

Deformazione plastica a caldo e mappe di processo

S. Spigarelli

L'introduzione di materiali ad elevate prestazioni, sia ferrosi che non ferrosi, pone spesso problemi rilevanti quando si tratti di identificare le condizioni ottimali di lavorazione a caldo. Prove su impianto sono ovviamente molto complesse e costose, e vengono sempre più spesso sostituite da prove simulate in laboratorio. I dati ottenuti da queste prove (usualmente di compressione o torsione) vengono utilizzati per ricavare le equazioni costitutive, che a loro volta permettono di stimare i carichi di lavorazione o di effettuare simulazioni FEM. A fianco di questa che è la procedura classica per determinare la risposta alla lavorazione a caldo di un materiale, recentemente è stato messo a punto un metodo complementare che si basa sull'ottenimento delle mappe di efficienza e di stabilità. Su tali mappe vengono riportati i valori di un indice di efficienza che rappresenta l'abilità del materiale nell'assorbire energia, convertendola in fenomeni microstrutturali. A queste mappe ne vengono sovrapposte altre in cui, attraverso opportuni parametri di stabilità, si possono identificare quelle zone in cui l'assorbimento di energia avviene per fenomeni "positivi" (che innalzano quindi la lavorabilità, come la ricristallizzazione), da quelle in cui l'energia viene assorbita per il danneggiamento. In questo modo risulta possibile, almeno in teoria, identificare la finestra di lavorabilità ottimale. Questo lavoro ha lo scopo di illustrare sinteticamente questa procedura, descrivendone sia i vantaggi che i potenziali svantaggi.

Parole chiave: lavorazioni plastiche a caldo, prove meccaniche, acciaio, alluminio e leghe

INTRODUZIONE

L'ottimizzazione dei processi di deformazione a caldo dei metalli (estrazione, forgiatura, laminazione etc.) richiede una approfondita conoscenza dei fenomeni metallurgici che avvengono quando un materiale viene lavorato alle alte temperature. In particolare quei meccanismi, quali il ripristino e la ricristallizzazione dinamici (con dinamici si identificano quei processi che avvengono mentre il materiale viene deformato, in modo da distinguerli da quelli statici, che hanno luogo in assenza di deformazione) che innalzano la lavorabilità sono stati approfonditamente studiati fin dagli anni '70 [1] e sono quindi, a meno di alcuni aspetti prettamente fisici relativamente meno interessanti per gli ingegneri e i tecnologi, ben conosciuti. D'altra parte anche i meccanismi di danneggiamento, nella maggior parte dei casi anch'essi correlati alla microstruttura ed alla sua evoluzione, sono relativamente ben conosciuti. Ne consegue che con un appropriato studio preliminare, svolto attraverso prove di deformazione a caldo in laboratorio, analisi microstrutturali del materiale deformato e magari effettuando anche una simulazione ad elementi finiti del processo (FEM), si è in grado di determinare con una certa accuratezza la finestra di lavorabilità di ogni singola lega.

Il presente lavoro ha lo scopo di illustrare sinteticamente come, semplicemente analizzando in maniera appropriata i risultati delle prove simulate in laboratorio, sia già possibile ottenere indicazioni preliminari molto utili al fine di identificare le zone di alta lavorabilità di un materiale. A fine puramente esemplificativo si farà principalmente (ma non esclusivamente) riferimento ad un determinato materia-

le decisamente difficile da lavorare, un composito a matrice metallica (6061+20%Al₂O₃) [2], precisando comunque che le considerazioni fatte valgono in generale per qualsiasi materiale metallico.

LE PROVE SIMULATIVE IN LABORATORIO

Il primo problema fondamentale che l'ingegnere dei materiali o del processo deve affrontare quando cerca di ottimizzare un processo di lavorazione a caldo, è quello di identificare le cosiddette "equazioni costitutive", cioè quelle relazioni che legano la velocità di deformazione ($\dot{\epsilon}$), la deformazione (ϵ), la temperatura (T) e la resistenza del materiale (σ). In generale tali equazioni assumono la forma:

$$\dot{\epsilon} = (\sigma, T) \Big|_{\epsilon} \quad 1)$$

Tali relazioni si ricavano analizzando le curve (σ - ϵ) che si ottengono deformando il materiale a diverse temperature e velocità di deformazione. Dal momento che quasi sempre tali curve presentano un massimo o uno stadio stazionario (Figura 1), per lo più la relazione 1) viene riscritta nelle forme

$$\dot{\epsilon} = (\sigma_p, T) \quad 2a)$$

$$\dot{\epsilon} = (\sigma_{ss}, T) \quad 2b)$$

in cui σ_p è il valore di massimo della curva (σ - ϵ), e σ_{ss} quello di stadio stazionario.

