

Rapporto del progetto STM 2014 del Dr Giuliano Angella
“Validazione di un modello teorico per curve di flusso plastico di rame
OFHC con ricristallizzazione dinamica”

realizzato presso il *Department of Materials Science and Engineering, The University of Sheffield (UK) - Prof. W.M. Rainforth*

La modellazione delle curve di flusso plastico (sforzi-deformazioni) ad elevate temperature dei materiali metallici è di notevole interesse per l'industria termo-meccanica al fine di valutare i parametri operativi di processo. Le curve di flusso plastico ad elevate temperature presentano una significativa riduzione degli sforzi ad alte deformazioni, riduzione dovuta al fenomeno della ricristallizzazione dinamica (DRX), cosicché la comprensione e la modellazione di tale fenomeno è fondamentale per predire le curve di flusso plastico ad elevate temperature.

Il materiale investigato è rame con basso tenore di ossigeno (OFHC Cu), una materiale d'interesse industriale. Una tipica curva di sforzi-deformazioni a 500°C e 10^{-1} s^{-1} del rame OFHC predetta dal modello teorico che è stato sviluppato dal Dr Angella dell'Istituto IENI del CNR è riportata in Fig. 1.

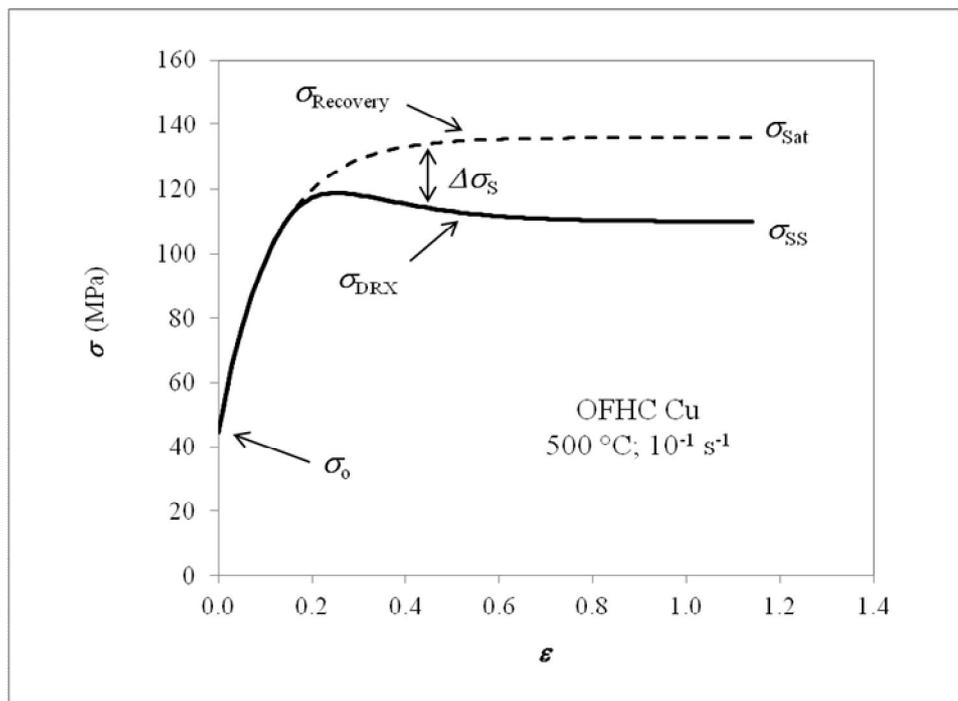


Fig. 1 – Curva di sforzi-deformazioni del rame OFHC a 500°C e 10^{-1} s^{-1} predetta dal modello teorico (linea piena).

Per poter quantificare la riduzione della resistenza alla deformazione dovuta alla DRX è necessario introdurre una ipotetica curva di sforzi-deformazioni in cui il fenomeno DRX non è avvenuto (vedi Fig. 1) e definire alcuni come segue:

σ_{DRX} = curva sforzi-deformazioni del materiale che ha subito DRX, obiettivo del modello teorico;

σ_{SS} = sforzo di saturazione dovuto a DRX;

$\sigma_{Recovery}$ = ipotetica curva sforzi-deformazioni del materiale che non ha subito DRX, bensì solo recupero dinamico (DR);

σ_{Sat} = sforzo di saturazione dovuto a DR;

$\Delta\sigma_s$ = riduzione degli sforzi dovuta al fenomeno DRX.

