

# Previsione delle caratteristiche qualitative di prodotti laminati tramite definizione dei parametri termomeccanici di lavorazione: il sistema Promet 4.0

M. El Mehtedi, F. Pegorin, S. Spigarelli, A. Lainati

*L'obiettivo del progetto di ricerca, del quale viene descritto in questa sede il prodotto finale, era la messa a punto di un metodo di previsione della microstruttura che, tenendo conto delle condizioni di laminazione e raffreddamento, fosse in grado di anticipare le principali caratteristiche meccaniche e microstrutturali del laminato. Il modello è stato sviluppato partendo dalle conoscenze teoriche sviluppate dai molti ricercatori che si sono occupati di queste problematiche, e dall'esperienza accumulata nell'attività di progettazione di impianti. Al fine di consentire la massima flessibilità operativa all'utilizzatore, il software prevede che siano fornite le condizioni operative di laminazione (riduzione per passata, temperatura, tempo intergabbia, temperatura di preriscaldamento, eventuale profilo di raffreddamento), e dispone di un database di oltre 100 acciai, contenente le curve CCT e le proprietà meccaniche in relazione alla velocità di raffreddamento. Lo strumento fornisce la curva CCT, opportunamente modificata per tener conto della microstruttura del laminando, con sovrimposta la traiettoria di raffreddamento impostata dall'operatore, nonché i dati microstrutturali e meccanici di interesse per quella determinata classe di acciai. Il software è stato validato tramite confronto diretto con le proprietà di prodotti laminati in condizioni controllate, ottenendo un'eccellente capacità previsionale.*

## Parole chiave:

acciaio, deformazioni plastiche, laminazione, tratt. termici, proc. termomeccanici, simulazione numerica, produzione proprietà

## INTRODUZIONE:

### L'IMPORTANZA DEL CONTROLLO DELLE CONDIZIONI DI LAMINAZIONE NEI MODERNI IMPIANTI

La temperatura, la velocità di deformazione e il raffreddamento successivo alla laminazione possono determinare caratteristiche tecnologiche tali da poter eliminare, in alcuni prodotti, successivi costosi trattamenti termici. Alla fine della laminazione il pezzo lavorato ha una temperatura ancora molto alta, che dipende sia dall'impianto sia dai parametri di laminazione adottati. Le moderne tecnologie prevedono un controllo costante della temperatura nelle varie fasi del processo, incluso il raffreddamento finale dopo l'ultima gabbia in presa, e dell'evoluzione del grano austenico. Le fasi più interessanti del processo sono: a. laminazione a temperatura controllata nel treno sbozzatore e intermedio; b. raffreddamento ad acqua a monte e a valle delle gabbie di finitura; c. raffreddamento controllato su linee di evacuazione.

Per i prodotti in barre vengono usati letti debitamente proporzionati in lunghezza e larghezza, dove i prodotti, una volta scaricati, vengono traslati tramite appositi longheroni mobili e

processati durante la loro movimentazione mediante raffreddamento naturale, forzato o ritardato in accordo alle specifiche richieste. Per il prodotto in rotoli vengono usate differenti linee di movimentazione, ma sempre dotate di dispositivi raffreddanti, quali aria o acqua, e/o cappe isolanti nel caso di necessità di raffreddamenti lenti.

L'obiettivo del progetto di ricerca del quale viene descritto in questa sede il prodotto finale era precisamente la messa a punto di un metodo di previsione della microstruttura che, tenendo conto delle condizioni di laminazione e raffreddamento, fosse in grado di anticipare le principali caratteristiche meccaniche e microstrutturali del prodotto finale.

## INQUADRAMENTO GENERALE:

### GLI ASPETTI MICROSTRUTTURALI DELLA DEFORMAZIONE A CALDO

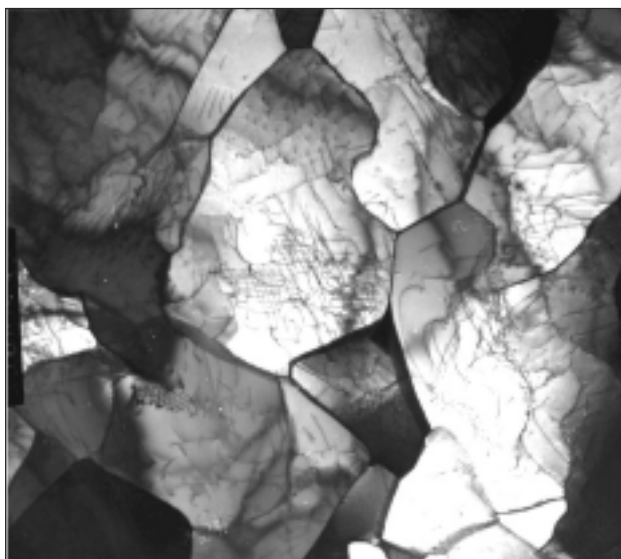
La laminazione a caldo non determina solo un cambiamento di forma del materiale lavorato, ma ne modifica sostanzialmente anche la microstruttura. Da un punto di vista microstrutturale, durante la prima fase della deformazione si hanno grani progressivamente sempre più deformati, all'interno dei quali, per effetto dei meccanismi di ripristino legati alle alte temperature, si formano sottostrutture (sottograni, Figura 1).