Le metodologie di prova attraverso le quali si possono ricavare le curve (σ - ϵ) sono essenzialmente tre:

1. la prova di trazione: relativamente semplice da effettuare, è però affetta dall'insorgere della strizione, che limita la deformazione massima raggiungibile; tale prova si rivela utile quando si voglia investigare la risposta del materiale a sollecitazioni di trazione, come nelle operazioni di formatura delle lamiere, ma è di scarsa utilità nel caso delle lavo-

Stefano Spigarelli

Dipartimento di Meccanica, Università Politecnica delle Marche, Ancona

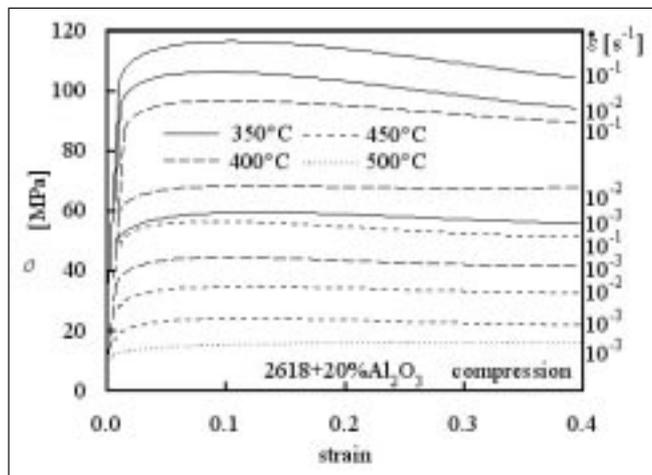


Fig. 1 - Esempio di curve tensione-deformazione equivalente.

Fig. 1 - Example of representative equivalent strain vs equivalent stress curves.

- razioni ad alta temperatura come la forgiatura, lo stampaggio di pezzi massivi, l'estrusione o la laminazione;
- la prova di compressione: pur essendo anch'essa affetta dall'insorgere di fenomeni di instabilità del flusso plastico (in particolare dalla barilottatura, legata all'attrito fra campione ed utensili), consente di raggiungere deformazioni molto più rilevanti, ed è quindi appropriata per lo studio della lavorabilità a caldo;
 - la prova di torsione: non è soggetta a fenomeni di instabilità, e consente di deformare il materiale fino a raggiungere valori di ϵ elevatissimi; peraltro tali valori della "duttilità" non sono riscontrabili nei casi pratici, essendo legati alla peculiare natura dello stato tensionale del campione sollecitato in torsione, ma possono essere in qualche modo considerati come una "duttilità intrinseca" (massima capacità di deformarsi). Il problema principale nel caso della prova di torsione è che la tensione di taglio e lo scorrimento aumentano linearmente dal centro alla superficie. E' comunque possibile, attraverso semplici relazioni, ricavare i valori della tensione e della deformazione equivalenti sulla superficie del campione [1]. Le curve (σ - ϵ) così ottenute sono in genere piuttosto simili a quelle ricavate dalla prova di compressione.

IL CALCOLO DELLE EQUAZIONI COSTITUTIVE

Una volta che siano state ricavate le curve (σ - ϵ), è relativamente semplice calcolare le equazioni costitutive per la deformazione a caldo del materiale studiato. Le formulazioni più utilizzate per tali equazioni (trascurando ora la natura della tensione di picco o di stato stazionario che compare in esse) sono:

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \exp(-Q_{HW} / RT) \tag{3}$$

$$\dot{\epsilon} = A' (\sinh \alpha \sigma)^n \exp(-Q_{HW} / RT) \tag{4}$$

in cui A, A' ed α sono parametri del materiale, n è l'esponente della sollecitazione, Q_{HW} è l'energia di attivazione per la deformazione a caldo, R è la costante dei gas. L'equazione 4) rappresenta una forma più generale, che per bassi valori della tensione si riduce alla 3), che non è altro che la legge di potenza comunemente utilizzata nel creep. Dal punto di vista strettamente fisico, al di sopra di determinati valori della velocità di deformazione, la 3) cessa di essere applicabile (power-law breakdown), ma essendo più semplice da maneggiare nei programmi FEM, viene comunemente utilizzata anche per descrivere il regime delle alte velocità di deformazione tipico dei processi di lavorazione.

La Figura 2 mostra due esempi, riferiti alla lega 2024 [3] ad al composito 6061+20%Al₂O₃ [2]; le rette (in realtà delle curve) in figura sono state calcolate tramite l'equazione 4), ma analizzando la Figura 2b) si osserva che, limitando il campo di analisi a un regime ristretto di velocità di deformazione, con una buona approssimazione può essere utilizzata anche la relazione 3), in questo caso particolare con un valore di n prossimo a 6. Una volta calcolati i parametri che compaiono nelle equazioni costitutive, in particolare A, n e Q_{HW} , è possibile ricavare dati molto importanti sui carichi di lavorazione, e si è generalmente in grado di simulare il processo tramite FEM.