Si definisce frazione di addolcimento X dovuto a DRX (J.J. Jonas et al. / Acta Materialia 57 (2009) 2748–2756):

$$(Eq. 1) \quad X = \Delta\sigma_s / (\sigma_{Sat} - \sigma_{SS})$$

Il parametro X in funzione della deformazione ε è stato interpolato in numerose pubblicazioni (S.F. Medina, C.A. Hernández, Acta Metall. 44 (1996) 165; Fernandez AI, Uranga P, Lopez B, Rodriguez-Ibabe JM. Mater Sci Eng 2003;A361:367) con una equazione tipo-Avrani, in cui al tempo t è stato sostituito alla deformazione ε , come segue:

$$(Eq. 2) \quad X = 1 - \exp(-\beta \cdot (\varepsilon - \varepsilon_c)^{n_0})$$

dove β è una costante che dipende dalle condizioni di deformazione e ε_c è la deformazione critica alla quale parte la DRX. ε è la deformazione imposta dopo ε_c . In acciai microlegati è stato trovato $1 < n_0 < 2$.

Più recentemente in (J.J. Jonas et al. / Acta Materialia 57 (2009) 2748–2756) il parametro X è stato interpolato con la legge convenzionale all'Avrami:

$$(Eq. 3) \quad X = 1 - \exp(-k t^{n_1})$$

dove t è il tempo dall'inizio della deformazione. Si è trovato per acciai microlegati $2.6 < n_1 < 3.4$.

Modello per curve di flusso con DRX a picco singolo

Curva sforzi-deformazioni senza DRX: $\sigma_{Recovery}$

La curva è descritta dall'equazione di Voce i cui parametri sono stati trovati analizzando le curve di trazione sul rame OFHC realizzate allo IENI di Milano secondo il metodo riportato in (Angella Material Science Forum 706-709 (2012) 1361-1366; Angella et al. Materials Science & Engineering A 594 (2014) 381–388)

$$(Eq. 4) \quad \sigma_{Recovery} = \sigma_v + (\sigma_o - \sigma_v) \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_C}\right)$$

Differenziando la curva si ottiene la forma differenziale

$$(Eq. 3) \quad \frac{d\sigma_{Recovery}}{d\varepsilon} = \varepsilon_C^{-1} \cdot \sigma_V - \varepsilon_C^{-1} \cdot \sigma_{Recovery}$$

oppure

$$(Eq. 4) \quad \frac{d\sigma_{Recovery}}{d\varepsilon} = s'(\dot{\varepsilon}; T) \cdot \frac{M^2 \mu}{(2\beta_{Recovery}/\alpha_0)} - \varepsilon_C^{-1} \cdot \sigma_{Recovery}$$

con $\alpha_0 = 0.5$, M il fattore di Taylor, μ il modulo di taglio del rame, $\beta_{Recovery}$ costante ottenuta sperimentalmente e ε_C^{-1} è il parametro che quantifica il recupero dinamico (Angella Material Science Forum 706-709 (2012) 1361-1366; Angella et al. Materials Science & Engineering A 594 (2014) 381-388).

Curva sforzi-deformazioni con DRX: σ_{DRX}

Partendo da un modello applicato all'acciaio AISI 316L ad elevate temperature in (Angella et al. Materials Science & Engineering A 594 (2014) 381-388), è stato sviluppato un approccio basato sulla combinazione del formalismo di Voce ed un modello modificato di Kocks-Mecking dell'incrudimento, e fondato sulle seguenti ipotesi:

1. $\beta_{Recovery}$ in Eq. 4 è costante prima che operi DRX (ossia prima di ε_C);
2. dopo aver raggiunto il valore critico di deformazione (ε_C) DRX si manifesta e β non è più costante;
3. **β evolve** con la deformazione, partendo dal valore $\beta_{Recovery}$ fino a raggiungere il valore β_{SS} di equilibrio nella regione di saturazione (σ_{SS}).

