

Analisi del processo di deformazione a caldo e dell'evoluzione microstrutturale di un acciaio al 3% Cr mediante prove di torsione

S. Mengaroni, F. Cianetti, F. Curbis, A. Di Schino, A. Fabrizi, M. Calderini, E. Evangelista

Lo studio dell'evoluzione della microstruttura durante il processo di deformazione plastica di acciai riveste fondamentale importanza. In questo lavoro è stato analizzato il comportamento a deformazione a caldo di un acciaio 3% Cr tramite prove di torsione eseguite nell'intervallo di temperatura 1000–1200 °C e con $\dot{\epsilon}$ compresa tra 0.01 e 1.00s⁻¹. L'analisi condotta ha consentito di determinare le costanti della legge di potenza che regola il processo di deformazione a caldo (A_0 , Q ed n) tramite le quali è possibile ottimizzare i processi industriali. L'evoluzione microstrutturale durante la deformazione a caldo è stata valutata in termini di grado di percentuale di fase ricristallizzata ed è analizzata attraverso microscopia elettronica a trasmissione (TEM) e microscopia ad orientazione di immagine-diffrazione da retrodiffusione elettronica (OIM-EBSD). In particolare attraverso questa ultima tecnica viene stimata la frazione volumetrica di ricristallizzato in termini di parametro GOS (Grain Orientation Spread), che meglio sembra interpretare l'evoluzione microstrutturale dopo deformazione a caldo in microstrutture martensitiche.

Parole chiave: Acciaio - Forgiatura - Metallurgia fisica

INTRODUZIONE

I cilindri di appoggio (Figura 1) sono dei componenti utilizzati negli impianti di laminazione per la produzione di laminati metallici.

La principale applicazione è nelle gabbie dei laminatoi di tipo “a quarto”, sia nelle sezioni a caldo che in quelle a freddo. La loro funzione principale è quella di irrigidire la gabbia contrastando la spinta che il materiale metallico laminato esercita sul cilindro di lavoro evitando così l'inflessione di questi ultimi. I cilindri d'appoggio vengono prodotti mediante forgiatura di lingotti di acciaio seguita da un trattamento termico di bonifica. I valori di durezza



Fig. 1 - Esempio di cilindro di appoggio realizzato presso la Società delle Fucine

Fig. 1 - Back up Roll produced at Società delle Fucine

S. Mengaroni, F. Cianetti, F. Curbis

Facoltà di Ingegneria Università degli Studi, Via G. Duranti 63, 06125, Perugia, Italia

A. Di Schino

Centro Sviluppo Materiali, Via di Castel Romano 100, 00128, Roma, Italia

A. Fabrizi

Università degli Studi di Padova, Stradella S. Nicola 3, 36100, Vicenza, Italia

M. Calderini, E. Evangelista

Società delle Fucine, Viale Brin 218, 05100, Terni, Italia

sono solitamente compresi tra 450-540 HV sullo strato di lavoro (tavola). Tali valori sono mantenuti costanti per uno spessore che varia tra i 100 e i 150 mm di profondità (dipendentemente dalle dimensioni e dall'applicazione del cilindro di appoggio) che rappresenta lo spessore di “vita utile” del cilindro. La durezza sui colli è generalmente compresa tra 215-285 HV. Al fine di evitare rotture fragili e/o sfaldamenti in esercizio, il cilindro di appoggio deve soddisfare determinati requisiti di resistenza ad usura, fatica e sfaldamento; a tale scopo il cilindro deve possedere buona tenacità e la microstruttura finale deve essere costituita da martensite/bainite rinvenuta e carburi.

Lo studio della deformazione plastica a caldo dei metalli, effettuato mediante la prova di torsione, consente di determinare le equazioni costitutive e di valutare l'evoluzione della microstruttura durante il processo [1-6].

