscono cracking con l'innalzamento progressivo della temperatura.

La particolare disposizione dei bruciatori in direzione non radiale, aumenta la superficie a contatto con la fiamma ed evita l'insorgere di surriscaldamenti localizzati della inner-bell, dannosi per l'omogeneità della ricottura.

Tutti i prodotti di combustione vengono dispersi nell'atmosfera di lavoro ad un'altezza di circa 6m e salgono per convezione fino ad uscire dal capannone tramite apposite aperture.

Terminato il ciclo di riscaldamento e di permanenza in temperatura, il forno viene tolto e sostituito con un'apposita campana di raffreddamento, la quale, prima tramite semplice flusso d'aria, e poi per mezzo di getti di acqua, raffredda la inner bell contenente i rotoli, e quindi i rotoli stessi per mezzo dei moti convettivi.

Durante il raffreddamento non viene immesso H₂ nella campana di protezione. Terminato il raffreddamento, e quindi il ciclo di ricottura, viene effettuato il lavaggio finale tramite N₂ per espellere tutto H₂.

La miscela N₂-H₂ viene dispersa in atmosfera tramite un secondo camino.

Terminato il lavaggio, viene abbattuta la pressione all'interno della campana ed è possibile estrarre i rotoli.

Più in dettaglio, il processo di ricottura può pensarsi quindi suddiviso nei seguenti stadi:

1. impilaggio dei rotoli sulla base, interponendo fra l'uno e l'altro dei convettori, il cui compito è quello di migliorare la circolazione del gas di atmosfera H₂ e quindi intensificare il processo convettivo;
2. sulla base viene posta la campana di contenimento (chiamata inner bell o heating bell);

3. a forno acceso (7+1 bruciatori con fiamma inclinata a 45° rispetto alla tangente la superficie del forno) si procede allo spurgo dell'atmosfera ambientale con N₂ puro. Quando l'atmosfera all'interno del forno contiene meno di 0.05% di O₂, inizia l'introduzione di H₂ e ha inizio il riscaldamento vero e proprio. Inizialmente, H₂ elimina O₂ sotto forma di H₂O, poi si realizza sviluppo di CO₂-CO a circa 200°C fino a che non si riscontra presenza di O₂ nell'atmosfera. Raggiunta una minima concentrazione di O₂, ha luogo il cracking degli oli e delle emulsioni lubrificanti.
4. Oltre i 450°C non si realizza l'evaporazione di alcun elemento e si prosegue fino ad una temperatura di 630°C, alla quale cominciano a ricomparire gli idrocarburi (processo Fisher¹). Tale fenomeno si realizza solo in atmosfera di H₂. Attorno a 680°C inizia la coalescenza del lamierino di ferro, residuo del treno a freddo.
5. Il raffreddamento procede in tre ulteriori periodi: viene lasciato sulla base il forno con i bruciatori spenti per realizzare un iniziale lento raffreddamento e per evitare le incollature; quindi si toglie il forno e si posa sulla base la campana di raffreddamento ad aria; infine, si inizia un raffreddamento realizzato mediante getti ad acqua che lambiscono esternamente la inner-bell.

Diversi vantaggi si verificano rispetto ad una ricottura tradizionale grazie all'alta convezione di H₂:

- uniformità della temperatura in tutta la pila, che è la premessa per una buona omogeneità delle caratteristiche meccaniche;
- produttività molto più elevata dovuta a un elevato tasso di riscaldamento e di raffreddamento;
- l'atmosfera di H₂ attorno alla carica consente una buona evaporazione dell'emulsione che rimane sul nastro dopo la lavorazione al tandem, il che si traduce in una bassa contaminazione da carbonio ed una eccellente pulitura superficiale.

PROCEDURA SPERIMENTALE

Per semplicità e per ottenere risultati il più possibile attendibili, la raccolta dati effettuata è stata realizzata mediante osservazioni solo sull'acciaio SAE 1006 (tab. 1) dell'acciaieria Bhp, Australia.

