

Ottimizzazione del processo di riscaldamento per tempra di grandi fucinati mediante analisi FEM

F. Curbis, S. Mengaroni, F. Cianetti, M. Calderini, S. Neri

In questo lavoro è presentata la simulazione del processo di riscaldamento per austenitizzazione di grandi fucinati in acciaio destinati alla tempra differenziale. In ogni trattamento termico, le grandezze controllabili a livello industriale sono il tempo e la temperatura. È quindi agendo su queste che si può ottimizzare il processo per ottenere le proprietà e le microstrutture desiderate per l'acciaio esaminato, e in definitiva massimizzare la qualità del pezzo finale. I prodotti analizzati sono i cilindri di laminazione fucinati, la cui produzione richiede un attento ciclo termico successivo alla deformazione plastica. Infatti, dopo un ciclo termico preliminare di ricottura con lo scopo di facilitare le lavorazioni di sgrossatura alle macchine utensili, questi pezzi vengono sottoposti ad una tempra differenziale per incrementare la durezza dello strato di lavoro, il cui spessore varia in funzione delle specifiche richieste dal cliente. L'ottimizzazione di un processo può essere implementata utilizzando leggi empiriche ed il proprio know-how in prove sperimentali. La simulazione numerica rappresenta uno strumento di previsione che potrebbe favorire un approccio più sistematico e scientifico alla risoluzione, in fase di progetto, di tali problematiche industriali, specialmente quando il rapporto di scala tra il provino sperimentale ed il componente reale è molto elevato, come nel caso oggetto del presente lavoro. Lo strumento numerico tipicamente adottato per simulare tale processo è la modellazione e l'analisi agli elementi finiti (FEM). Avendo come possibili parametri il livello di suddivisione del modello (meshatura), le caratteristiche chimico-fisiche del materiale ed i parametri di scambio termico (entrambe differenziabili topologicamente all'interno del modello stesso) l'approccio FEA consente di simulare sia la forgiatura che i trattamenti termici ed in particolare le fasi di riscaldamento, mantenimento e raffreddamento. I risultati ottenibili sono il campo termico, la distribuzione delle varie fasi ed i valori di tensioni residue derivanti dal trattamento termico stesso. I risultati sono monitorabili nell'intero arco temporale del processo. Questo tipo di analisi agli elementi finiti consente di prevedere le proprietà del pezzo nell'intero arco temporale del processo: una volta caratterizzato il materiale ed i forni di riscaldamento, si ha a disposizione uno strumento capace di prevedere in maniera affidabile i risultati di un trattamento termico. Il software utilizzato in questo studio è il codice FEM commerciale Forge.

Parole chiave: Acciaio - Trasformazioni di fase - Forgiatura - Trattamenti Termici - Modellazione - Controllo processi - Qualità

INTRODUZIONE

Negli impianti di laminazione (di acciaio, alluminio etc.) alcuni dei componenti principali sono i cilindri di laminazione. Ad esempio, negli impianti di laminazione a caldo dell'acciaio nelle gabbie di sbozzatura e finitura sono presenti due coppie di cilindri di lavoro, e due coppie di ci-

lindri di appoggio, che assolvono la funzione di irrigidire la gabbia e di minimizzare la deformazione dei cilindri di lavoro, in modo da poter incrementare le forze di laminazione e quindi la riduzione di spessore del laminando ad ogni passata. I requisiti richiesti per i cilindri di appoggio (figura 1) sono la durezza della tavola per tutto lo spessore dello strato di lavoro, la durezza dei colli e le caratteristiche meccaniche del pezzo, la resistenza a fatica, usura e spalling, e un buon livello di tenacità complessiva del pezzo. Storicamente i primi cilindri di appoggio sono stati realizzati per fusione, prima in monoblocco e poi in maniera composta in modo tale da realizzare uno strato di lavoro di durezza maggiore [1]. Quando poi iniziarono ad essere richiesti dal mercato cilindri dalle proprietà meccaniche

F. Curbis, S. Mengaroni, F. Cianetti

Università degli Studi di Perugia

M. Calderini, S. Neri

Società delle Fucine S.r.l.