L'equazione che lega la velocità di deformazione ($\dot{\epsilon}$) al carico applicato (σ) nel caso di deformazione a caldo (per $T \geq 0.6 T_m$), è espressa dalla relazione [7-8]:

$$\dot{\epsilon} = A_0 e^{\frac{-Q}{RT}} \sigma^n \quad (1)$$

dove il termine $A_0 e^{\frac{-Q}{RT}}$ e l'esponente sono da considerarsi costanti.

Inserendo nella (1) il parametro di Zener-Hollomon definito come [3]:

$$Z = \dot{\epsilon} e^{\frac{Q}{RT}} \quad (2)$$

si ottiene [1]:

$$Z = A_0 \sigma^n \quad (3)$$

Il lavoro ha lo scopo di ricavare le costanti (A_0 , Q ed n) dell'equazione costitutiva per ottimizzare il processo di deformazione a caldo e studiare l'evoluzione microstrutturale in termini di frazione di ricristallizzato di un acciaio al 3% Cr impiegato per la produzione di grandi componenti forgiati.

MATERIALE E PROCEDURA SPERIMENTALE

La composizione chimica dell'acciaio studiato è indicata nella Tabella 1.

C	Mo	Cr	V	Altri elementi
0.40	0.65	3.30	0.12	Si, Mn, Ni

Tab. 1. Composizione chimica dell'acciaio (% di peso).

Tab. 1. Steel chemical composition (weight, %)

La microstruttura di partenza dell'acciaio è tipica di un acciaio bonificato.

Il ciclo termo-meccanico eseguito su ciascun provino prevede:

- il riscaldamento alla velocità di 1°C/sec fino alla temperatura di deformazione,
- il mantenimento in temperatura per 5 minuti in presenza di deformazione,
- al termine della deformazione, il provino viene raffreddato rapidamente con acqua fino a temperatura ambiente.

Nel corso del riscaldamento e durante la deformazione il provino è mantenuto in atmosfera di Ar. Il profilo termico è registrato da una termocoppia inserita all'interno del provino. Le prove sono state eseguite a 1000, 1100, 1200°C e a velocità di deformazione: 0.01, 0.10, 1.00 s⁻¹.

I dati registrati vengono convertiti in tensione (σ) e deformazione (ϵ) e consentono di ricavare per ogni velocità e temperatura di deformazione le curve tensione-deformazione. Le curve presentano tre andamenti:

- inizialmente (basse deformazioni) si assiste al proces-

so di incrudimento nel quale i grani si allungano nella direzione della tensione applicata, si generano dislocazioni fino al raggiungimento di un valore di tensione di picco,

- oltre il picco la tensione diminuisce per effetto della ricristallizzazione dinamica,
- si ha una stabilizzazione dei valori della tensione e della deformazione.

Tramite l'analisi delle prove di torsione è possibile determinare i coefficienti (A_0 , Q ed n) ed della legge di potenza (1).

La caratterizzazione microstrutturale dell'acciaio in esame è stata effettuata mediante TEM e con EBSD.

I campioni TEM sono stati prelevati dal tratto centrale dei provini di torsione ed assottigliati meccanicamente prima con le carte abrasive e successivamente mediante fresatura al Dimple Grinder (GATAN®), fino allo spessore di ~30 µm. L'assottigliamento fino alla trasparenza del fascio elettronico è stata eseguita mediante bombardamento ionico a basso angolo.

La tecnica EBSD consente di stimare alcune caratteristiche microstrutturali come l'angolo di misorientazione tra grani adiacenti, le tessiture cristallografiche e la dimensione del grano di strutture con bassa densità di dislocazioni. Questa tecnica consente anche di determinare la frazione volumetrica di materiale ricristallizzato mediante l'analisi del parametro GOS definito come la deviazione media tra l'orientazione di ciascun punto del grano e l'orientazione media del grano. La frazione volumetrica dell'acciaio ricristallizzato è identificata dal parametro GOS < 1 [9-11].