Sono state analizzati 6 pile, ciascuna composta da 4 rotoli. I processi di ricottura sono stati seguiti con registrazione dei principali parametri di processo: tasso di riscaldamento, tempo di riscaldamento, temperatura e tempo di mantenimento, tasso e durata del raffreddamento (tab.2).

Al termine del ciclo di ricottura sono state effettuate prove di durezza con scala Rockwell B in testa in coda e al centro di ogni rotolo. Il risultato di ogni prova di durezza è stato preso dalla media di tre prove di durezza.

Dato che lo scopo fondamentale del processo è conferire all'acciaio un'adeguata formabilità in vista del successivo stampaggio, per caratterizzare correttamente i risultati del trattamento sono state eseguite prove di trazione per determinare l'allungamento percentuale dell'acciaio alla rottura (%A). L'allungamento percentuale è la media di tre prove di trazione. Tale indagine è stata integrata dalle rilevazioni metallografiche che sono state eseguite mediante applicazione

¹ La reazione è $C+H_2 \rightarrow CH_4$, con C proveniente dal cracking e dall'evaporazione delle emulsioni e H₂ dall'atmosfera riducente; in pratica, la quantità di metano che si asporta durante la ricottura è proporzionale alla pulizia del nastro.

C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	Ni	Cu	V	Mo	N	Ti	Sn
0.050	0.170	0.0059	0.011	0.18	0.042	0.012	0.026	0.007	0.003	0.0020	0.0042	0.003	0.002

Tabella 1 – Analisi chimica SAE1006 esaminato

Table 1 – Chemical analysis of SAE1006

Peso totale	Tempo raffreddamento (h)	Temperatura avvio raffreddamento acqua (°C)	Temperatura nucleo fine riscaldamento (°C)	Temperatura nucleo fine raffreddamento (°C)	Temperatura ricottura (°C)	Tempo ricottura (h)
1	15,8	380	630	130	700	14,8
2	15,6	380	630	130	690	15,1
3	16	380	630	130	690	15,2
4	19,1	350	680	130	710	22,2
5	21,2	350	680	130	700	12,3
6	17,6	380	620	130	690	12,8

Tabella 2 – Cicli di ricottura studiati

Table 2 – Characteristic parameters of the annealing cycles

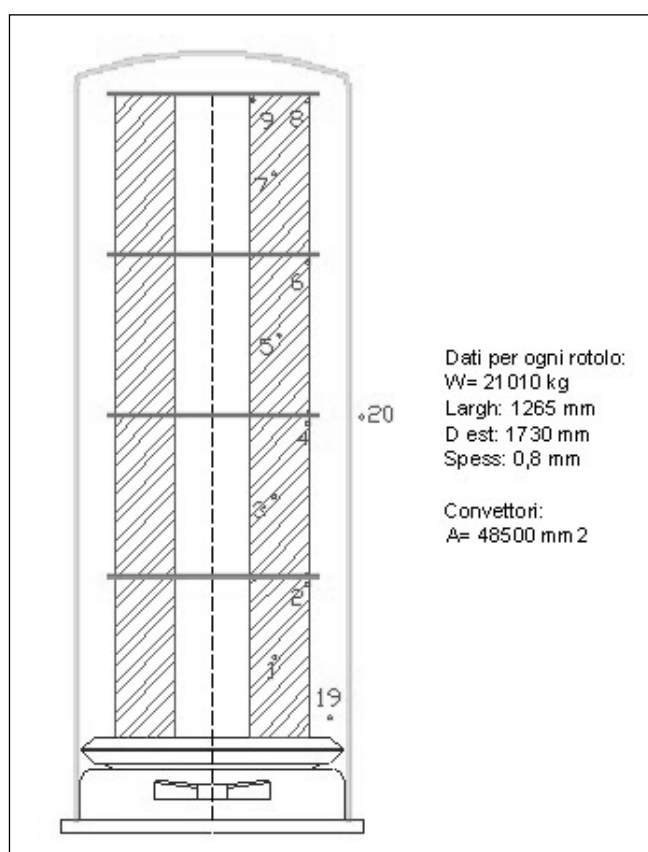


Fig. 1 – Piazzamento delle termocoppie all'interno dei rotoli.