Fig. 1 - Cilindro di appoggio alla laminazione, diametro circa 2000 mm

Fig. 1 - Back Up Roll for rolling mill, diameter about 2000 mm

sempre più spinte, si è passati alla realizzazione in acciaio forgiato, che mediamente garantiscono delle proprietà meccaniche decisamente superiori: questo grazie alla deformazione imposta al materiale, che consente di affinare il grano e quindi di incrementare le proprietà meccaniche; inoltre più le deformazioni sono elevate, più la dimensione del grano diminuisce e la resistenza aumenta. Gli acciai utilizzati per la produzione dei cilindri di appoggio sono acciai al carbonio, che presentano elementi di lega che contribuiscono ad aumentarne la temprabilità, soprattutto cromo e molibdeno. I primi cilindri prodotti presentavano una composizione all'1,5%Cr, che però è stata sorpassata dall'introduzione della versione al 3%Cr, e negli ultimi 20 anni dall'ingresso nel mercato dei cilindri al 5%Cr. La microstruttura che questi acciai al C-Cr formano dopo trattamento termico è composta da bainite e martensite rinvenuta; se nella composizione chimica sono presenti Mo e V possono essere presenti dei carburi ad elevata durezza che contribuiscono ad incrementare la resistenza a fatica, la resistenza ad usura ed allo spalling. In questo lavoro si osserverà quindi come, in funzione del materiale, della geometria e delle specifiche tecniche richieste, la modellazione numerica può supportare la produzione di cilindri fucinati per quanto riguarda il trattamento termico.

CICLO DI PRODUZIONE DEI CILINDRI FUCINATI

Il processo di produzione dei cilindri di laminazione preso in considerazione è quello realizzato dalla Società delle Fucine (gruppo Acciai Speciali Terni), azienda operante nel settore dei grandi fucinati in acciaio dalla ultra centenaria esperienza; la manufacturing chart di riferimento è quella presentata in figura 2. Il primo passo è la fusione dei rottami metallici in un forno ad arco, trattandosi di una acciaieria a ciclo elettrico; qui il rottame viene portato allo stato liquido e, dopo la scorifica, viene trasferito in una siviera. A questo punto, la siviera viene trasferita in un impianto ASEA, dove l'aggiunta di ferroleghie e lo stirring con argon permettono di far raggiungere all'acciaio la composizione chimica desiderata e di minimizzare il contenuto di idrogeno, notevolmente dannoso per la tendenza a formare i così

detti "flocchi" [2]. Quindi, la siviera viene trasferita in un impianto di Vacuum Deoxidation (VD) per regolare la quantità di carbonio presente e per realizzare il vuoto all'interno della siviera stessa, preparando così il bagno di acciaio liquido al colaggio che si effettua quindi a pressione minore di quella atmosferica (Vacuum Stream Degassing). Il colaggio realizza quindi un lingotto delle dimensioni stabilite, colando il quantitativo necessario utilizzando più siviere; il lingotto colato viene quindi lasciato raffreddare finché non raggiunge una temperatura idonea allo strappaggio. Tale temperatura è nell'ordine dei 500 °C, ed il lingotto, una volta estratto, da tale temperatura viene recuperato nei forni di riscaldamento fino alla temperatura di fucinatura, superiore ai 1200 °C. La fucinatura, oltre a far raggiungere al lingotto la forma "grezza" del cilindro, consente di affinare

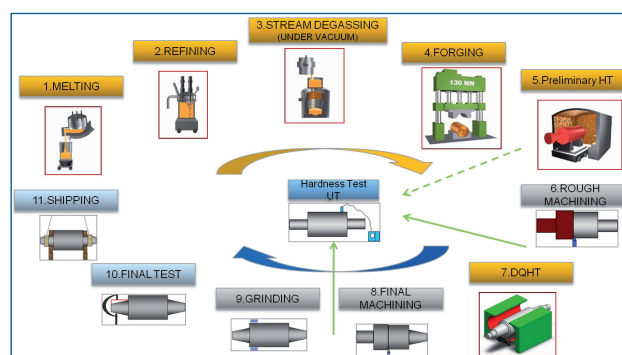


Fig. 2 - Processo di produzione di cilindri di laminazione fucinati

Fig. 2 - Forged back up rolls manufacturing chart

la dimensione del grano (incremento conseguente delle proprietà meccaniche) e di richiudere le porosità interne del lingotto (miglioramento della qualità del pezzo e della sua affidabilità): in questo modo si massimizza la proprietà più importante richiesta per questo componente, ossia la tenacità.