I fenomeni di ripristino che avvengono durante la deformazione vengono definiti dinamici; nel ripristino dinamico (DRV) si ha l'effetto concorrente di fenomeni microstrutturali di addolcimento e di incrudimento. Al crescere della deformazione ad una data temperatura e per una certa velocità di deformazione, la resistenza del materiale aumenta, fino ad un valore che poi rimane sostanzial-

M. El Mehtedi, S. Spigarelli

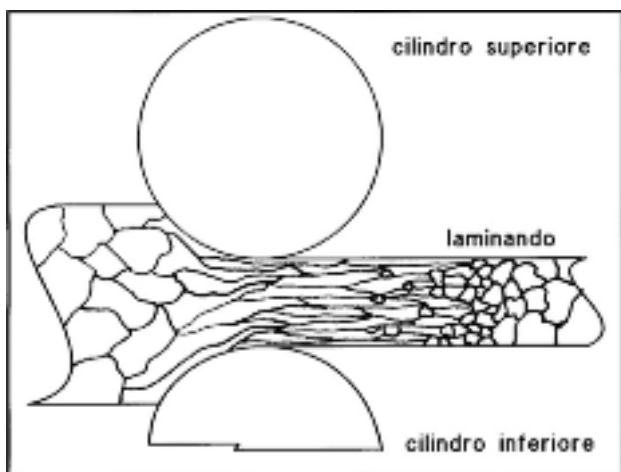
Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche,  
Università Politecnica delle Marche, 60123 - Ancona (Italy)  
tel. +390712204746, fax. +390712204801  
email: [elmehtedi@univpm.it](mailto:elmehtedi@univpm.it)

F. Pegorin, A. Lainati  
Siemens-VAI, Marnate



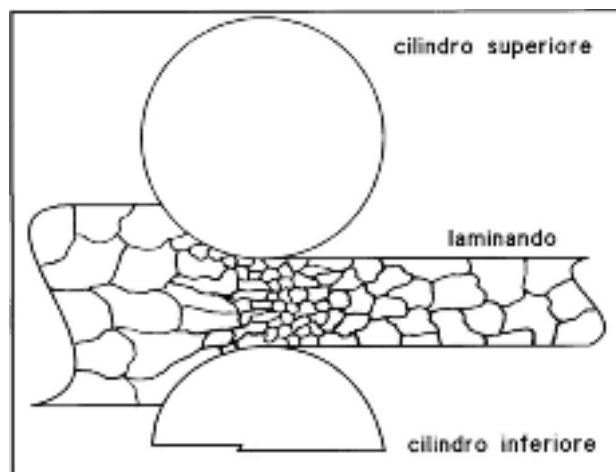
**FIG. 1** *Struttura a sottograni formatasi durante la deformazione a caldo di un acciaio inossidabile austenitico (foto ottenuta tramite microscopia elettronica in trasmissione, TEM).*

*Sub-grain structure formed during hot deformation of austenitic stainless steel (photo obtained by transmission electron microscopy, TEM).*



**FIG. 2** *Laminazione di un metallo che presenta solo ripristino dinamico; la figura illustra schematicamente come dai grani deformati comincino a formarsi nuovi nuclei ricristallizzati soltanto dopo la deformazione, grazie al processo della ricristallizzazione statica. Se i tempi di permanenza ad alta temperatura sono lunghi, si ha ricristallizzazione completa e successivamente crescita del grano.*

*Rolling of a metal which has only a dynamic recovery; the figure illustrates schematically how the deformed grains start to form new recrystallized nuclei only after the deformation, thanks to the static recrystallization phenomenon. If the holding time at high temperature is long, there is a complete recrystallization and subsequent grain growth.*



**FIG. 3** *Laminazione di un metallo che presenta ricristallizzazione dinamica; la figura illustra schematicamente come dai grani deformati comincino a formarsi nuovi nuclei ricristallizzati, grazie al processo della ricristallizzazione dinamica.*

*Rolling of a metal which has a dynamic recrystallization; the figure illustrates schematically how new recrystallized nuclei begins to form from the deformed grains there, thanks to the dynamic recrystallization process.*

mente costante (stadio stazionario). In questa fase la dimensione dei sottograni rimane costante, fenomeno è dovuto al bilanciamento dei processi di addolcimento ed incrudimento. Va osservato che l'equilibrio che si consegue è di tipo dinamico, dal momento che anche se la dimensione media dei sottograni rimane costante, i confini di sottograno si evolvono, spostandosi, e varia, seppur di poco, l'orientazione dei sottograni. Se, al termine della deformazione, il metallo viene raffreddato in maniera sufficientemente rapida, si può prevenire con un certo successo il fenomeno della ricristallizzazione statica (SRX), cioè il formarsi, a partire dalla microstruttura deformata, di nuovi grani. Nel caso in cui non avvenga un raffreddamento sufficientemente rapido, come nell'esempio di laminazione riportato in Figura 2, la struttura deformata tende a ricristallizzare in maniera statica, e se la permanenza ad elevata temperatura è sufficientemente lunga, si può avere anche la crescita dei grani ricristallizzati, con una conseguente caduta delle caratteristiche meccaniche del prodotto finale.

Nonostante ciò, la maggior parte dei metalli che subiscono soltanto DRV tende a ricristallizzare staticamente in maniera piuttosto lenta, in relazione anche al fatto che, subito dopo la deformazione, avviene anche un certo grado di ripristino statico. La Figura 3 mostra, in maniera molto schematica, come si evolve durante la laminazione la struttura di un materiale che presenta ricristallizzazione dinamica (DRX); nella figura si è supposto che la ricristallizzazione avvenga già per deformazioni particolarmente basse, e che si abbia una fase di accrescimento statico; come già visto, dopo la laminazione potrebbe avvenire un secondo processo di ricristallizzazione, di tipo statico, i cui effetti non sono riportati nella figura.