Fig. 1 – Location of the thermocouples within the coils.

di un attacco Nital 3% con tempo di immersione pari a 15s. Sui campioni attaccati è stata rilevata la dimensione del grano lungo lo spessore del nastro effettuata secondo quanto previsto dalla normativa ASTM [3], sulla base della quale è stato determinato il valore del diametro di grano equivalente con il metodo dell'intercetta lineare.

All'interno del forno, sono state poste in ognuno dei rotoli impilati diverse termocoppie (fig.1), mediante le quali è stato possibile rilevare il percorso termico nelle diverse regioni dei rotoli impilati e correlare tale dato alla temperatura dell'atmosfera circostante abitualmente misurata dalla termocoppia necessaria alla regolazione dell'atmosfera del forno. Generalmente all'interno del forno vengono impilati 4 rotoli di acciaio per la ricottura.

Durante le prove il convettore di idrogeno alla base del forno è stato azionato con frequenza di rotazione pari a 75Hz.

RISULTATI

I valori di durezza e di allungamento percentuale che sono stati rilevati (tab.3) hanno mostrato una consistente omogeneità all'interno dei singoli rotoli e all'interno della medesima pila senza evidenziare significative differenze. Ogni rotolo, prima della ricottura ha subito un processo con riduzione di sezione pari al 67%.

	HRB	dev.st.	%A	dev.st.
1	38.2	2.8	30.5	0.6
2	41.6	2.8	38.9	1.6
3	38.1	1.2	40.4	2.5
4	35.1	4.0	40.1	1.0
5	33.1	0.8	43.3	1.1
6	46.7	2.1	36.3	2.7

Tabella 3 – Valori medi di durezza HRB e %A per ogni pila

Table 3 – Average values of HRB hardness and %A for each pile of coils.

pila	rotolo	HRB	dev.st.	%A	dev.st.
1	1	40.3	1.5	39.4	1.6
	2	41.5	2.1	40.8	0.1
	3	38.1	2.0	1.7	0.1
	4	33.0	5.7	40.0	0.9
2	1	39.7	3.5	40.6	2.6
	2	44.3	2.9	37.8	0.2
	3	42.2	2.3	37.9	0.4
	4	40.3	2.5	39.4	3.3
3	1	37.0	1.0	41.8	3.1
	2	43.0	1.2	37.9	2.2
	3	36.3	1.9	38.9	2.1
	4	36.0	0.7	42.9	2.5
4	1	34.0	7.1	39.9	1.3
	2	32.7	3.1	41.0	0.5
	3	35.3	1.2	39.1	0.2
	4	38.7	4.6	40.1	2.1
5	1	36.0	1.4	42.8	1.3
	2	29.5	0.7	42.5	0.5
	3	30.2	0.3	43.1	1.2
	4	36.5	0.7	44.9	1.4
6	1	46.3	1.7	36.2	2.9
	2	46.0	1.7	37.3	2.6
	3	47.0	2.3	36.0	2.1
	4	47.7	2.5	35.5	3.3

Tabella 4 – Valori medi di durezza e allungamento percentuale (1 è il rotolo alla base, 2 è il rotolo centrale inferiore, 3 è il rotolo centrale superiore, 4 è il rotolo superiore)

Table 4 – Average values of HRB hardness and percentual elongation of the coils of each pile (1 is associated with the coil on the bottom, 2 is the central lower coil, 3 is associated with the upper central coil, 4 is associated with the coil in the highest position)

L'analisi metallografica ha evidenziato significative differenze dimensionali nella popolazione dei grani osservata (tab.5).