LE MAPPE DI PROCESSO

Mappe di efficienza

I primi a rappresentare le equazioni costitutive del materiale sotto forma di mappa sono stati Frost e Ashby [4]; tali map-

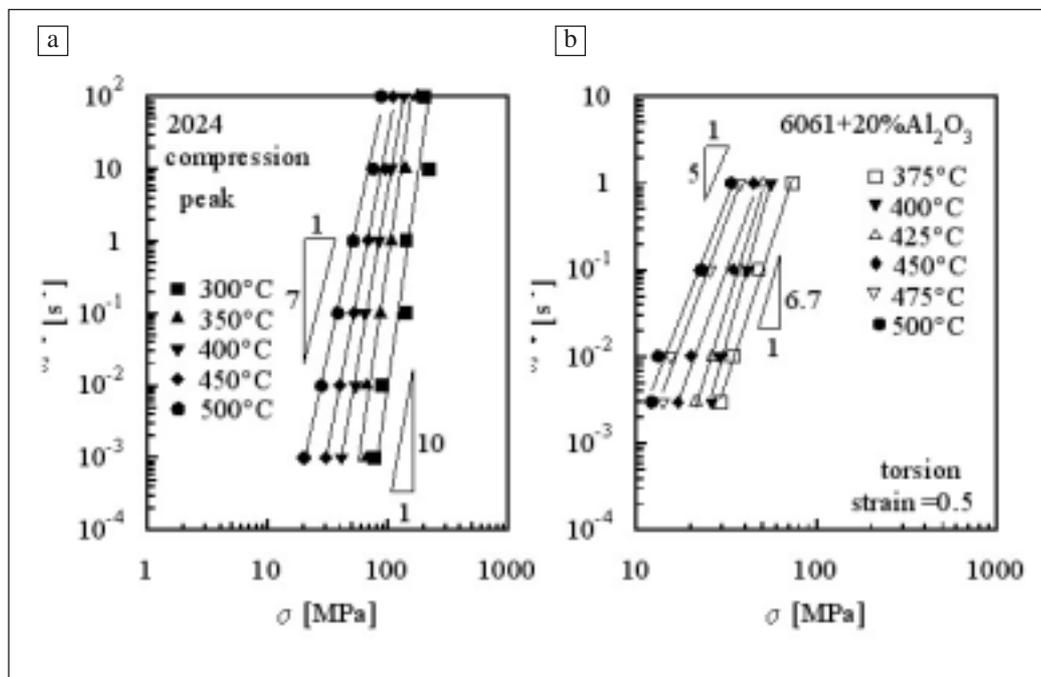


Fig. 2 - Relazioni fra tensioni di picco, velocità di deformazione e temperatura per una lega 2024 [3] e per un composito [2].

Fig. 2 - Strain rate vs peak flow stress at different temperatures for a 2024 alloy [3] and a metal matrix composite [2].

pe identificano i regimi di temperatura e tensione alla quale sono operativi i vari micromeccanismi, e portano sovrainpresse delle linee iso-velocità di deformazione. Un significativo passo avanti è stato successivamente compiuto da Raj [5], che ha sviluppato delle mappe temperatura-velocità di deformazione, sulle quali vengono riportati i regimi in cui si ha cavitazione dovuta allo slittamento dei confini di grano (basse velocità di deformazione) oppure rottura duttile (alte velocità di deformazione). Il regime intermedio, definito "sicuro" (safe), è ulteriormente limitato da una zona in cui, per le elevate velocità di deformazione, il riscaldamento adiabatico causa una localizzazione del flusso plastico.

Un successivo sviluppo si basa sul Modello Dinamico del Materiale (DMM), che considera il pezzo in deformazione come un dissipatore di potenza. Il sistema viene descritto come costituito da una sorgente di energia, da elementi di immagazzinamento di energia (utensili) e da un dissipatore (il pezzo). La potenza dissipata P, può essere calcolata come

$$P = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (5)$$

Il primo termine a secondo membro viene denominato contenuto di energia G, e rappresenta la potenza dissipata sotto forma di calore, il secondo termine J invece rappresenta la potenza dissipata dai vari micromeccanismi metallurgici (ripristino, ricristallizzazione, microdanneggiamenti, propagazione di cricche, etc.).