Per una data deformazione e alla stessa velocità di deformazione, nei metalli di questa classe la dimensione dei sottograni è più piccola che non nei materiali in cui si hanno efficienti fenomeni di ripristino dinamico. Man mano che la deformazione aumenta, inizia il processo della ricristallizzazione dinamica. Per avere l'inizio della DRX, quindi, è necessario superare un valore minimo della deformazione; la resistenza del materiale, man mano

FIG. 4

Schermata di selezione del materiale, con relativa curva CCT calcolata in base alle condizioni impostate per il ciclo.

Selection screen of the material, with relative CCT curve calculated according to the conditions set for the schedule.

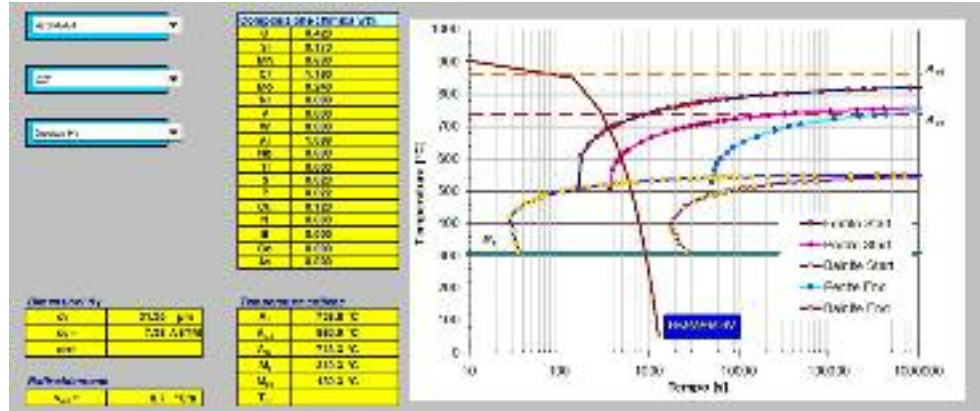
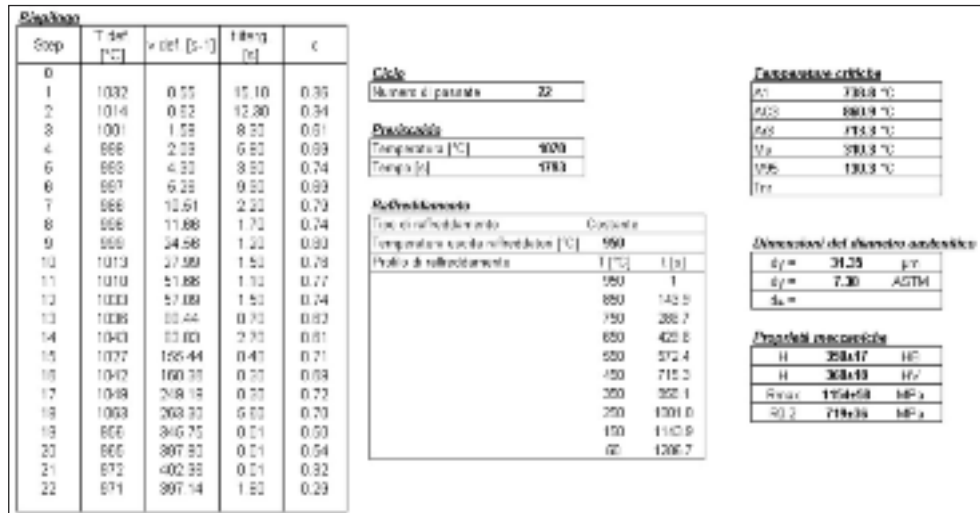


FIG. 5

Foglio di riepilogo in cui vengono sintetizzati i dati di input relativi al ciclo di laminazione: temperatura di lavorazione ( $T_{def}$ ), velocità di deformazione ( $v_{def}$ ), tempo intergabbia ( $t_{iterg}$ ), deformazione ( $\epsilon$ ), temperatura e durata di preriscaldamento, curva di raffreddamento. Il foglio riporta anche le proprietà meccaniche a temperatura ambiente del laminato.



Summary sheet in which it has been synthesized the input data related to the rolling schedule: deformation temperature ( $T_{def}$ ), strain rate ( $v_{def}$ ), interpass time ( $t_{iterg}$ ), strain ( $\epsilon$ ), temperature and time of preheating, cooling rate. The sheet also shows the mechanical properties at room temperature of the final rolled.

che esso si deforma, raggiunge un massimo, per poi decrescere per l'instaurarsi della ricristallizzazione. Anche in questo caso, come nella SRX, la ricristallizzazione è legata ai due fenomeni della nucleazione e della crescita dei nuovi grani; per le alte velocità di deformazione che interessano i processi di laminazione, la velocità di nucleazione è più elevata di quella di crescita, e si ha il fenomeno della ricristallizzazione continua sopra descritto.