La distribuzione dimensionale dei grani all'interno del singolo nastro risulta uniforme e si evidenziano fenomeni di ingrossamento soprattutto nei rotoli appartenenti alle pile che presentano il maggiore addolcimento, ossia la pila 4 e la pila 5 (fig.2, fig.3,fig.4).

Per quanto riguarda l'aspetto superficiale, i nastri risultava-

pile	rotolo	diametro medio (µm)	pile	rotolo	diametro medio (µm)
1	1	34.2	4	1	88.4
	2	34.8		2	83.3
	3	35.3		3	95.4
	4	33		4	87.3
2	1	31.2	5	1	100.4
	2	29.9		2	105.8
	3	30.2		3	115.4
	4	32.2		4	102.3
3	1	44.8	6	1	25.6
	2	41.2		2	20.5
	3	50.6		3	15.5
	4	51.3		4	28

Tabella 5 – Dimensione media dei grani osservati nei diversi rotoli.
Table 5 – Average grain sizes observed in each coil.

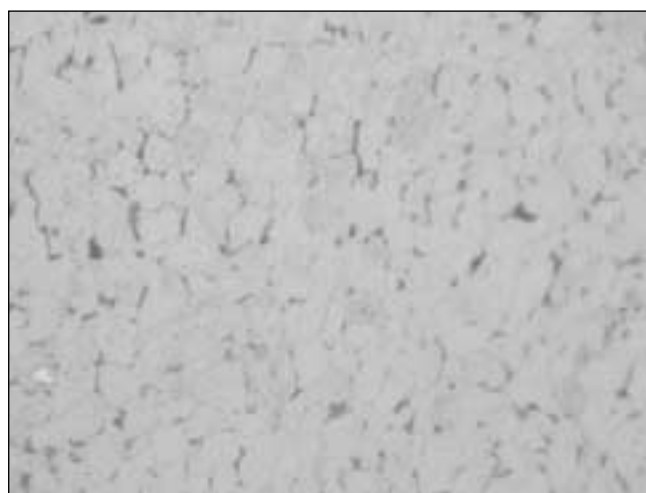


Fig. 2 – SAE 1006 laminato a freddo e ricotto con il sistema HICON/H₂. Campione prelevato in testa (500X). Nital 3%, 15 s.

Fig. 2 – SAE 1006 cold rolled and annealed by the HICON/H₂ system. Sample taken in the forward region of the coil (500X). After 15 s Nital 3% etching.



Fig. 3 – SAE1006 ricotto. Campione laminato al 67%, ricotto (200X), Nital 3% per 15s.

Fig. 3 – SAE 1006 in the annealed condition after 67% rolling reduction (200X). After 15 s Nital 3% etching.

no perfettamente puliti al momento dello scarico della base di ricottura, e anche rimanendo depositati non imballati a magazzino per una decina di giorni hanno presentato una



Fig. 4 – SAE1006 ricotto per 140h. Campione laminato al 67%, ricotto (100X), Nital 3% per 15s.

Fig. 4 – SAE 1006 after 140h annealing after 67% reduction performed by cold rolling (100X). After 15 s in Nital 3% etching.

leggera formazione di ossidi puntiformi solo sulla spira esterna, nonostante l'ambiente particolarmente aggressivo (lo stabilimento si trova affacciato sul mare).

Si è notato che temperature di scarico superiori a 160-170°C portano ad una ossidazione delle spire esterne e dei bordi dei coils solo dopo pochi giorni; è stato sufficiente portare la temperatura di scarico al valore di circa 100°C per eliminare il difetto.

MODELLISTICA E DISCUSSIONE

Il controllo del processo di ricottura e la progettazione di un corretto ciclo termico si fondano sulla conoscenza del processo di trasmissione del calore affidato prevalentemente alla convezione di H₂ che in virtù delle proprie dimensioni atomiche può insinuarsi con grande facilità all'interno delle spire e svolgere anche un ruolo pulente sulle superfici dei nastri trattati.