Il trattamento termico preliminare ha come scopo principale di impartire al materiale le proprietà necessarie, in termini di durezza, tenacità e resistenza a fatica, nella zona dei colli e nel cuore della zona della tavola; le strutture in questione sono bainitiche o perlitiche lamellari, ottenute mediante una ricottura composta da normalizzazione e rinvenimento in forni stazionari orizzontali. La sgrossatura alle macchine utensili (tornitura orizzontale) consente di realizzare un disegno idoneo al trattamento termico di qualità, che si realizza in un forno a bruciatori rotativo accoppiato ad una macchina per tempra spray. Nel forno rotativo si austenitizza solo un certo spessore della tavola, ossia lo strato di lavoro del cilindro, per il quale il cliente richiede uno specifico valore di durezza, notevolmente superiore al bulk (figura 3); una volta temprato, il materiale che costituisce lo strato di lavoro presenta anche caratteristiche di resistenza all'usura, alla fatica ed allo spalling incrementati, con una notevole uniformità spaziale grazie

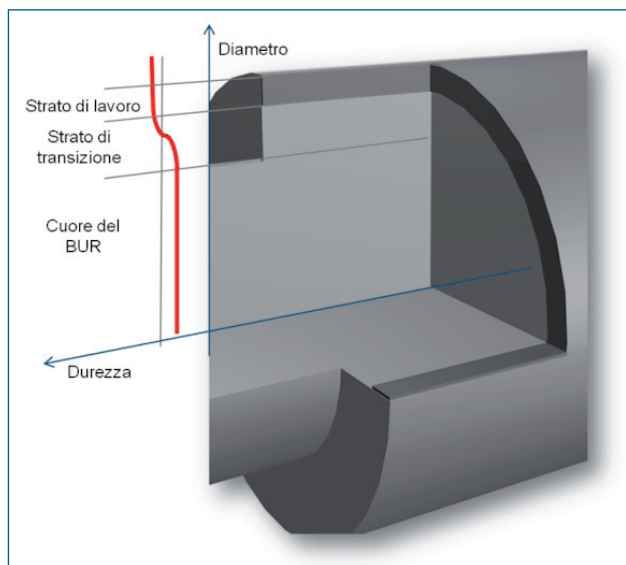


Fig. 3. Andamento della durezza nella sezione del cilindro

Fig.3 – Hardness trend vs. roll depth

alla rotazione durante il trattamento. La struttura di tempra generata va rinvenuta per assicurare la corretta tenacità anche allo strato di lavoro, riducendo le tensioni indotte dal trattamento termico.

Infine, il cilindro viene tornito nuovamente per essere portato alle quote di progetto, ed in ultimo rettificato per ottenere anche la rugosità prevista dal cliente. Ogni fase è intervallata dai controlli qualitativi (distruttivi e non) per verificare step by step che il pezzo risponda alle specifiche qualitative previste.

RISCALDO PER TEMpra: ANALISI DEL PROCESSO E SIMULAZIONI FEM

La tempra differenziale viene realizzata con un'apposita macchina, visibile in figura 4, che prima austenitizza lo strato di lavoro del cilindro, e poi lo sottopone alla tempra (mediante aria, acqua nebulizzata, o con un mix di questi due mezzi di raffreddamento). La fase di austenitizzazione vera e propria è in realtà preceduta da un'altra fase, detta preriscaldamento, in cui il cilindro viene interamente riscaldato ad una temperatura leggermente inferiore a quella del rinvenimento del trattamento termico preliminare, in modo tale da non compromettere le proprietà meccaniche raggiunte nel cuore del fucinato e sui colli. Il preriscaldamento viene effettuato in un forno convenzionale a suola mobile, adiacente al forno rotativo per minimizzare i tempi di movimentazione. Una volta caricato il cilindro sul carro dotato di rulli, viene messo in rotazione ad una velocità prefissata; il carro trasla nella zona del forno, già preriscaldato ad una temperatura conveniente, ed il trattamento ha inizio. La temperatura è monitorata grazie all'ausilio di tre pirometri, puntati al centro e sui bordi della tavola, e da una termocoppia che misura la temperatura della camera.