### IL SOFTWARE PROMET 4.0

Il modello è stato sviluppato partendo dalle conoscenze teoriche sviluppate dai molti ricercatori che si sono occupati di queste problematiche [1-9]. In particolare si doveva tener conto principalmente dei seguenti aspetti:

- l'effetto della composizione chimica sulle curve di raffreddamento (CCT) e sulle temperature critiche Ar3 ed Ar1 (CCT)
- l'effetto della dimensione del grano sulla posizione delle curve CCT
- l'entità delle deformazioni impartite in ogni singola passata di laminazione
- le temperature ed i tempi di preriscaldamento imposti al materiale prima della laminazione e il relativo effetto sulla dimensione del grano austenitico di partenza
- i tempi intergabbia
- la eventuale presenza di raffreddatori e le relative leggi di raffreddamento imposte al materiale laminato
- le cinetiche di ricristallizzazione statica fra una passata e l'altra (frazione ricristallizzata, costanti cinetiche, deformazione

- critica per l'inizio della ricristallizzazione statica temperatura di non ricristallizzazione) (vedasi Appendice)
- le cinetiche di ricristallizzazione dinamica (frazione ricristallizzata, costanti cinetiche) (vedasi Appendice)
- le cinetiche di crescita del grano ricristallizzato staticamente o dinamicamente (vedasi Appendice).

Al fine di consentire la maggiore flessibilità operativa all'utilizzatore, il software prevede che debbano essere fornite le condizioni operative di laminazione (riduzione per passata, temperatura, tempo intergabbia, temperatura di preriscaldamento, eventuale profilo di raffreddamento); il software dispone di un database di oltre 100 acciai, contenente le curve CCT e le proprietà meccaniche in relazione alla velocità di raffreddamento, calcolati in condizione standard. Una volta scelto il materiale dal database, ed impostati i dati di input, si ottiene il risultato dell'elaborazione sotto forma di curva CCT con sovrimposta la traiettoria di raffreddamento impostata dall'operatore, nonché i dati microstrutturali e meccanici di interesse per quella determinata classe di acciai (per esempio dimensione del grano, durezza e resistenza a trazione per acciai al carbonio). Il calcolo della dimensione del grano austenitico in uscita del treno di laminazione, che a sua volta è funzione dei parametri di lavorazione (deformazione imposta in ogni singola gabbia e relative temperature e velocità di deformazione, temperatura e tempo intergabbia, etc., vedasi Appendice) risulta ovviamente fattore determinante per stimare la posizione delle curve CCT, le quali a loro volta si spostano tanto più a destra quanto il grano è gros-

solano. La Figura 4 mostra un esempio di schermata di output nella quale, per l'acciaio scelto (42CrMoAl4).

La schermata rappresentata in Figura 4 permette di valutare alcuni dei dati calcolati dal modello, scegliendo in particolare la proprietà di interesse riportata sul grafico della curva CCT (in questo dato la durezza Vickers). Una sintesi dei risultati della procedura di calcolo sono però forniti anche sotto forma di foglio di lavoro (Figura 5), che riporta anche, fra le altre informazioni, i dati di input relativi al ciclo di laminazione.

## LA VALIDAZIONE DEL MODELLO

Per la validazione sperimentale del software sono stati eseguiti da parte della Siemens-Vai diverse prove di laminazione su impianto per 6 acciai di diversa composizione chimica. Su campioni prelevati da barre laminate secondo questi schemi di processo, sono state condotte prove di trazione e prove di mi-

crodurezza lungo il profilo della sezione trasversale, oltre all'analisi metallografica mediante microscopia ottica.

Le Figure 6-11 mostrano il confronto fra i dati previsionali forniti dal modello e quelli sperimentali per tre degli acciai considerati; si tratta di due acciai a struttura sostanzialmente ferritico-perlitica (S6 e S9), e di un acciaio con microstruttura più complessa, contenente considerevoli quantitativi di bainite e martensite (S8). In generale le capacità previsionali del modello risultano essere più che adeguate, come chiaramente mostrato dalle Figure 12-13. Per almeno 4 dei 6 acciai i risultati della previsione fornita dal modello sono compresi nella banda del  $\pm 10\%$  del valore sperimentale. Tenendo conto della complessità del ciclo produttivo e dei micromeccanismi coinvolti si conclude che il software è in grado di fornire una previsione attendibile delle proprietà che il materiale possiederà alla fine del processo di laminazione.

FIG. 6

**Dati di previsione relativi ad uno degli acciai (indicato in questa sede con la sigla S9) utilizzati per la validazione.**

*Predicted data related to one of the steels (herein indicated by the abbreviation S9) used for the validation.*

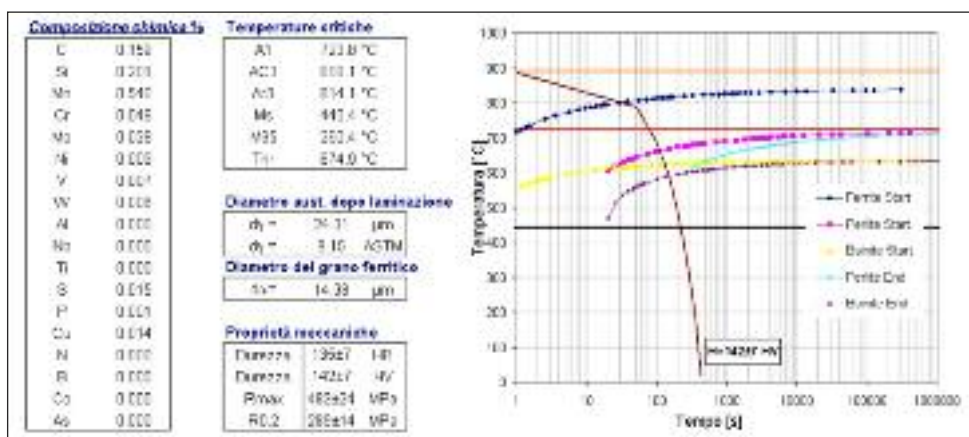


FIG. 7

**Risultati della prova di trazione ed analisi microstrutturale dell'acciaio S9. La durezza era pari a 129 HV.**

*Results of the tensile test and microstructural analysis of S9 steel. The hardness was equal to 129 HV.*