La determinazione delle corrette costanti di trasmissione del calore si articola in due momenti:

- costruzione di un modello di trasmissione del calore alle differenze finite;
- taratura delle costanti di trasmissione del calore in modo che il modello alle differenze finite fornisca dei risultati in corrispondenza dei punti termicamente monitorati, che collimino con i dati sperimentali forniti dalle termocoppie durante l'evoluzione dei cicli termici.

Il primo passo per lo sviluppo del modello di simulazione è stato quello di discretizzare alle differenze finite l'equazione di Fourier in coordinate cilindriche [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

data la particolare geometria in esame (fig.5).

Per eliminare ulteriori parametri fortemente dipendenti dallo stato istantaneo del processo di ricottura, e quindi praticamente impossibili da simulare, quali le precise condizioni di riscaldamento e raffreddamento, temperatura della base, temperatura del forno, velocità del ventilatore, temperatura del materiale e caratteristiche dell'atmosfera protettiva ed esterna, lo studio è stato condotto impiegando come condizione al contorno di partenza la temperatura all'interno della campana protettiva, misurata in continuo tramite la termocoppia posta sulla base di ricottura.

Note, per ogni istante, la temperatura del gas e le equazioni

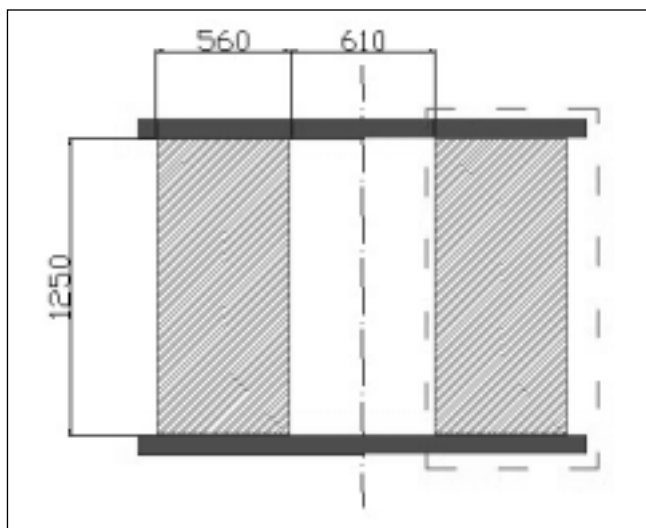


Fig. 5 – La sezione tratteggiata è quella di un cilindro cavo (le dimensioni sono espresse in mm) e l'area racchiusa nel riquadro è quella su cui viene applicata la discretizzazione alle differenze finite, sfruttando la simmetria.

Fig. 5 – The section pointed out by the red contour represents the discretized section of the coil (the dimensions are expressed in mm) which can be a good representation of the analogous section on the basis of the axial symmetry of the studied structure.

che regolano l'andamento dei vari parametri termici in funzione della temperatura di acciaio e H_2 , si procede alla risoluzione delle equazioni differenziali che regolano i fenomeni di scambio termico con la tecnica numerica delle differenze finite.

Il confronto tra i tracciati delle termocoppie (fig.6) ed i risultati delle simulazioni hanno portato alla determinazione dei coefficienti di scambio termico e delle leggi che regolano i loro andamenti in funzione della temperatura, in quanto sono stati determinati a partire dai valori che sono in grado di minimizzare la differenza tra i dati misurati e i risultati del modello di simulazione.