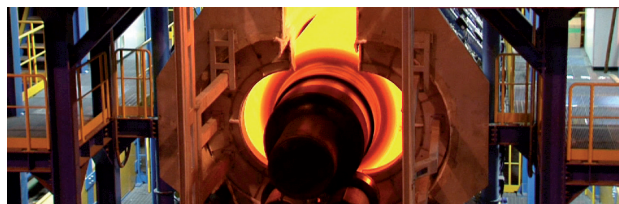


Fig. 4 - Impianto per la tempra differenziale dei cilindri di laminazione

Fig. 4 – Rotating furnace for quality heat treatment

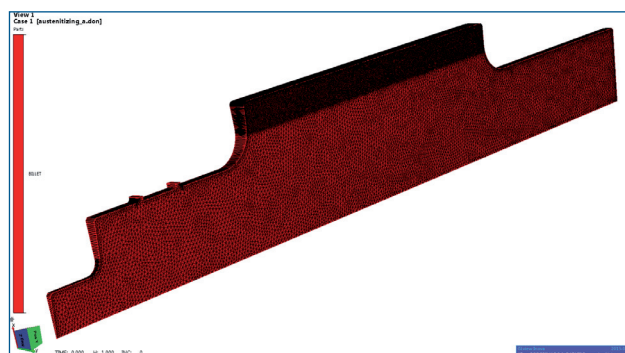


Fig. 5 - Meshatura della geometria di riferimento

Fig. 5 – 2-D roll geometry mesh

La geometria presa in esame è quella di un Back Up Roll caratterizzato dal diametro della tavola di 1350 mm, mentre i colli sono di 880 mm di diametro; il pezzo ha una lunghezza totale di 4000 mm circa. Si tratta del profilo così detto "sgrossato" per il trattamento termico di qualità, infatti si nota la gola su uno dei colli dove il cilindro si accoppia con il rullo motrice dell'impianto di trattamento. La discretizzazione (meshatura) della geometria è differenziata: un cospicuo spessore della tavola, ben maggiore dello strato di lavoro di progetto, è stato meshato in maniera molto più fitta rispetto ai colli ed al resto del cilindro, visto che l'interesse è focalizzato proprio sullo strato di lavoro; prima di procedere con la scelta della dimensione di mesh è stato verificato che questa non influenzi i valori di temperatura calcolati dal codice. Come mostra la figura 5, la simulazione è di tipo bidimensionale, sfruttando così l'assialsimmetria della geometria per ridurre i tempi di calcolo. Inoltre sono stati posizionati una serie di sensori per la registrazione dei dati, dalla pelle fino all'asse, in varie posizioni: centro tavola, 50 e 200 mm dal bordo tavola ed anche al centro dei colli. Il materiale adottato per la simulazione è stato scelto nel database del software; le proprietà termofisiche ed elastiche del materiale utilizzate sono ovviamente funzione della temperatura, e lo stesso vale per il coefficiente di trasmissione del calore all'interno del forno di trattamento, come verrà meglio chiarito nel paragrafo successivo.

La metodologia utilizzata è abbastanza standardizzata [5], ed è schematizzata nella figura 6. La simulazione del-

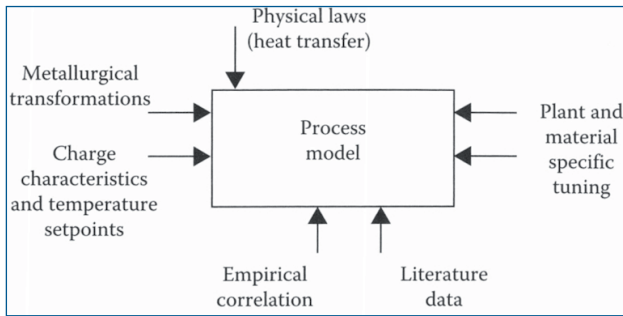


Fig. 6 - Metodologia di simulazione di processo di trattamento termico

Fig. 6 - Heat treatment simulation methodology

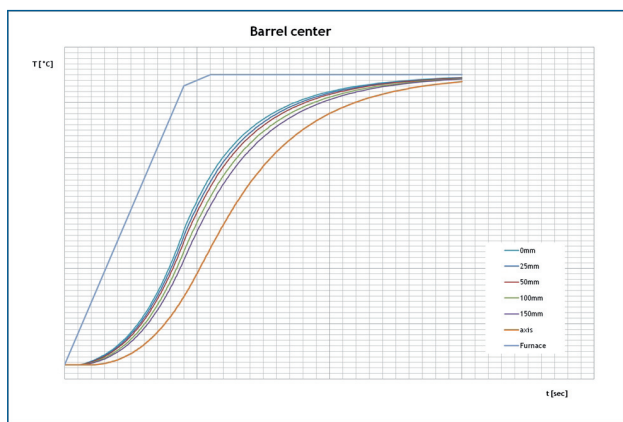


Fig. 8 - Curve di preriscaldamento relative al centro della tavola del cilindro

Fig. 8 - Pre-heating diagrams from barrel centre sensors (from surface to depth)