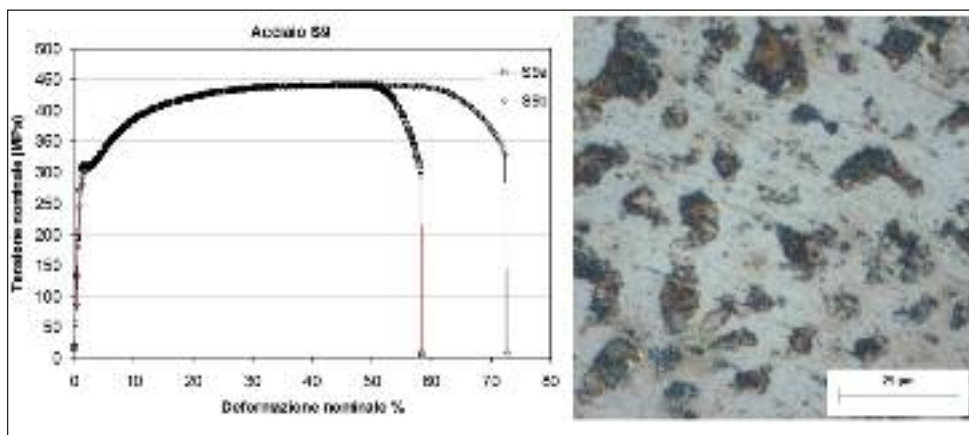


FIG. 8

**Dati di previsione relativi ad uno degli acciai (indicato in questa sede con la sigla S6) utilizzati per la validazione.**

*Predicted data related to one of the steels (indicated by the abbreviation S6) used for the validation.*



FIG. 9

**Risultati della prova di trazione ed analisi microstrutturale dell'acciaio S6. La durezza era pari a 192 HV.**

Results of the tensile test and microstructural analysis of S6 steel. The hardness was equal to 192 HV.

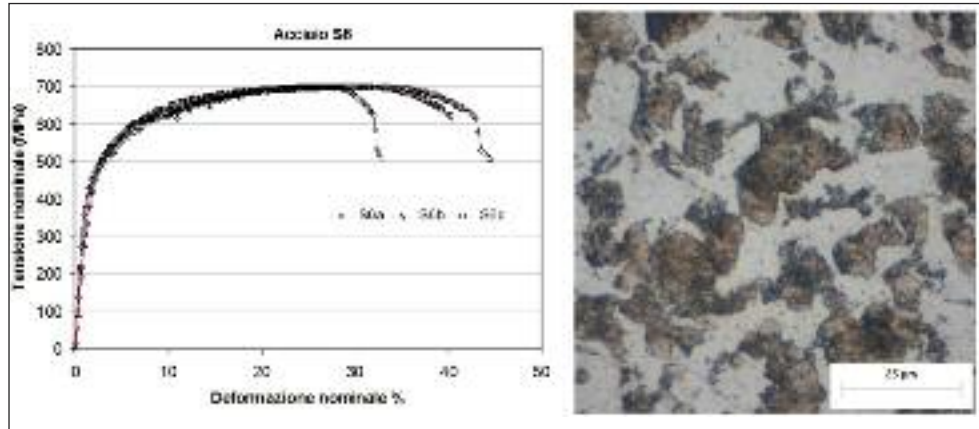


FIG. 10

**Dati di previsione relativi ad uno degli acciai (indicato in questa sede con la sigla S8) utilizzati per la validazione.**

Predicted data related to one of the steels (indicated by the abbreviation S8) used for the validation.