In particolare, il coefficiente globale di scambio termico in direzione radiale ha una espressione del tipo

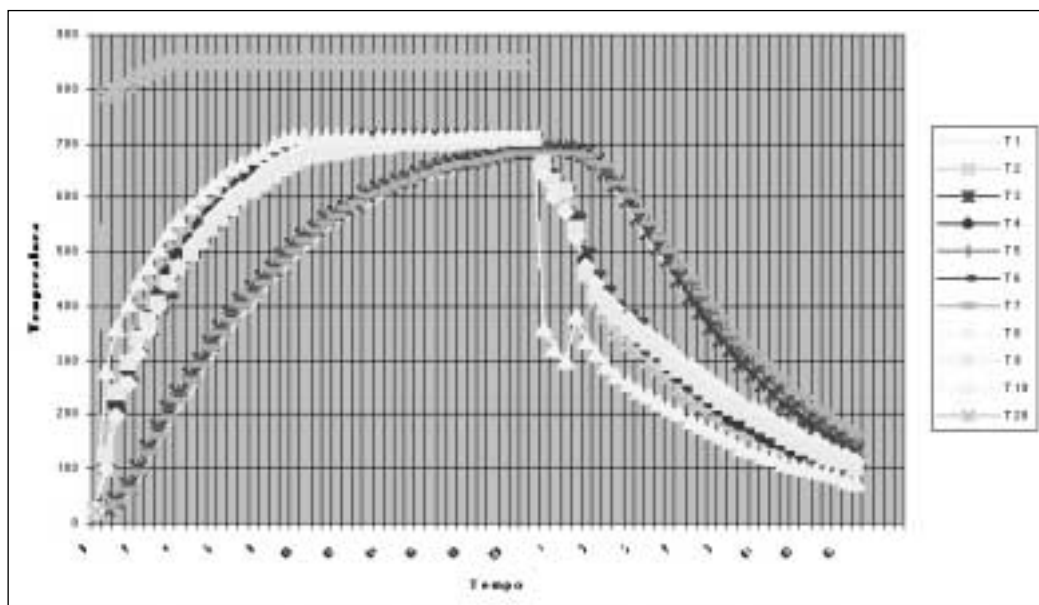
$$K_{rad} = -0,1265 * T + 80 \quad [WK^{-1}m^{-1}]$$

dove

K_{rad} è la costante di conducibilità termica in direzione radiale al rotolo,

Fig. 6 – Tracciati di evoluzione temporale delle termocoppie. La temperatura espressa in °C, il tempo in h.

Fig. 6 – Thermal trends measured by the thermocouples located in the different zones of the coils. The temperature is expressed in °C while the time is expressed in h.



T è, mentre K_{ax} , è la costante di conducibilità in direzione assiale che assume un valore costante

$$K_{ax} = 102 \quad [WK^{-1}m^{-1}].$$

La media delle differenze rilevate tra dati sperimentali e risultati computazionali risulta essere pari al 3.14% (dev.st. 9.8%) delle temperature misurate. Quindi il risultato è soddisfacente e va rilevato che il valore di deviazione standard risente significativamente delle discrepanze che hanno luogo durante i primi 60-90 minuti di trattamento quando la differenza tocca valori massimi pari al 20-30% del valore misurato sperimentalmente. Negli istanti precedenti e negli istanti successivi a tale intervallo temporale le differenze sono di entità del tutto accettabile.

I fenomeni di addolcimento indotti dal processo di ricottura sono stati interpretati sulla base di un modello recentemente proposto da Ferry et al.[5] in relazione ad un acciaio del tutto analogo a quello studiato e prodotto dalla medesima acciaieria. Tale approccio prevede l'evoluzione microstrutturale sulla base dell'effetto cumulativo dei diversi periodi di ricottura: riscaldamento, mantenimento e raffreddamento.

La porzione di materiale ricristallizzato può essere valutata in base al modello JMAK che è stato applicato in diverse formulazioni per problemi analoghi [6,7,8,9,10,11]:

$$X_v(T_i) = 1 - \exp\{-k(T)t^n\}$$

dove

X_v è la frazione ricristallizzata

t il tempo di trattamento [s]

k è una costante del materiale che dipende dalla temperatura dei vari periodi del trattamento, dall'energia di attivazione per il fenomeno di ricristallizzazione (Q), da due costanti caratteristiche del materiale, A e n (tab.6)

n è un esponente caratteristico, noto come costante di Avrami.