la fase di preriscaldamento è fondamentale, in quanto permette di stabilire il tempo necessario per portare il pezzo ad una temperatura uniforme dalla pelle al cuore, o altresì di conoscere il campo termico nel fucinato dopo un certo numero di ore di riscaldamento. In entrambi i casi a fine simulazione si ha a disposizione la mesh di partenza per la simulazione dell'austenitizzazione, con relativi campi termici e deformativi dovuti alla dilatazione termica. In figura 7 è presente il campo termico del fucinato calcolato alla fine del preriscaldamento, mentre nelle figure 8 e 9 sono presentati dei grafici rappresentativi della simulazione FEM di un preriscaldamento, con tracciati relativi ai sensori posizionati alle varie profondità (0 mm → 150 mm, axis) ed il tracciato della curva del forno ("Furnace"). Le curve lasciano intendere come il considerevole spessore del cilindro nella zona centrale allunghi di molto i tempi di riscaldamento, anche dopo l'uniformazione in superficie; ovviamente le zone che si scaldano più rapidamente sono i colli ed il bordo tavola. In figura 10 è riportato l'andamento delle temperature del trattamento preso come riferimento: le curve riguardano i sensori posti a centro tavola, dalla superficie fino all'asse del cilindro; la figura 11 riporta un istante della simulazione dell'austenitizzazione al forno rotativo; si notino le sfer-

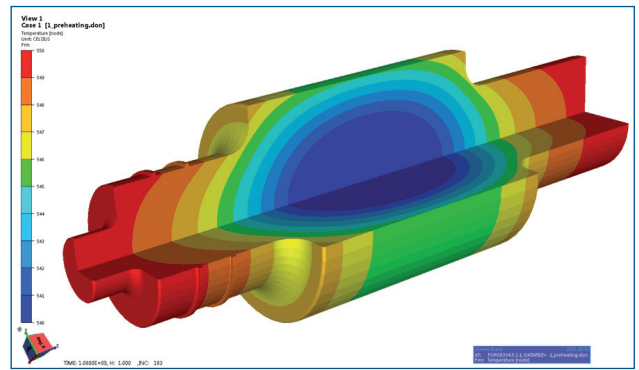


Fig. 7 - Campo termico del cilindro al termine della fase di preriscaldamento

Fig. 7 - Back up Roll thermal field during pre-heating process

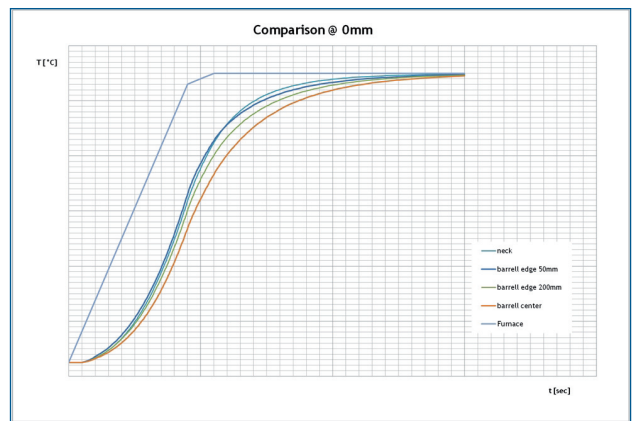


Fig. 9 - Curve di preriscaldamento a 0 mm di tavola (centro e bordi) e colli

Fig. 9 - Pre-heating diagrams from surface sensors of barrel (centre and edge) and necks

rette blu che rappresentano i sensori citati in precedenza, che permettono la registrazione su file dei dati relativi a temperatura, tensioni e microstruttura. La simulazione dell'austenitizzazione al forno rotante parte quindi con la mesh risultante dalla simulazione del preriscaldamento. In prima approssimazione, compatibilmente con le macchine a disposizione per l'esecuzione dei calcoli agli elementi finiti, il forno simulato è di tipo statico; questa approssimazione è compensata dall'adozione di coefficienti di trasmissione del calore tali da replicare il processo con un elevato grado di fedeltà: ciò è stato reso possibile dal modulo di ottimizzazione del codice, Forge 2011 della Transvalor. Grazie ad esso infatti, prendendo come riferimento i dati di un trattamento realizzato in precedenza, è possibile stimare il coefficiente di trasmissione del calore a partire dalle temperature misurate dalla termocoppia di camera e dalle termocoppie che hanno misurato la temperatura del pezzo. In questo caso quindi l'ottimizzatore ha stimato un coefficiente di trasmissione del calore equivalente in grado di simulare correttamente il processo reale