Su queste basi è stato introdotto un nuovo parametro, definito come "efficienza di dissipazione", nella forma

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{J}{(1/2)\sigma\dot{\epsilon}} = \frac{2m}{m+1} \Big|_{\epsilon, T} \quad (6)$$

in cui

$$m = \frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\epsilon}} \quad (7)$$

Si noti come, nel ricavare la 7), sia stata utilizzata, per i dati ad una fissata temperatura, la relazione

$$\sigma \propto \dot{\epsilon}^m \quad (8)$$

formalmente analoga alla 3), sostituendola nell'integrale del calcolo di J. Nell'integrazione si è quindi supposto che il valore di m fosse praticamente indipendente dalla velocità di deformazione. D'altra parte l'utilizzo della 7) implicitamente riconosce la non costanza del valore di m, altrimenti si avrebbe un valore di η costante. Per correggere questa discrepanza, Murthy e Rao [6] hanno sviluppato una nuova serie di equazioni, in base alle quali

$$\eta = 2 - \frac{G}{J_{\max}} \quad (9)$$

e quindi il valore di G viene ricavato calcolando gli integrali

$$G = \int_0^{\dot{\epsilon}_0} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (10)$$

in cui $\dot{\epsilon}_0$ è la minima velocità di deformazione utilizzata nelle prove simulate. Per calcolare il primo integrale a secondo membro è necessario disporre di dati relativi a prove a bassissima velocità di deformazione (ad esempio di prove di creep) o è necessario effettuare una estrapolazione.

Criteri di stabilità

Le variazioni di η con temperatura e velocità di deformazio-

ne vengono utilizzati per ricavare delle mappe che permettono di identificare le condizioni in cui l'efficienza di dissipazione viene massimizzata. D'altra parte, se fenomeni positivi come la ricristallizzazione, assorbendo energia e trasformandola in variazioni della microstruttura, corrispondono a massimi di η, anche i fenomeni di microdanneggiamento assorbono energia e quindi possono dare alti valori di dissipazione. La selezione della finestra di lavorazione sulla semplice base delle mappe di efficienza, quindi, non è consigliabile, in quanto non permette di riconoscere quali delle zone di alta η sia dovuta all'introduzione di cavità, cricche o instabilità del flusso plastico.

Per ovviare a questa problematica sono stati sviluppati una serie di "criteri di stabilità"; per esempio, Prasad [7] ha concluso che il flusso plastico è stabile (e quindi il pezzo esente da difettosità) quando

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln [m/(m+1)]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m > 0 \quad (11)$$

Murthy e Rao [6] hanno ricavato un altro criterio basato sull'equazione

$$\frac{2m}{\eta} > 1 \quad (12)$$

Mentre i due criteri precedentemente descritti forniscono indicazioni simili, un ulteriore modello [8] afferma che la deformazione è stabile quando:

$$\left. \frac{\partial \eta}{\partial (\log \dot{\epsilon})} \right|_{\epsilon, T} < 0 \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial s}{\partial (\log \dot{\epsilon})} \right|_{\epsilon, T} < 0 \quad (14)$$

in cui l'entropia s viene calcolata come

$$s = \frac{1}{T} \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial (1/T)} \right|_{\epsilon, \dot{\epsilon}} \quad (15)$$

Va precisato che quest'ultimo modello fornisce indicazioni piuttosto diverse da quelle che si ottengono dai due precedentemente descritti.

UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE DELLE MAPPE DI PROCESSO: ANALISI CRITICA

Per illustrare le problematiche relative all'utilizzo delle mappe di processo, si possono utilizzare i dati ottenuti deformando il composito 6061+20% Al₂O₃. La mappa dell'efficienza di dissipazione viene normalmente costruita interpolando i dati sperimentali tramite una polinomiale (curva tratteggiata in Figura 3), ed effettuando la derivazione di tale curva in modo da calcolare m, secondo l'equazione 6). Le condizioni di instabilità, calcolate con i valori di m precedentemente ottenuti tramite la relazione 11), sono sovrainpresse alla mappa sotto forma di area tratteggiata. La mappa che così si ottiene è riportata in Figura 4. Utilizzando la definizione di η delle equazioni 9-10), e la condizione di stabilità 12), si ricava la mappa di Figura 5. Il confronto fra le due mappe evidenzia alcune differenze, ma in ogni caso la finestra di lavorabilità ottimale (massimo η nella regione "safe") si localizzerebbe fra 475 e 500°C, ad una velocità di deformazione intorno a 10⁻¹ s⁻¹.