RISULTATI E DISCUSSIONE

Equazioni costitutive

L'equazione costitutiva (1), che pone in relazione la tensione del picco con la velocità di deformazione e la temperatura, fornisce le costanti mostrate nella Tabella 2.

Costante	Valore della costante
n	5.91
$Q(\text{kJ mol}^{-1})$	378
A_0	3946.60

Tab. 2 - Costanti dell'equazione (1).

Tab. 2 - constitutive coefficients (1).

I risultati elaborati in termini di tensione-deformazione mostrano che, a velocità di deformazione costante, la tensione aumenta con la deformazione fino ad un massimo oltre il quale si raggiunge lo stato stazionario. A deformazione costante, la tensione aumenta con la velocità e diminuisce con la temperatura. Le curve tensione deformazione relative all'acciaio studiato sono mostrate in Fig 2.

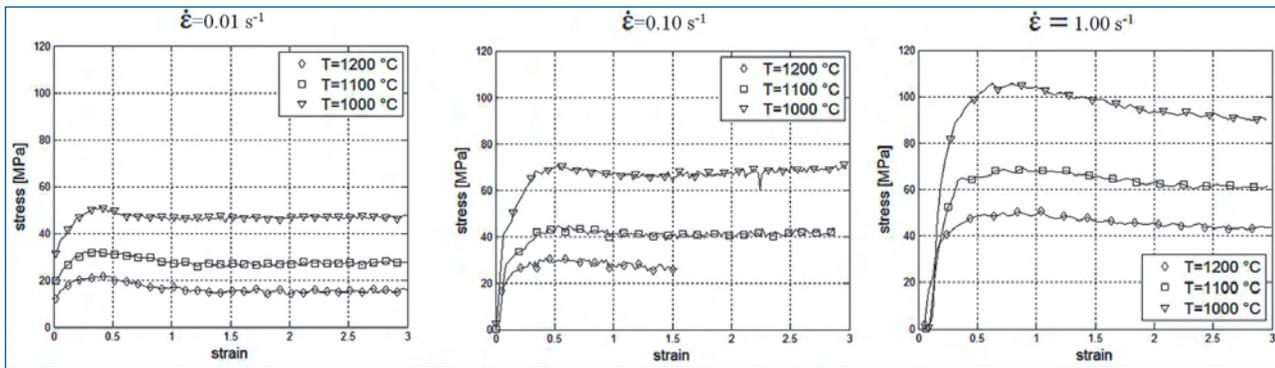


Fig. 2 - Dipendenza delle curve di torsione dai parametri di deformazione.

Fig. 2 - Flow stress-strain curves

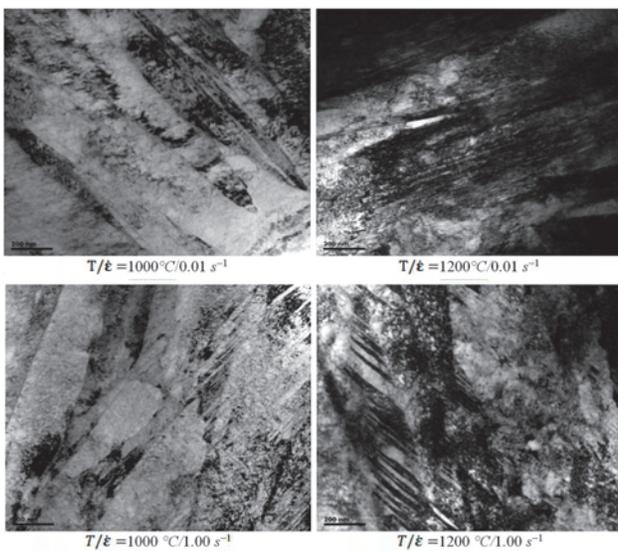


Fig. 3 - Esempi di microstruttura TEM in funzione dei parametri di deformazione analizzati.