Dopo ε_C , dunque, il modello si riassume nel seguente sistema di equazioni differenziali accoppiate:

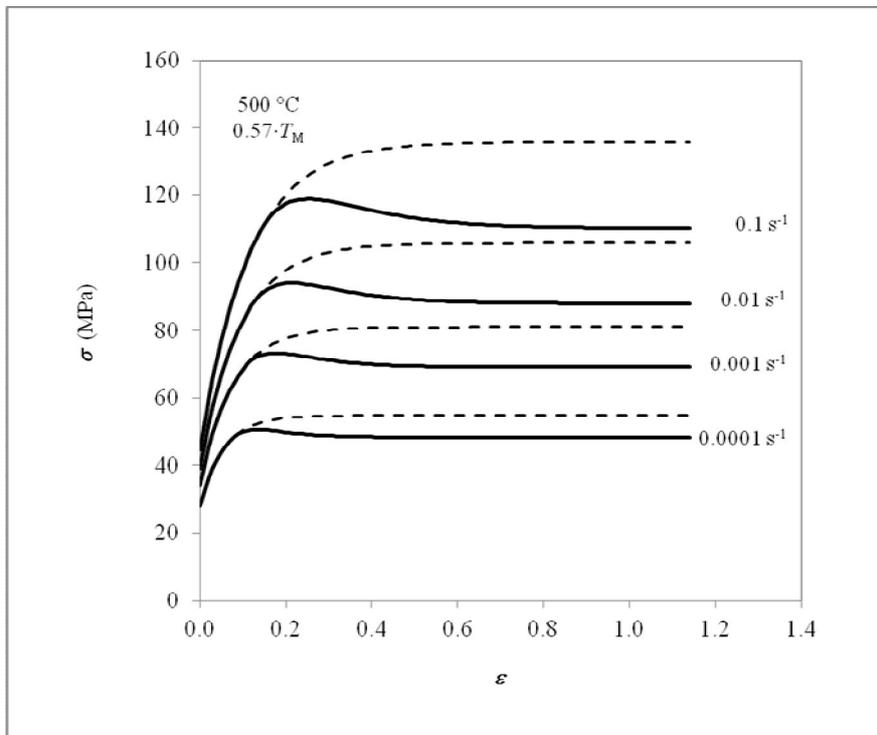
$$(Eq. 5) \quad \begin{cases} \frac{d\sigma_{DRX}}{d\varepsilon} = s'(\dot{\varepsilon}; T) \cdot \frac{M^2 \mu}{(2\beta/\alpha_0)} - \varepsilon_C^{-1} \cdot \sigma_{DRX} \\ \frac{d\beta}{d\varepsilon} = A\varepsilon_C^{-1} \cdot (\beta_{SS} - \beta) \end{cases}$$

A è un parametro che tiene in considerazione l'effetto della dimensione del grano di partenza del materiale sulla cinetica della DRX.

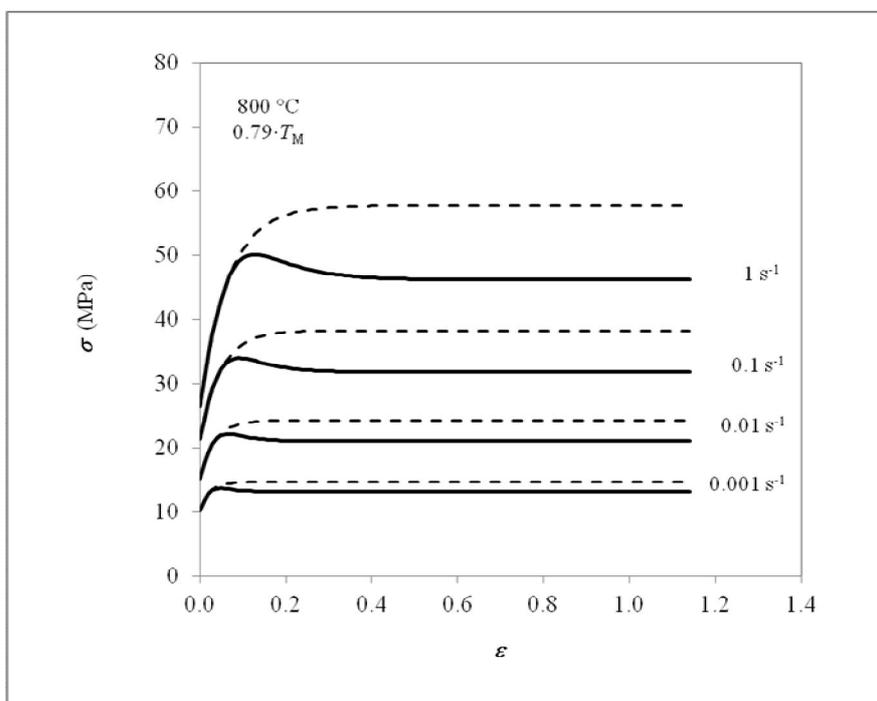
Risultati: curve sforzi-deformazioni con DRX predette dal modello teorico