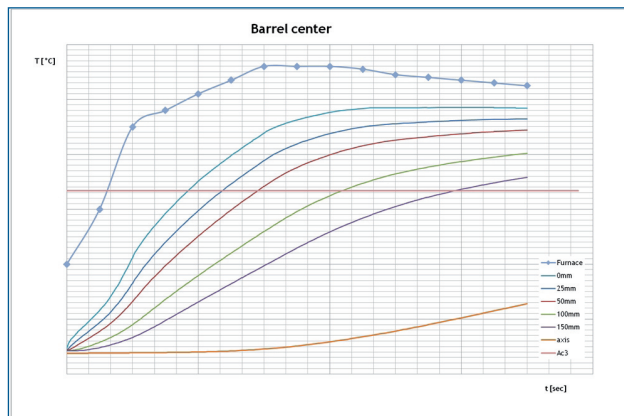


Fig. 10 - Simulazione del processo di austenitizzazione partendo da dati reali

Fig. 10 - Austenitizing simulation result starting from real data

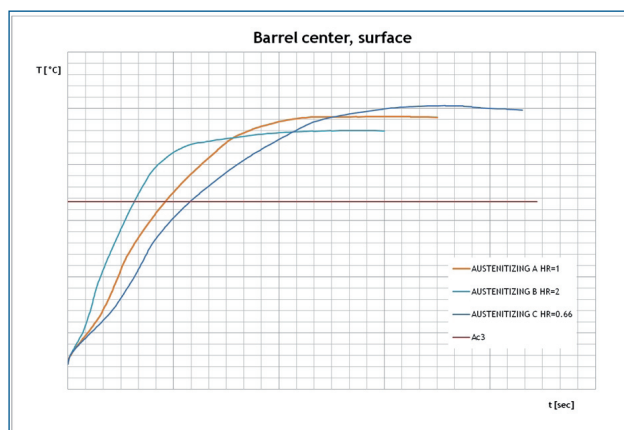


Fig. 12 - Andamento della temperatura a centro tavola (in superficie) al variare del gradiente di riscaldamento

Fig. 12 - Barrel center surface temperature vs. heating rate

RISULTATI

L'analisi di sensibilità considerata è quella sul gradiente termico utilizzato per la rampa termica di salita nella fase di austenitizzazione. Questo perché, una volta fissata la temperatura di stasi del forno, la variazione della velocità di salita della temperatura comporta il raggiungimento di temperature diverse sulla superficie del pezzo, e di conseguenza anche nel suo interno il profilo termico risulterà differente. Conoscendo le specifiche di progetto del pezzo che deve essere caratterizzato da un certo spessore dello strato di lavoro, è importante verificare quale può essere la temperatura in profondità, in ogni singolo concio di materiale, vista anche la correlazione esistente tra la temperatura di austenitizzazione stessa e la temprabilità del materiale [3] [4]. Le simulazioni sono riportate nei grafici in figure 12-15; i valori di Heating Rate implementati nei calcoli sono:

- Austenitizing A: $HR/HR_{ref} = 1$;
- Austenitizing B: $HR/HR_{ref} = 2$;
- Austenitizing C: $HR/HR_{ref} = 0.66$.

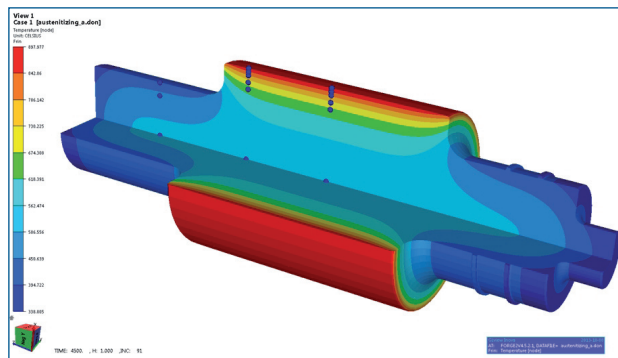


Fig. 11 - Campo termico del fucinato durante il processo di austenitizzazione

Fig. 11 - Forging's thermal field during austenitizing process

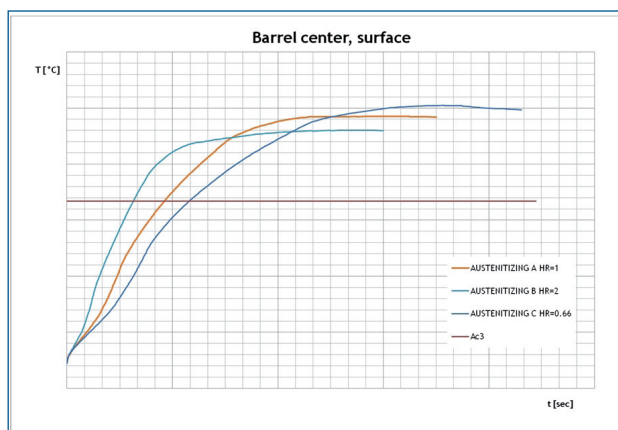


Fig. 13 - Andamento della temperatura a bordo tavola (in superficie) al variare del gradiente di riscaldamento