A	n	Q [KJ/mol]
4.1 *10 ⁸	1,003	171.6

Tabella 6 – Coefficienti caratteristici per SAE1006.

Table 6 – Characteristic coefficients for SAE1006.

Sotto l'approssimazione che le traiettorie di riscaldamento e quelle di raffreddamento siano costanti il modello si semplifica:

$$X_v(T_i) = 1 - \exp \left\{ -A \left[\frac{T_1^2 nR}{Q} \exp\left(\frac{-Q}{nRT_1}\right)^{1/n} - \frac{T_0^2 nR}{Q} \exp\left(\frac{-Q}{nRT_0}\right)^{1/n} \right] \frac{1}{\gamma_1} - A \exp\left(\frac{-Q}{RT_1}\right)^{1/n} \Delta t - \left[\frac{T_2^2 nR}{Q} \exp\left(\frac{-Q}{nRT_2}\right)^{1/n} - \frac{T_1^2 nR}{Q} \exp\left(\frac{-Q}{nRT_1}\right)^{1/n} \right] \frac{1}{\gamma_2} \right\}$$

dove

γ_1, γ_2 sono rispettivamente i tassi di riscaldamento e di raffreddamento [Ks^{-1}], in questo caso supposti costanti;

T_1 è la temperatura di mantenimento [K];

T_0 è la temperatura di inizio riscaldamento [K];

T_2 è la temperatura di fine raffreddamento [K];

R è la costante dei gas perfetti [$J mol^{-1} K^{-1}$].

I risultati del termine in parentesi relativi agli hot spot e ai cold spot (tab.7) il cui stato termico è determinato dal modello di simulazione sono coerenti con i risultati delle proprietà meccaniche a seguito del processo di ricottura.

pile	hot spot	cold spot
1	$4.2 \cdot 10^{-6}$	$4.1 \cdot 10^{-7}$
2	$4.3 \cdot 10^{-6}$	$4.2 \cdot 10^{-7}$
3	$4.4 \cdot 10^{-6}$	$4.3 \cdot 10^{-7}$
4	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$
5	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$7.3 \cdot 10^{-6}$
6	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$3.1 \cdot 10^{-7}$

Tabella 7 – Valori dell'argomento esponenziale della funzione per la ricristallizzazione statica.

Table 7 – Values of the argument of exponential function of the function for the static recrystallization.

Pur consentendo in tutti i casi una completa ricristallizzazione del materiale, nei casi delle pile 4 e 5 i cicli termici dovrebbero consentire anche maggiori addolcimenti dovuti al fatto che una più precoce ricristallizzazione consente un precoce inizio del processo di accrescimento, provato anche dalle osservazioni metallografiche. All'accrescimento va ascritto il significativo addolcimento. Comunque, tale approccio, pur fornendo già dei risultati plausibili, andrà affinato tenendo conto che i tassi di riscaldamento e di raffreddamento non sono indipendenti dalla temperatura e quindi anch'essi devono subire un processo di integrazione, per cui è auspicabile per il futuro che si pensi all'impiego di tale approccio eventualmente risolto attraverso una opportuna tecnica numerica. Questo risulta ancor più stringente se si tiene conto che il modello di simulazione ha mostrato una dipendenza della conducibilità termica dalla temperatura.

CONCLUSIONI

- Nella presente indagine si è sviluppato un modello di simulazione termica alle differenze finite che, sulla base dei dati sperimentali rilevati con le termocoppie all'interno del

forno a idrogeno, ha consentito di stabilire le costanti di trasmissione del calore che regolano il processo di ricottura.