Il modello predittivo delle curve sforzi-deformazioni è stato utilizzato per produrre curve con temperature comprese fra 500 e 800°C e velocità di deformazioni comprese fra 10^{-4} e 1 s^{-1} . In figura 2 sono riportate alcune curve DRX su rame OFHC a titolo di esempio, alle temperature di 500 e 800°C con diverse velocità di deformazione. Le curve sforzi-deformazioni con DRX (linee piene) manifestano il

tipico andamento quando si manifesta la DRX, con significativa riduzione degli sforzi di flusso all'aumentare della deformazione. Le curve senza DRX sono riportate tratteggiate.



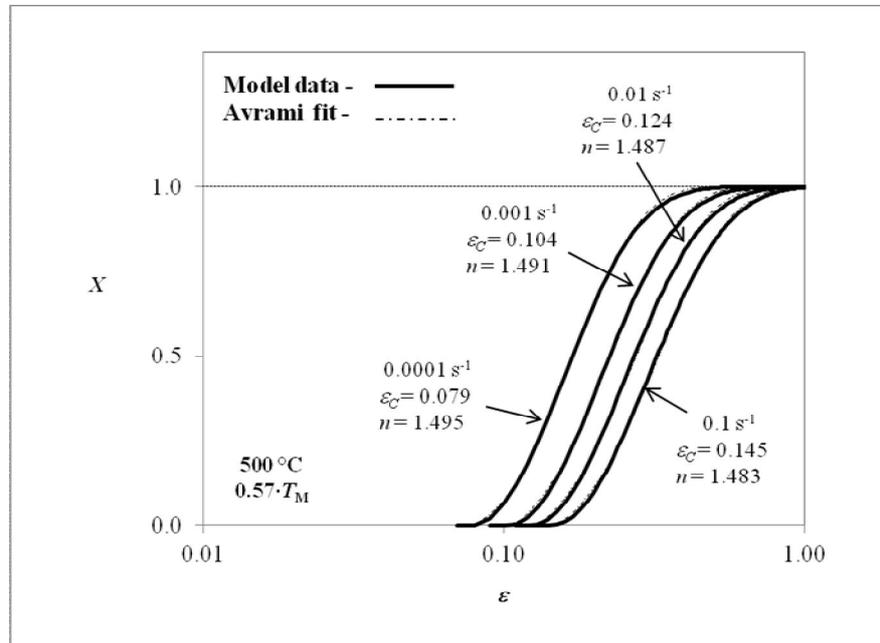
(a)



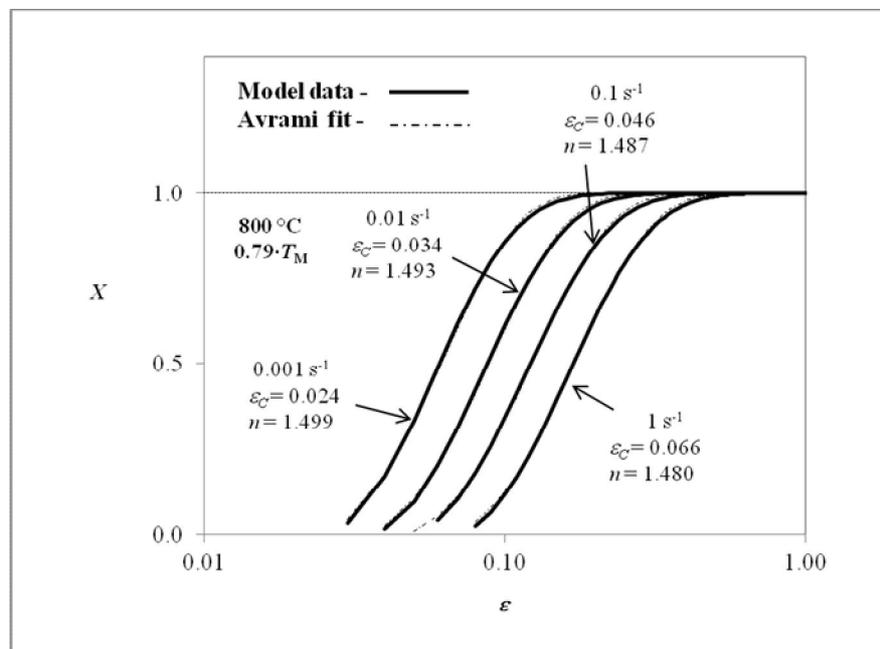
(b)