Fig. 13 - Barrel edge surface temperature vs. heating rate

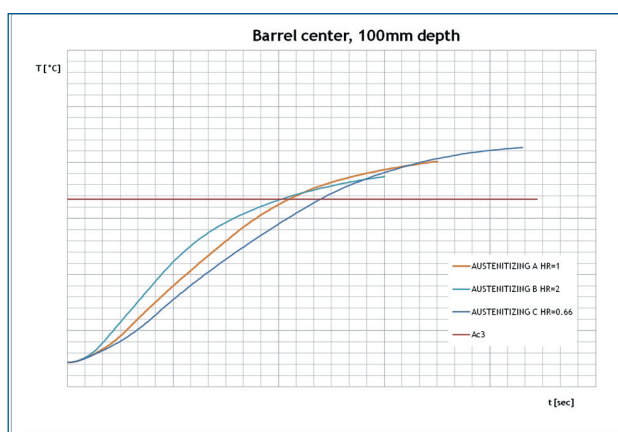


Fig. 14 - Andamento della temperatura a centro tavola (100 mm) al variare del gradiente di riscaldamento

Fig. 14 - Barrel center, 100 mm depth temperature vs. heating rate

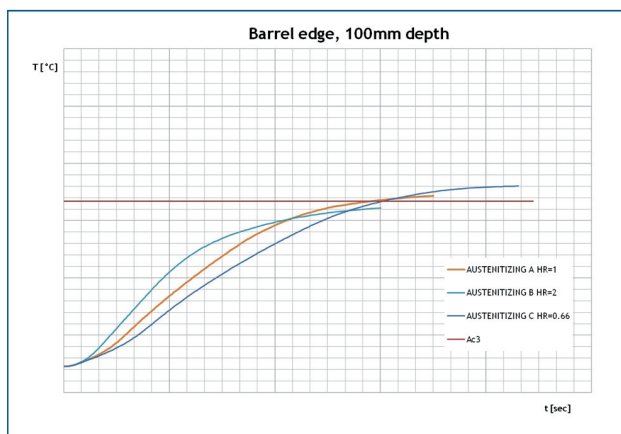


Fig. 15. Andamento della temperatura a bordo tavola (100 mm) al variare del gradiente di riscaldamento

Fig.15 – Barrel edge, 100 mm depth temperature vs. heating rate

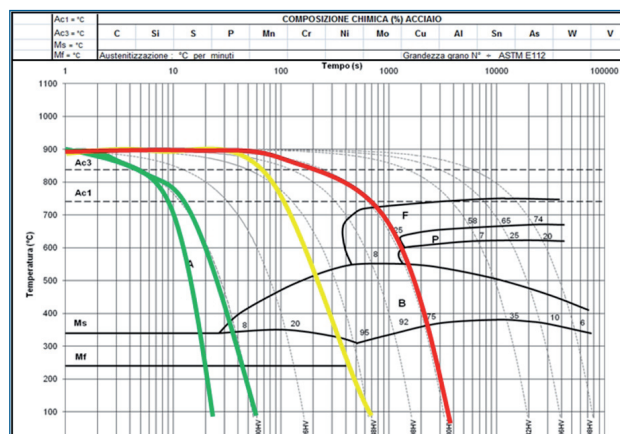


Fig. 16. Determinazione delle microstrutture ottenute in tempra mediante curve CCT

Fig.16 – Evaluation of the microstructure obtained with different cooling rates

I grafici mostrano come, variando il gradiente di riscaldamento e mantenendo costante il tempo di stasi, il campo termico nella sezione del cilindro varia considerevolmente. Essendo quindi la distribuzione termica finale il punto di partenza della fase di raffreddamento del processo di tempra, è necessario che la temperatura sia superiore ad Ac3 per almeno tutto lo strato di lavoro, in modo tale da ottenere delle strutture sufficientemente dure dopo il raffreddamento. È da notare come, non tutto lo spessore austenitizzato può essere trasformato in una struttura di tempra (martensite/bainite inferiore) a causa del diverso gradiente di raffreddamento che investe, ad esempio, la superficie del pezzo piuttosto che il concio di materiale a 75 o 100 mm di profondità [6] [7]: come si può capire dalla figura 16, una volta nota la curva CCT del materiale in questione, si può stabilire la minima velocità di raffreddamento in superficie che garantisce la trasformazione anche in profondità. La curva di raffreddamento in rosso, che transita nella regione ferritico-perlitica del diagramma, è un esempio di ciò che si deve evitare in fase di tempra.