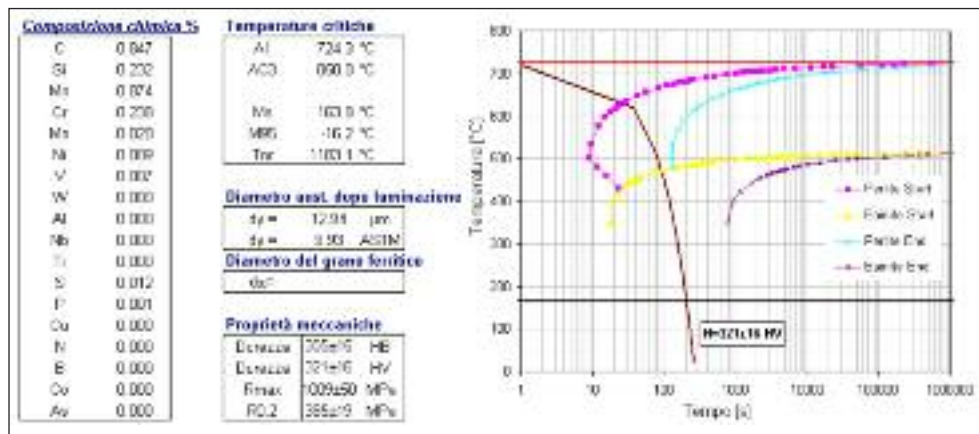
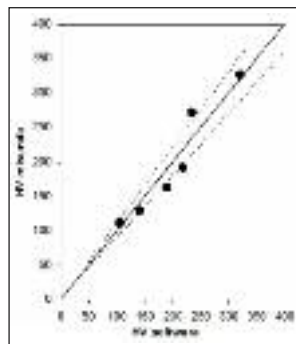
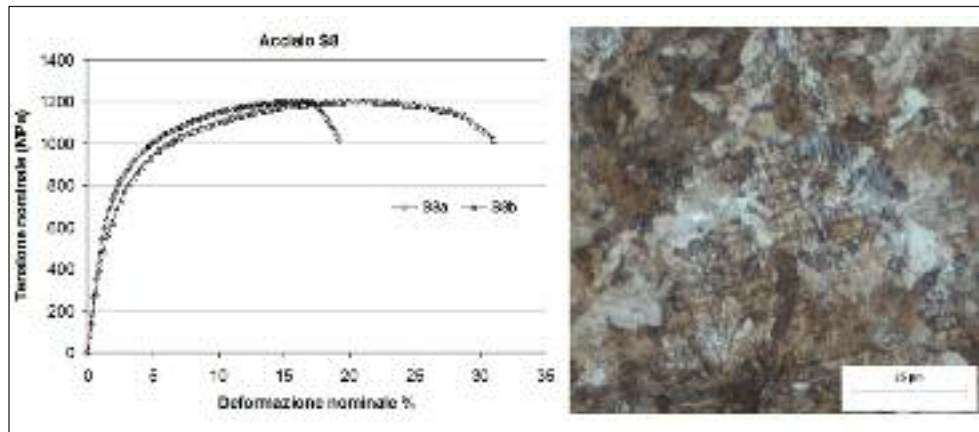


FIG. 11

**Risultati della prova di trazione ed analisi microstrutturale dell'acciaio S8. La durezza era pari a 315 HV.**

Results of the tensile test and microstructural analysis of S8 steel. The hardness was equal to 315 HV.



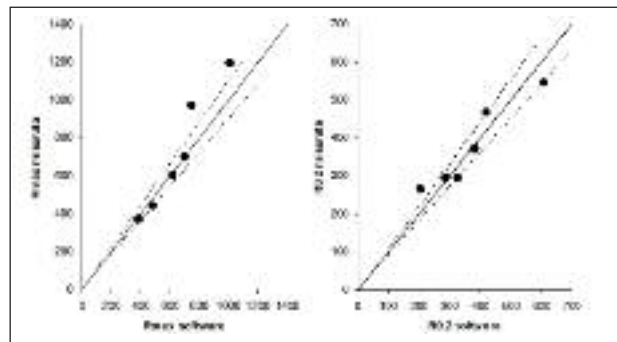
Comparison between the calculated hardness and the experimental one of the 6 steels used for the validation; the dotted lines represent a deviation of  $\pm 10\%$ .

FIG. 12 Confronto fra la durezza calcolata e quella sperimentale dei 6 acciai utilizzati per la validazione; le linee tratteggiate rappresentano una deviazione del  $\pm 10\%$ .

FIG. 13

**Confronto fra la resistenza a trazione ( $R_{max}$ ) e la resistenza allo snervamento ( $R_{0.2}$ ) calcolate e quelle sperimentali per i 6 acciai utilizzati per la validazione; le linee tratteggiate rappresentano una deviazione del  $\pm 10\%$ .**

Comparison between the calculated tensile strength ( $R_{max}$ ) and the yield strength ( $R_{0.2}$ ) and the experimental ones for the 6 steels used for the validation; the dotted lines represent a deviation of  $\pm 10\%$ .



## CONCLUSIONI

Lo strumento messo a punto nel corso della ricerca, il software di previsione PROMET 4.0, si è rivelato particolarmente efficace nello stimare l'effetto dei parametri di laminazione sulle proprietà dei prodotti laminati. Il modello tiene conto delle complesse cinetiche di evoluzione microstrutturale che hanno luogo nelle varie fasi della laminazione, al fine di fornire una stima della dimensione del grano austenitico all'uscita del treno di finitura. Se la composizione chimica gioca un ruolo fondamentale nel determinare la forma delle curve di raffreddamento CCT, la dimensione del grano austenitico causa uno spostamento di tali curve che può avere sostanziali effetti sulla microstruttura finale. Tenendo opportunamente in considerazione tutti questi fattori, e dei parametri di raffreddamento imposti al laminato, si arriva ad ottenere stime delle proprietà meccaniche che nella maggior parte differiscono di meno del 10% dai valori sperimentali. Su queste basi è possibile concludere che il modello è sufficientemente affidabile da poter essere utilizzato con successo nella progettazione di cicli di laminazione.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'ing. Ezio Colombo e l'ing. Marco Roveda della Siemens-Vai, l'ing. Samer El Mohtadi (UNIVPM) per il loro supporto tecnico nelle fasi di realizzazione e validazione sperimentale del software ProMet 4.0.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] T.M. Maccagno, J.J. Jonas et. Al., ISIJ Int. 36 (1996), p.720-728.
- [2] I.P. Kemp, J. Iron Making Steel Making 17 (1990), p.139-143.
- [3] W. Lehnert, N.D. Cuong, ISIJ Int. 32 (1995), p. 1100-1108.
- [4] Y. Lee et.al. Mat. Sci. Eng A336 (2002), p. 177-189.
- [5] Y. Lee et al., J. Mater. Proc. Tech. 81 (2000), p.87-96.
- [6] Z. Wusatowski, Fundamentals of Rolling, Pergamon Press, London, (1969), p.107-109.
- [7] P.D. Hodgson, R.K. Gibbs: ISIJ Int. 32 (1992), p.1329.
- [8] C.M. Sellars, Mater. Sci. Technol. 6 (1990), p.1072.
- [9] F. Boratto, et. Al., Proc. Int. Conf. Physical Metallurgy of TMP of steels (THERMEC'08) (1998) Tokyo, p.519.