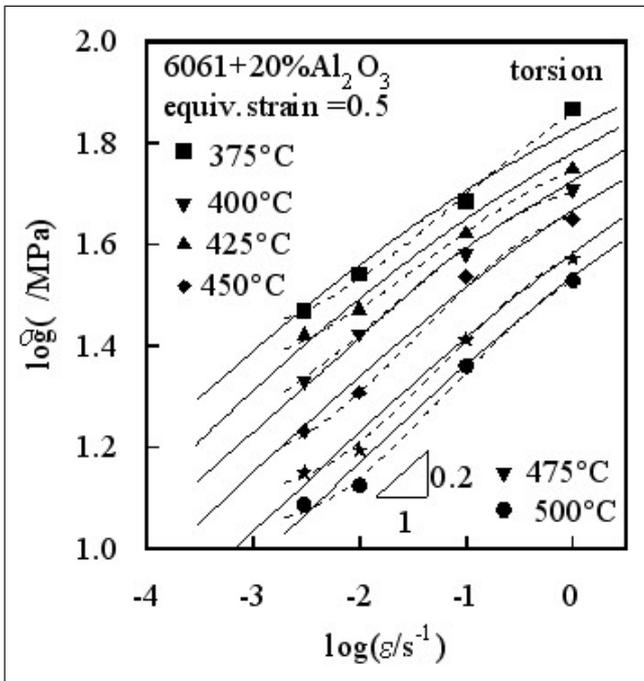


Fig. 3 – Rappresentazione alternativa dei dati relativi al composito in Fig. 2; le curve tratteggiate sono delle equazioni polinomiali, le curve a tratto unito sono state ricavate dalle equazioni costitutive.

Fig. 3 – Same data (composite) in Fig. 2 presented in an alternative form; the broken curves represent polynomial equations, while the solid ones have been obtained by constitutive equations.

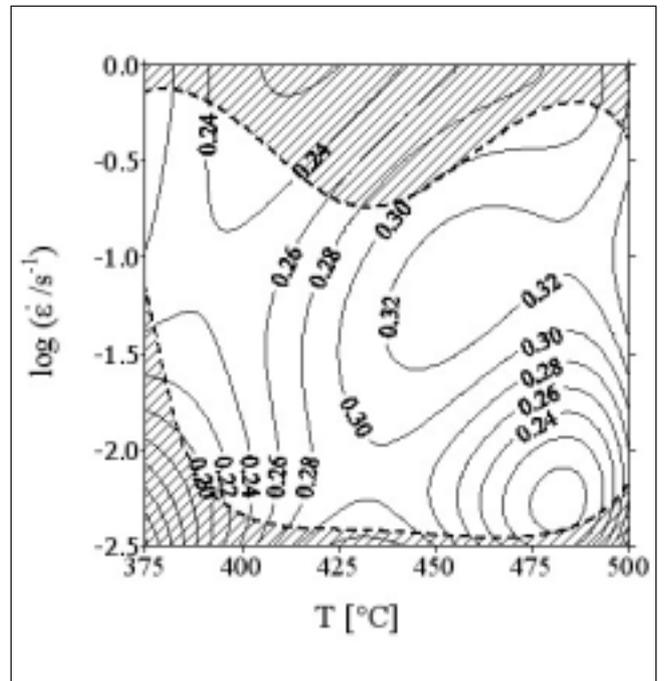


Fig. 5 – Mappa di efficienza e stabilità ricavata dalle equazioni 9-10 ed 12) [2].

Fig. 5 – Efficiency and stability map obtained from Eqns. 9-10 and 12) [2].

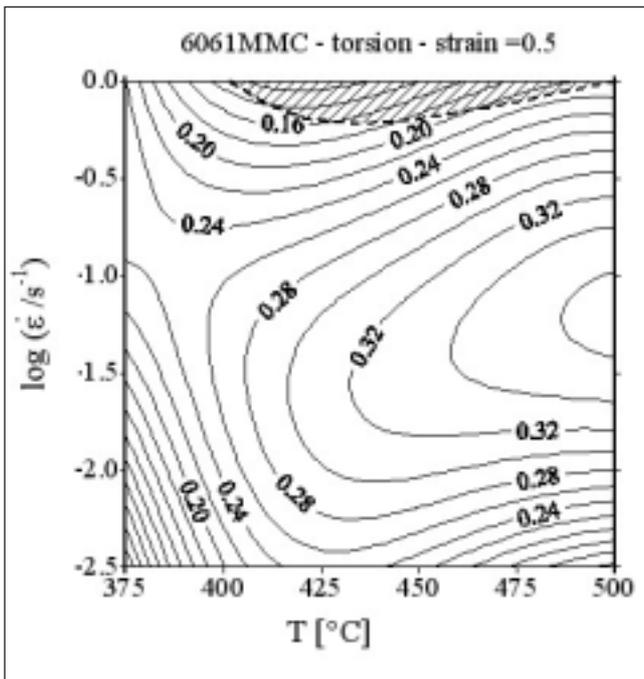


Fig. 4 – Mappa di efficienza e stabilità ricavata dalle equazioni 6) ed 11) [2].