Fig. 2 – Curve sforzi-deformazioni con DRX su rame OFHC prodotte dal modello teorico.

Le curve sforzi-deformazioni sono state analizzate secondo i formalismi all'Avrami riportati sopra. Esempi di curve alle stesse condizioni di deformazioni utilizzate in figura 1 sono riportati in figura 3, dove l'analisi è stata effettuata analizzando X in funzione della deformazione ε secondo l'Eq. 2, ed in Fig. 4, dove l'analisi è stata realizzata su X in funzione del tempo t secondo l'Eq. 3.

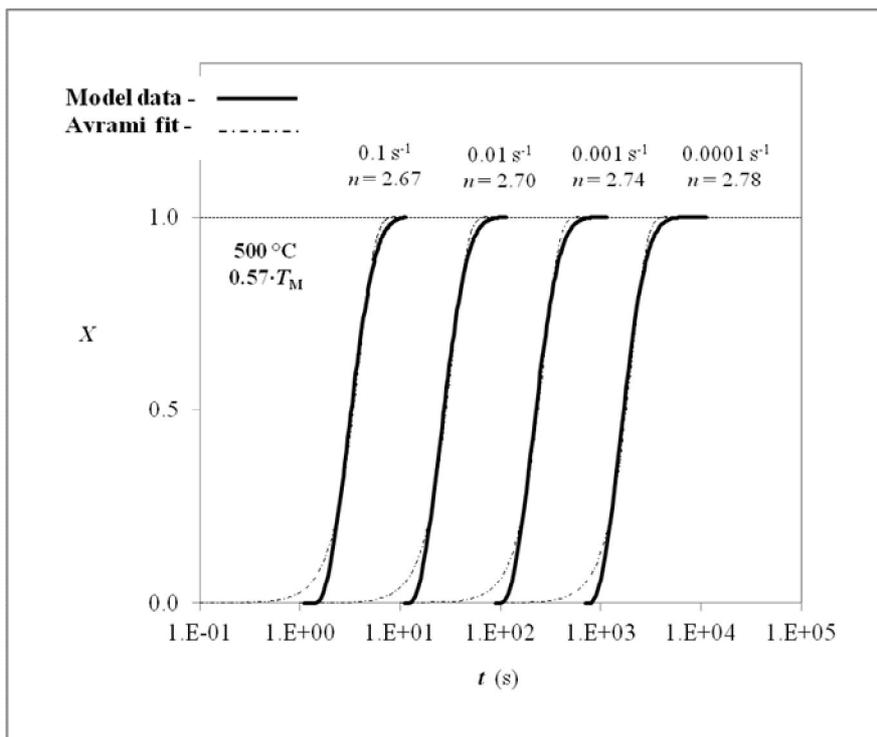


(a)