## APPENDICE:

### EQUAZIONI COSTITUTIVE UTILIZZATE PER LA PREVISIONE DELLA DIMENSIONE DEL GRANO AUSTENITICO IN USCITA DAL TRENO DI LAMINAZIONE

Una volta calcolati i parametri termo-meccanici operanti durante la laminazione, il problema principale è quello di calcolare la dimensione media del grano austenitico e la sua evoluzione durante tutto il processo.

La ricristallizzazione metadinamica (MRX) è il processo microstrutturale dominante in molte fasi del processo. Durante le prime fasi della laminazione le deformazioni per passata sono di solito molto elevate, ed è facile far avvenire la ricristallizzazione dinamica. In coda alle passate che impongono deformazioni tali da far avvenire una completa ricristallizzazione dinamica, la ricristallizzazione non è più dinamica ma metadinamica, cioè inizia mentre viene imposta la deformazione e si completa nella fase di trasferimento alla gabbia successiva (interpass). Nel caso delle passate di finitura, le deformazioni nominali sono al di sotto del valore critico per avviare la DRX, mentre i tempi sono troppo brevi per avviare la SRX. Come risultato le deformazioni si accumulano passata dopo passata, fino a raggiungere un valore critico ad avviare la ricristallizzazione dinamica.

Nel corso degli anni diversi gruppi di ricerca hanno sviluppato equazioni relative all'evoluzione della granulometria austenitica ai parametri di laminazione a caldo. Una panoramica recente è fornita da Hodgson e Gibbs [7]. Nel seguito vengono fornite le equazioni utilizzate dal software oggetto del presente studio.

### Equazioni utilizzate per la descrizione dei fenomeni di ricristallizzazione

Il valore della deformazione che porta all'innescarsi della ricristallizzazione dinamica è un fattore critico, in quanto il meccanismo di addolcimento del materiale dopo ogni passaggio, cioè la ricristallizzazione statica convenzionale o quella metadinamica (nella quale si ha una frazione ricristallizzata dinamicamente, mentre il resto della struttura ricristallizza fra le passate), dipende dal fatto che la deformazione di passata sia maggiore o minore di questa soglia. La deformazione critica viene calcolata dalla dimensione del grano iniziale, dalla velocità di deformazione e da T temperatura assoluta, nella forma

$$\epsilon_c = 5.6 \cdot 10^{-4} d_0^{0.3} \dot{\epsilon}^{0.17} \quad (1)$$

in cui il parametro di Zener-Hollomon (Z) è espresso come:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q_{HW} / RT) \quad (2)$$

dove  $Q_{HW}$  è l'energia di attivazione per la deformazione a caldo, R è la costante dei gas, e T la temperatura assoluta.

La demarcazione netta tra ricristallizzazione statica e metadinamica in base al valore di (deformazione imposta nella passata i) è probabilmente una semplificazione eccessiva, in quanto implica che una piccola frazione ricristallizzata dinamicamente durante la deformazione sia sufficiente per far ricristallizzare l'intera struttura in modo metadinamico. Tuttavia questo sembra essere supportato da diversi studi mostrando che la cinetica di ricristallizzazione è praticamente indipendente una volta superata la  $\epsilon_c$  [7-9].

La frazione ricristallizzata dopo una passata ( $X_R$ ) può essere calcolata attraverso l'equazione di Avrami:

$$X_R = 1 - \exp \left[ -0.693 \left( \frac{t}{t_{0.5}} \right)^q \right] \quad (3)$$

dove l'esponente q e il tempo  $t_{0.5}$  (tempo per avere metà della struttura ricristallizzata) dipendono dal tipo di meccanismo operante. Se  $\epsilon < \epsilon_c$  (condizioni di SRX):

$$t_{0.5} = 2.3 \cdot 10^{-15} \varepsilon^{2.5} d_0^2 \exp\left(\frac{Q^I}{RT}\right) \quad (4)$$

in cui  $Q^I$  è un'energia di attivazione relativa ai fenomeni di ricristallizzazione, e  $q = 1$ .

Se  $\varepsilon > \varepsilon_c$  (cioè quando si verifica la MRX):

$$t_{0.5} = 1.1Z^{0.8} \exp\left(\frac{Q^I}{RT}\right) \quad (5)$$

e  $q = 1.5$ .