Fig. 4 – Efficiency and stability map obtained from Eqns. 6) and 11) [2].

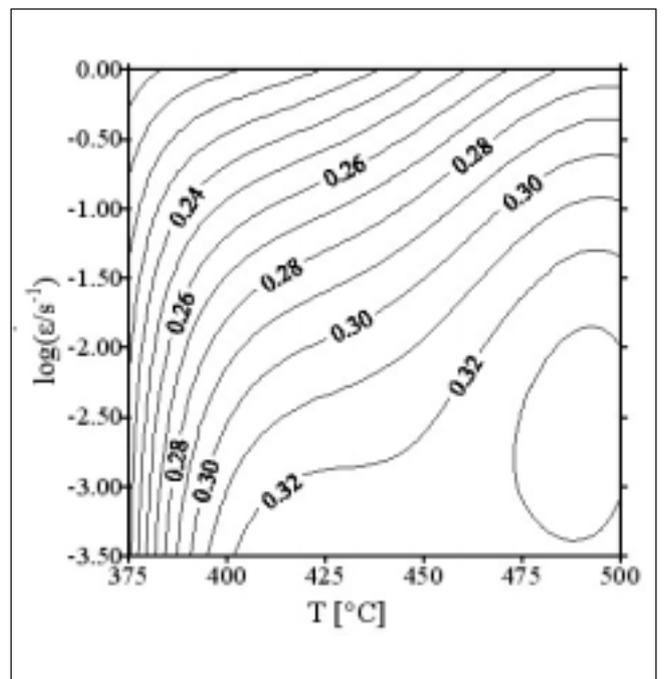


Fig. 6 – Mappa di efficienza ricavata dalle equazioni costitutive (relazione 16).

Fig. 6 – Efficiency map obtained from constitutive equations (Eqn.16).

Al di là delle differenze che si otterrebbero applicando il terzo criterio di stabilità (Eq.13-15), un ulteriore elemento critico di questa procedura è insito nell'utilizzo di equazioni polinomiali per interpolare i dati $\log(\dot{\epsilon})$ vs $\log(\sigma)$; infatti, seguendo questa procedura, l'andamento delle curve è fortemente soggetto alla dispersione dei risultati sperimentali

(tanto più i risultati sono dispersi, tanto più sinuose risultano le curve che si ottengono, ma tale fenomeno non rispecchia tanto fenomeni fisici quanto piuttosto errori sperimentali). Risulta fisicamente più corretto quindi ricavare il valore di m direttamente dalle equazioni costitutive. Nel caso del composito in esame, in particolare, l'equazione utilizzata

era una derivazione della 4):

$$\dot{\epsilon}_m \propto \left(\sinh \alpha_0 \frac{\sigma - \sigma_0}{G} \right)^n \exp(-Q_{HW} / RT) \quad 16)$$

in cui $n=5$, $Q=143$ KJ/mol [9], e σ_0 era un parametro, variabile con la temperatura, che rappresentava l'interazione fra dislocazioni e particelle di fasi secondarie. Dall'utilizzo della 16) (curve a tratto unito in Figura 3) per ricavare m , si ottiene la mappa di efficienza riportata in Figura 6. Un confronto con le Figg.4 e 5 mostra che la mappa che si ottiene è più "regolare", cioè presenta meno avvallamenti e picchi, il che appare fisicamente plausibile. Inoltre, i valori di massima efficienza vengono spostati verso velocità di deformazione più basse (intorno a $10^{-3} s^{-1}$, rispetto a $10^{-1} s^{-1}$), coerentemente con quanto si è ricavato in base all'esperienza, effettuando prove di forgiatura isoterma sul composito in questione.

La precedente discussione dimostra che le mappe di processo, con tutte le cautele del caso, possono essere di una certa utilità nella determinazione delle condizioni di lavorabilità. D'altra parte, è stato giustamente osservato [10] che esiste un altro parametro piuttosto semplice per verificare la stabilità del flusso plastico, e cioè il valore di m . Bassi valori di m facilitano l'instaurarsi di fenomeni di instabilità del flusso plastico, e quindi limitano la deformabilità, tanto che al limite, per il valore massimo di m , cioè 0.5, si ottiene la superplasticità. Ne risulta che, riportando in una mappa i valori di m utilizzati per ricavare la Fig.4, si ottiene la figura 7, che è sostanzialmente analoga a quella in Figura 4.