Fig. 3 - Microstructure as analysed by TEM

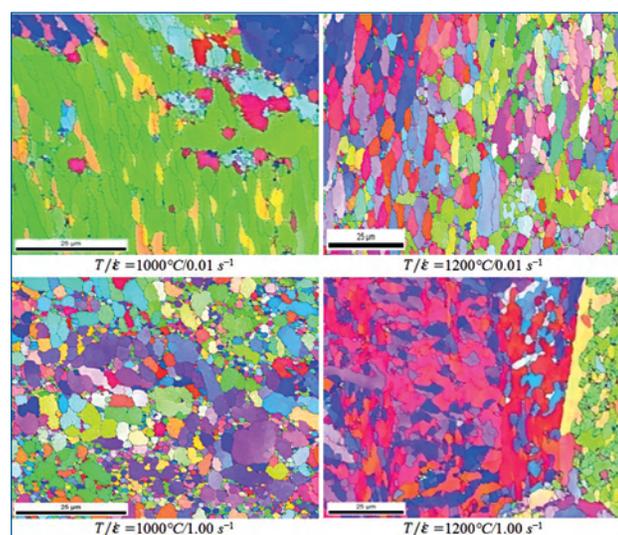


Fig. 4 - Esempi di microstruttura in funzione dei parametri di deformazione analizzati tramite EBSD.

Fig. 4. Inverse pole figures maps by EBSD technique

MICROSTRUTTURA

Le micrografie TEM evidenziano in tutti i campioni la microstruttura martensitica (Figura 3) a causa della elevata temprabilità che caratterizza gli acciai al 3% Cr [12].

La Figura 4 mette in evidenza l'analogia microstrutturale tra campioni torsionati. L'analisi EBSD, eseguita sugli stessi campioni, evidenzia una struttura martensitica, indipendentemente dalle dimensioni del grano austenitico e quindi delle temperatura di deformazione [9].

La Figura 5 mostra l'area ricristallizzata colorate di blu mentre quella non ricristallizzata è evidenziata in bianco.

La tecnica EBSD non consente di determinare la percentuale di ricristallizzazione del grano austenitico di partenza, ma è ragionevole supporre che la frazione volumetrica di ricristallizzazione del grano austenitico sia riconducibile ad un valore del parametro GOS < 1. Il parametro GOS [10] indica che la percentuale volumetrica di ricristallizzato aumenta se la temperatura e la velocità di deformazione aumentano.

Analizzando i valori percentuali di area ricristallizzata si

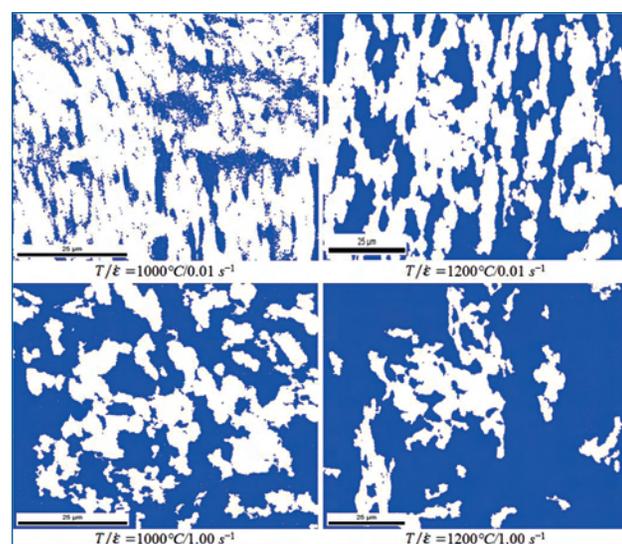


Fig. 5 - Immagine rappresentava dell'indice GOS (blu: GOS < 1, bianco: GOS > 1).