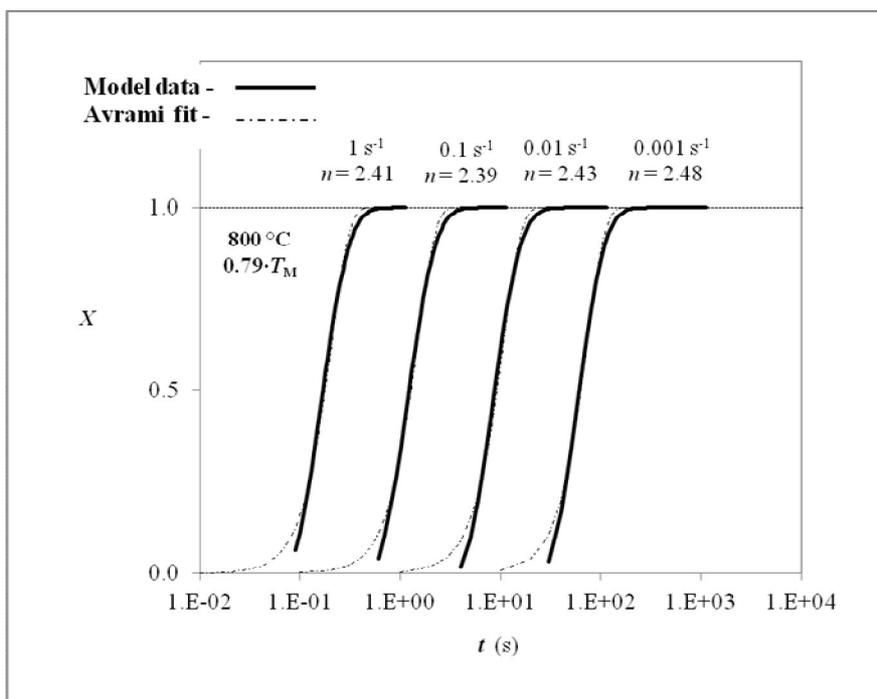


(b)

Fig. 3 – Andamento del parametro X in funzione della deformazione ε (linea piena) ed interpolazione con tipo-Avrami (linea tratteggiata) secondo l'Eq. 2.



(a)



(b)

Fig. 4 – Andamento del parametro X in funzione del tempo t (linea piena) ed interpolazione con Avrami (linea tratteggiata) secondo l'Eq. 3.

In figura 3 le interpolazioni degli andamenti sperimentali (linee piene) con l'equazione tipo-Avrami sono ottime, il che si è verificato per tutte le curve sforzi-

deformazioni con DRX prodotte dal modello teorico (500-800°C e 10^{-4} - 1 s^{-1})
Inoltre, si sono ottenuti dalle interpolazioni valori:

$$n_0 \approx 1.5$$

In letteratura (S.F. Medina, C.A. Hernández, *Acta Metall.* 44 (1996) 165) i valori ottenuti dall'analisi di curve sperimentali su acciai microlegati è di $1 < n_0 < 2$. $n_0 \approx 1.5$ è stato trovato in (Fernandez AI, Uranga P, Lopez B, Rodriguez-Ibabe JM. *Mater Sci Eng* 2003;A361:367). In figura 4 le interpolazioni degli andamenti sperimentali (linee piene) con l'equazione all'Avrami sono anch'esse ottime, analogamente a tutte le curve sforzi-deformazioni con DRX prodotte dal modello teorico (500-800°C e 10^{-4} - 1 s^{-1}) Sono stati ottenuti dalle interpolazioni valori:

$$2.4 < n_1 < 2.8$$

I valori ottenuti dall'analisi di curve sperimentali su acciai microlegati è di $2.6 < n_1 < 3.4$ in (J.J. Jonas et al. / *Acta Materialia* 57 (2009) 2748-2756). Le ottime interpolazioni dei parametri X con le curve all'Avrami ed i valori dei parametri caratteristici n_0 e n_1 , in accordo con i valori riportati in letteratura, suggeriscono che il modello teorico è promettente. Il confronto delle curve sforzi-deformazioni teoriche con le curve sperimentali ottenute in torsione sul rame OFHC sono fondamentali per validare definitivamente il modello. Il torsionometro messo a disposizione dal Prof. W.M. Rainforth del *Department of Materials Science and Engineering* della *University of Sheffield* per la realizzazione delle prove ad alta temperatura ha presentato dei problemi nell'elettronica di controllo, che hanno impedito l'applicazione di una velocità di deformazione controllata e costante durante le prove. Nel corso del soggiorno a Sheffield gli interventi tecnici realizzati per superare tali problemi non hanno ottenuto un esito positivo, cosicché i campioni di torsione in rame OFHC realizzati a Milano e portati alla *University of Sheffield* per le prove, sono rimasti nel laboratorio del Prof. Rainforth in attesa che il torsionometro sia messo a punto. Le prove saranno realizzate non appena il torsionometro sarà operativo.

Milano, 29 agosto 2014

Firma