Se l'addolcimento è dato dalla sola SRX e vi è tempo sufficiente per la completa ricristallizzazione, la dimensione del grano è data da

$$d_{SRX} = 343 \varepsilon^{-0.5} d_0^{0.4} \exp\left(\frac{-Q^{II}}{RT}\right) \quad (6)$$

in cui  $Q^{II}$  è ancora un'energia di attivazione per il processo di riferimento. La dimensione del grano dopo la completa ricristallizzazione metadinamica è invece data da:

$$d_{MRX} = 2.6 \cdot 10^{-4} \varepsilon^{-0.23} \quad (7)$$

Vale la pena notare che le equazioni per  $t_{0.5}$  e  $d$  sono state sviluppate per descrivere, originariamente, il comportamento in condizioni isoterme, mentre la temperatura durante la laminazione a caldo è in continuo cambiamento. Tuttavia nella presente trattazione i tempi di interpass si possono giudicare sufficientemente brevi in modo che i valori di  $t_{0.5}$  e  $d$  possano essere calcolati ad un'unica temperatura, quella corrispondente alla semplice media delle passata precedente e di quella successiva.

### Equazioni utilizzate per stimare la crescita del grano austenitico

Per la laminazione delle barre e dei tondini in acciaio, il tempo di interpass è di solito molto più elevato di quello necessario alla completa ricristallizzazione metadinamica e perciò l'ingrossamento del grano segue la ricristallizzazione. L'ingrossamento del grano si verifica anche quando vi è completa ricristallizzazione statica. Fondamentalmente si distingue l'ingrossamento del grano a seconda che il tempo interpass ( $t_{ip}$ ) sia maggiore o minore di 1 s. Per tempi superiori a 1 s, si avrà:

per SRX:

$$d^7 = d_{SRX}^7 + 1.5 \cdot 10^{27} (t_{ip} - 4.32 t_{0.5}) \exp\left(-\frac{Q^{III}}{RT}\right) \quad (8a)$$

per MRX

$$d^7 = d_{MRX}^7 + 8.2 \cdot 10^{25} (t_{ip} - 2.65 t_{0.5}) \exp\left(-\frac{Q^{III}}{RT}\right) \quad (8b)$$

dove  $Q^{III}$  è l'energia di attivazione per la crescita.

Questa formulazione porta però ad un ingrossamento irrealisticamente rapido per tempi brevi. Per aggirare questo problema vengono utilizzate equazioni diverse per tempi minori di 1 s, cioè:

per SRX:

$$d^{1.2} = d_{SRX}^{1.2} + 4.0 \cdot 10^7 (t_{ip} - 4.32 t_{0.5}) \exp\left(-\frac{Q^{IV}}{RT}\right) \quad (9a)$$

per MRX:

$$d^{1.2} = d_{MRX}^{1.2} + 1.2 \cdot 10^7 (t_{ip} - 2.65 t_{0.5}) \exp\left(-\frac{Q^{IV}}{RT}\right) \quad (9b)$$

con  $Q^{IV}$  energia di attivazione per il fenomeno di crescita in queste condizioni. Le costanti hanno valori tali che le curve con esponente 2 e 7 si intersechino in corrispondenza del valore di 1s. La dimensione del grano dopo ricristallizzazione è quindi il valore  $d_0$  all'entrata della gabbia successiva.

Se si verifica solo parziale ricristallizzazione durante la passata  $i$ -esima di laminazione, la granulometria media all'ingresso della gabbia successiva ( $i+1$ ) può essere calcolata con una legge di proporzionalità che tenga conto della parte sia dei grani ricristallizzati ( $d_{RXi}$ , eqn. 6 o 7, con frazione  $X_{Ri}$ ) che di quelli deformati ( $d_{0i}$ ; il grano si deforma, ma il suo diametro equivalente viene considerato costante):

$$d_{0,i+1} = X_{Ri}^{1/2} d_{RXi} + (1 - X_{Ri})^{1/2} d_{0i} \quad (10)$$

Se il valore di  $X_{Ri}$  è piccolo, vi sono variazioni trascurabili nella dimensione media del grano prima della fase successiva. La parziale ricristallizzazione significa anche che parte della deformazione viene mantenuta alla fase successiva, allora si parla di deformazione accumulata  $\varepsilon_a$ , calcolata con la relazione:

$$\varepsilon_{a,i+1} = \varepsilon_{i+1} + (1 - X_{Ri}) \varepsilon_i \quad (11)$$

Questo è il valore della deformazione che viene confrontato con quello nell'equazione 1 per determinare se la ricristallizzazione dinamica (seguita da quella metadinamica) si è avviata durante tale passaggio.

## Abstract

### Prediction tool of the qualitative characteristics of rolled products by controlling the thermomechanical parameters: Promet 4.0

**Parole chiave:** steel, plastic deformation, rolling, heat treatment, thermomechanical processing

The objective of this research project was the setting up of a model able to predict the microstructure which, taking into account the rolling schedule and cooling, will be able to provide the mechanical and microstructural characteristics after rolling. The model was developed starting from the theoretical knowledge proposed by many researchers who have dealt with these issues, and the experience gained in the design of rolling systems. In order to allow the maximum working flexibility to the final user, the PROMET system requires to fill in the thermomechanical conditions for rod rolling (preheating temperature, pass reduction, temperature, interpass time, strain rate and cooling profile), and a database of more than 100 steel types was developed, containing CCT curves and the mechanical properties relative to the cooling rate. The tool provides the CCT curves, suitably modified to take into account the microstructure of the rolled, superimposed with the cooling trajectory set up by the operator, as well as mechanical and microstructural data of interest for that particular class of steels. The PROMET system was validated by direct comparison with the properties of rod rolled products under controlled conditions, obtaining an excellent prediction capability.