Una ulteriore osservazione va fatta sui alcune delle informazioni "grezze" che si possono ricavare, in particolare, nel caso delle prove di torsione. Si è già accennato in precedenza che la deformazione equivalente a rottura in torsione può essere utilizzata come una misura della duttilità massima del materiale. Anche se di per sé tale dato numerico non assume una particolare importanza "quantitativa", nel senso che non può essere raggiunto nella lavorazione, esso può essere particolarmente utile per effettuare confronti fra materiali simili. Un esempio può essere la differenza sostanziale di lavorabilità (in particolare in termini di suscettibilità alla cricatura durante la laminazione) riscontrata fra diversi lingotti di acciai ad alto tenore di Cr [11]. La Figura 8 mostra un esempio di mappa della deformazione-equivalente a rottura ricavata sottoponendo l'acciaio a prove di torsione. Si osserva una sostanziale caduta di duttilità alle alte temperature, attribuita alla comparsa di ferrite δ ; sperimentazioni condotte su lingotti di composizione chimica leggermente differente hanno dimostrato che variazioni anche modeste nel tenore degli alliganti influenzano in maniera determinante l'ampiezza di tale zona, e quindi hanno spiegato la diversa suscettibilità alla cricatura di alcuni lotti di materiale [11]. Pur rappresentando un caso piuttosto particolare, quest'ultimo esempio dimostra ancora una volta come un utilizzo oculato delle prove simulative in laboratorio, passando attraverso il calcolo delle equazioni costitutive ed eventualmente la creazione di mappe di vario tipo, possa significativamente facilitare l'ottimizzazione del processo di lavorazione.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Gli esempi citati in questo lavoro, pur rappresentando per certi versi dei casi piuttosto particolari, dimostrano come un utilizzo oculato delle prove simulative in laboratorio, passando attraverso il calcolo delle equazioni costitutive ed eventualmente attraverso la creazione di mappe (siano esse mappe di efficienza e stabilità, mappe di deformazione a rottura o semplicemente mappe che riportano la variazione di

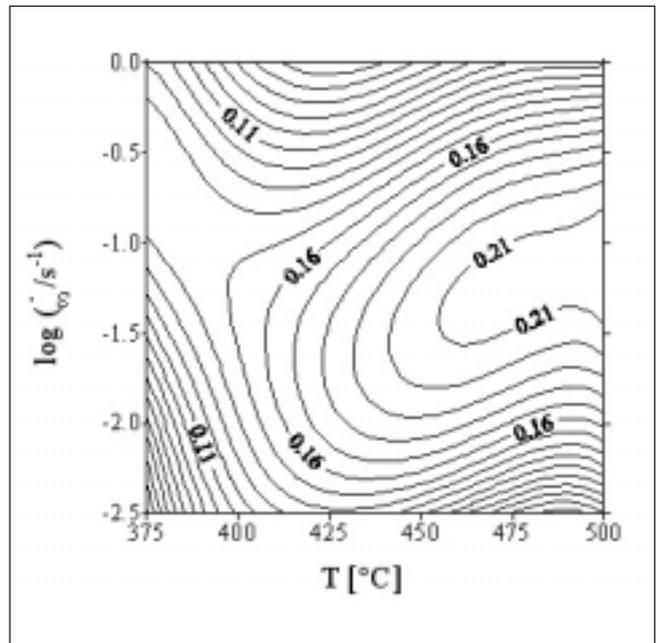


Fig. 7 - Mappa che riporta la variazione di m (calcolato derivando le polinomiali in Figura 3).L'analogia con la Figura 4 è evidente.

Fig. 7 - Map showing m variations with strain rate and temperature (m has been calculated by derivation of the polynomial curves in Figure 3). The similitude with Figure 4 is striking.

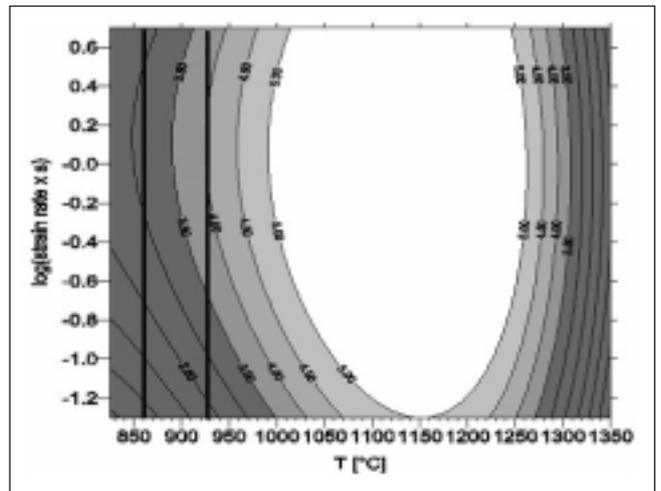


Fig. 8 - Mappa della deformazione equivalente a rottura per un acciaio ad alto tenore di Cr [11]; la zona di buona lavorabilità a caldo è quella rappresentata in bianco.