È necessario però che lo spessore dello strato austenitizzato rientri in un certo range: il rapporto tra questo spessore ed il diametro totale del cilindro non deve essere eccessivo per evitare rotture per via delle tensioni indotte dal raffreddamento, ma deve essere comunque sufficiente a soddisfare le specifiche di progetto del componente. Ad esempio, la figura 15 mostra come per il caso in esame applicando un gradiente di riscaldamento doppio rispetto a quello di riferimento, a 100 mm di profondità (valore tipico di spessore temprato richiesto) non si raggiunge la temperatura critica Ac3; al contrario salendo più lentamente si riesce a far penetrare il calore più in profondità. Ovviamente questa è solo una lettura qualitativa del fenomeno; la modellazione FEM, applicata ad ogni singolo caso caratterizzato da una certa geometria, materiale e specifiche di progetto, consente di estrapolare valutazioni quantitative in grado di guidare la progettazione di ogni singolo trattamento termico.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato analizzato il processo di riscaldamento per austenitizzazione di cilindri di laminazione fucinati, destinati alla tempra differenziale. Come si è visto, il trattamento termico in questione è il passo fondamentale per raggiungere le caratteristiche di progetto che il prodotto necessita; di conseguenza è stato oggetto di una attenta analisi per implementarne la simulazione agli elementi finiti. Lo studio FEM è partito dalla simulazione della fase di preriscaldamento per avere a disposizione le reali condizioni iniziali del pezzo per la fase di austenitizzazione. Una volta trovate le condizioni per simulare fedelmente il processo, è stato effettuato uno studio di sensibilità per valutare l'effetto di un parametro di processo, il gradiente di riscaldamento, sulla qualità finale del fucinato. Il proseguimento naturale di questa analisi è il passaggio ad un tipo di simulazione dinamica, ovvero che simuli anche la rotazione del pezzo all'interno del forno. In parallelo, la simulazione della tempra spray è di certo lo step successivo da realizzare per l'ottimizzazione complessiva del trattamento termico di qualità di questo tipo di fucinati.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] L.W.Martson, S.Price, J.Mees, M.G. Kearney, Improved in-service performance of large forged back up rolls, Atti del 13th International Forgemasters Meeting, Busan (Korea), 1997.
- [2] G.Panza, I fiocchi di idrogeno: genesi, conseguenze e cure, Corso per Forgiatori AIM, Iseo (Italy), 2012.
- [3] A.Berretta, L.Callegari, Manufacturing of Back up rolls and work rolls, atti dell'11th International Forgemasters Meeting, Terni (Italy), 1991.
- [4] F.Curbis, S.Mengaroni, S.Neri, M.Calderini, A.Di Schino, Analisi dell'effetto degli elementi di lega sulla temprabilità e sul comportamento al rinvenimento di acciai per back up rolls a ridotto tenore di molibdeno, atti del 34 °Convegno Nazionale AIM, 2012.
- [5] C.Hakan Gur, J.Pan, Handbook of thermal process modeling of steels, IFHTSE, 2009.
- [6] M.A.Grossman, E.C.Bain, Principles of Heat Treatment, 5th edition, ASM, USA, 1964.
- [7] K.Iijima, The effect of austenitizing conditions on the mechanical properties and on hardenability of hardened carbon steel, Trans. JIM vol.4, 1963.

Analysis and optimization of heating process for large forgings quenching through finite elements analysis

Keywords: Heat Treatments - Modeling - Quality - Process control

In this paper the austenitizing phase of differential quenching treatment for large steel forgings is presented. Time and temperature are the variables that could be industrially-controlled in each heat treatment; so it is working on them that makes possible to optimize the process and then to maximize the final product quality. The analyzed products are the forged back-up rolls: they are characterized by an accurate thermal cycle after plastic deformation. Actually, after a preliminary thermal cycle realized to facilitate the rough machining operations, they are differentially quenched in order to increase the working layer hardness, which thickness is function of customer's specifications. Numerical analysis and, more precisely, FEM simulation, is a useful forecast tool to improve a scientific approach in industrial criticality resolution, especially when product and laboratory samples dimensions ratio is very high like in this case. In this field the obtainable results from a FEM analysis are thermal field, phase distribution and thermal induced stress distribution after heat treatment. In this case of study the FEM software used is Forge 2011.