Fig. 5 - GOS maps (blue: GOS < 1, white: GOS > 1)

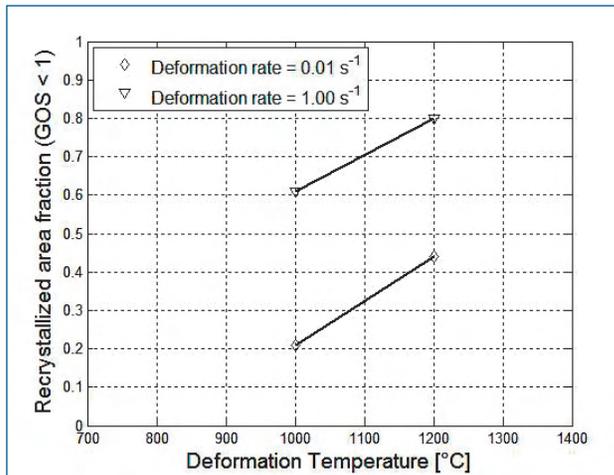


Fig. 6 - Frazione di ricristallizzato in funzione della temperatura di deformazione.

Fig. 6 - Recrystallized volume fraction as a function of test temperature

evidenzia che la velocità di deformazione ha maggiore influenza rispetto alla temperatura sull'aumento della percentuale volumetrica di ricristallizzato (Figura 6).

CONCLUSIONI

L'andamento delle curve tensione-deformazione indica la presenza della ricristallizzazione dinamica. L'analisi al TEM mostra che l'aspetto microstrutturale è martensitico, per

ogni temperatura e velocità di deformazione testate a causa della elevata temprabilità dell'acciaio oggetto di studio.

Il parametro GOS indica che la percentuale volumetrica di ricristallizzato aumenta con l'aumentare della temperatura e della velocità di deformazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H.J. MCQUEEN, E. EVANGELISTA, International Conference on SuperHigh Strength Steels Proceedings (2010), Peschiera del Garda (Verona), no. 10.
- [2] E. EVANGELISTA, M. MASINI, M. EL METHEDI, S. SPIGARELLI, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 378 (2004), n. (1-2), p.151.
- [3] H.J. MCQUEEN, J.J. JONAS, Metal Forming: interrelation between theory and Practice, Plenum Press, NewYork (1971).
- [4] T. SAKAI, A. BELYAKOV, R. KAIBYSHEV, H. MIURA, J.J. JONAS, Progress in Materials Science, Vol 60. (2014), p.130.
- [5] C. IMBERT, N.D. RYAN, H.J. MCQUEEN, Metallurgical and Material Transaction A, Vol. 15 (1984) n.10, p.1855.
- [6] C. IMBERT, H.J. MCQUEEN, Material Science and Technology, Vol.16 (2000), p.532.
- [7] H.J. MCQUEEN, E. EVANGELISTA, N. RYAN, International Conference on Thermomechanical Processing Proceedings: Mechanics, Microstructure & Control (2003), Sheffield, p. 359.
- [8] M.F. ABBOD, C.M. SELLARS, A. TANAKA, D.A. LINKENS, M. MAHFOUF, Materials Science and Engineering A, Vol. 491 (2008), p. 290.
- [9] A. DI SCHINO, L. ALLEVA, M. GUAGNELLI, Materials Science Forum, Vol.715-716 (2012), p.860.

Hot deformation and microstructure evolution analysis by hot torsion tests of a 3% Cr steel

Keywords: Steel - Forging - Physical metallurgy

The microstructure evolution during hot deformation of steels is very important. The hot working behavior of a steel based on 3% Cr has been studied by hot torsion tests in the range of temperatures 1000–1200 °C and strain rates 0.01,0.10,1.00s⁻¹. This work allows to define the coefficients of the constitutive equation (A_0 , Q e n) so to optimize the industrial process. The microstructure evolution has been studied by Transmission Electron Microscope (TEM) and Orientation Image Microscope- Electron backscatter Diffraction (OIM-EBSD). In particular the recrystallized volume fraction of steel has been estimated by the Grain Orientation Spread (GOS) as measured by EBSD technique, on the hot deformed and quenched materials.