Fig. 8 - Map showing the equivalent strain to fracture in torsion for a high-Cr steel [11]; the optimum workability conditions are represented by the white area.

m con la temperatura e la velocità di deformazione), possa significativamente facilitare l'ottimizzazione del processo di lavorazione. Le informazioni ricavate da queste mappe vanno però analizzate criticamente, soprattutto per quanto riguarda la procedura di calcolo (soventemente l'utilizzo di equazioni polinomiali porta a risultati che ad un esame più smalzato sono maggiormente legati alla dispersione dei dati, cioè all'errore sperimentale, piuttosto che all'effettivo comportamento del materiale). Per questo motivo, come tutti gli strumenti di questo tipo, le mappe di processo richiedono una validazione dei risultati ottenuti, che può essere ottenuta, ad esempio, da una accurata analisi microstrutturale della risposta del materiale alla deformazione.

BIBLIOGRAFIA

- 1] H.J.McQueen, J.J.Jonas, in "Metals forming: Interrelation between theory and Practice", New York, 1971.
- 2] S.Spigarelli, E.Cerri, P.Cavaliere, E.Evangelista, Material Sci. and Eng., A327, (2002) 144.
- 3] Y.V.R.K.Prasad and S.Sasidhara, Hot Working Guide: A Compendium of Processing Maps, ASM Int., Metals Park, Ohio, 1999.
- 4] H.J.Frost, M.F.Ashby, Deformation mechanism maps, the plasticity and creep of metals and ceramics, Pergamon Press, London, 1982.
- 5] R.Raj, Metall. Trans. 12A (1981) 1089.
- 6] S.V.S.Narayana Murthy, B.Nageswara Rao, Mater. Sci. Eng. A254A (1998) 76.
- 7] Y.V.R.K.Prasad, Indian Journ. of Techn., 28 (1990) 435.
- 8] H.L. Gegel, J.C.Malas, S.M.Doraivelu, V.A.Shende, in 'Metals Handbook', ASM, Metals Park, Ohio, 1988, Vol.14, p.417
- 9] E.Evangelista, S.Spigarelli, Met. Mater.Trans. 33A (2002) 373.
- 10] F.Montheillet, J.J.Jonas, K.W.Neale, Metall. Mater. Trans., 27A (1996)232.
- 11] S.Spigarelli, E.Evangelista, M.El Mehtedi, L.Balloni, A.Poli: Analysis of effect of chemical composition on hot forming operations of p91 steel, Atti del Convegno Super-High-Strength Steels, Roma, Novembre 2005.

MEMORIE

A B S T R A C T

HOT DEFORMATION AND PROCESSING MAPS

Keywords: hot working, mechanical testing, steel, aluminium and alloys

The optimization of hot deformation processes requires a deep knowledge of the metallurgical mechanisms operating at high temperature during straining. Laboratory tests, usually in form of compression or torsion tests, are used to obtain a number of stress vs strain curves (Figure 1), and peak or steady state stresses are then used to calculate the constitutive equations relating temperature, strain rate and stress (Figures 2-3).

These data are thus used for FEM simulations and working load calculations. The use of power-dissipation efficiency and stability maps is a further tool to predict the optimum processing condition of metals and alloys. According to this approach, the system consists of a source of power, a store of power (tools) and a dissipator (the workpiece), which dissipates the energy while deforming. The total power dissipated, P , being σ the instantaneous flow stress that is the material response to the applied strain rate ($\dot{\epsilon}$) to reach a given strain ϵ , can be calculated as:

$$P = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad 1)$$

The first integral, defined as G content, represents the major

power input dissipated in the form of a temperature rise; the second integral, defined as J co-content, represents the power dissipated by metallurgical processes (recovery, recrystallisation, cavity formation, phase transformation etc). The efficiency of power dissipation η , defined as

$$\eta = \frac{2m}{m+1} \Big|_{\epsilon, T} \quad 2)$$

can be directly calculated by interpolating the data obtained by mechanical testing (compression or torsion data). This parameter is been used to construct the "power dissipation maps", which, should allow the region of optimum workability to be identified. This processing window is defined as a region of high power dissipation. However, since damage mechanisms such as wedge cracking usually also correspond to high values of power-dissipation efficiency, a further development, i.e. the introduction of stability maps, is required. The stability criteria formulated on this basis define new temperature vs strain rate maps that identify the regions of unstable flow (Figures 4-6); typical manifestations of unstable flow are adiabatic shear bands, localised shear, Luders bands etc.

The present paper illustrates the application of the different forms of processing maps to case studies such as the determination of the optimum processing window for an Al-based composite and the identification of a ductility gap above 1200°C in the hot deformation regime of high-Cr steels.

5/2006