- Noti tali parametri è possibile procedere a affidabili simulazioni numeriche in grado di guidare gli operatori nell'impostazione dei cicli di riscaldamento e di raffreddamento.
- I risultati sulle proprietà meccaniche del processo di ricottura manifestano l'elevata uniformità che è conseguibile con il processo di ricottura statica in atmosfera di idrogeno.
- Il ciclo termico ed i risultati riscontrati sulle proprietà meccaniche sono stati posti in relazione attraverso l'impiego di un modello relativo alla cinetica di ricristallizzazione che già è in grado di fornire interpretazioni plausibili pur sotto l'ipotesi di tassi di riscaldamento e di raffreddamento costanti. D'altra parte è auspicabile che in un prossimo futuro tale approccio sia posto in interazione con il modello termico sviluppato e che in esso si proceda all'integrazione, rimuovendo l'ipotesi (assai semplificativa dal punto di vista dell'integrazione numerica) che i tassi di riscaldamento siano da considerarsi costanti. Questo provvedimento potrà consentire un ulteriore e consistente miglioramento dei risultati modellistici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G.W.Hess: New Steel, 11 (1993),41
- [2] T.Obara, K.Sakata, T.Irie: Metallurgy of Continuous-Annealed Steel, ed. by B.L.Bramfitt and P.L.Manganon, TMS-AIME, Dallas, Texas, (1982),83
- [3] ASTM Standards: Metal test method and analytical procedure, E112, vol.3.01 (2001), 243-265
- [4] M.Marcandalli, C.Mapelli, W.Nicodemi: "A thermo-mechanical model for the simulation of carbon steel solidification in the mould in continuous casting", Iron-making and steelmaking, in press.
- [5] M.Ferry, D.Muljono, D.P.Dunne: ISIJ Int., 41, 9 (2001), 1053-1061.
- [6] A.N.Kolmogorov: Izv. Akad. Nauk. USSR. Ser. Mathemat., 1(1937),355.
- [7] T.Furu, K.Marthinsen, e.Nes: Mater. Sci. Technol., 6 (1990), 1093.
- [8] V. Erukimovitch, J.Baram: Mater. Sci. Eng. A, 214 (1996), 78.
- [9] R.A. Vandermeer, B.B. Rath: Metall. Trans. A, 20 (1989), 391.
- [10] R.A. Vandermeer, B.B. Rath: Metall. Trans. A, 20 (1989), 1933.
- [11] K. Mukunthan, E.B. Hawbolt, Metall. Trans. A, 27 (1996), 3410.

**EXPERIMENTATION AND MODELLING OF THE ANNEALING
PROCESS PERFORMED IN A HYDROGEN BELL****KEYWORDS:****Steel, steel-making, annealing, modeling,
processes, hydrogen bell**

The annealing performed in hydrogen bell furnace can represent a good alternative with respect to the other annealing process structured to reach high productivity rate, because it can grant a good cleanliness and homogeneous treatment. This is a technique known for several years, but in this study a new version, named HICON-H2, has been taken into account. The efficient heat transmission is assured by the high convection devices rotating at 75 Hz and the atmosphere is completely saturated by 100% H₂ during the annealing period. This atmosphere permits a satisfactory cleanliness of the surface which also decreases the time of the annealing process.

The annealing cycles of SAE1006 (tab.1) featured by different parameters has been observed (table 2). The positive

convection has been proved by the little scatter of the hardness and ductility data among the different coils (table 3) and within any single coil (table 4). The grain size has been measured for each coil (table 5) and then it has been related to the annealing parameters after the definition of the construction of a mathematical model based on the finite difference method to treat the heat transmission in order to define the thermal transmission modality. To define the convective heat transmission coefficients the thermocouples have been placed within the coils (fig.1) during the annealing period and then the heat transmission coefficients have been defined in order to fit the experimental results (fig.6). This permits to simulate correctly the annealing process and by the use of a method recently proposed to describe the static recrystallization. the average grain size of the annealed grain has been related to the characteristic parameters of the annealing cycle, giving good results. So the combined use of the recrystallization model and the determined heat convection can allow a good designing of the annealing process with great savings of money produced avoiding the expensive trial and error procedure.