

Allo scopo, quindi, di impiegare il clip gauge, si sono realizzati dei provini secondo la geometria rappresentata in figura 1. Il provino a clessidra previsto dalla procedura definita in Bonora et al. (2005) è stato sostituito da un provino a clessidra avente, però, una parte centrale rettilinea di lunghezza pari alla misura base delle lame del clip gauge utilizzato.

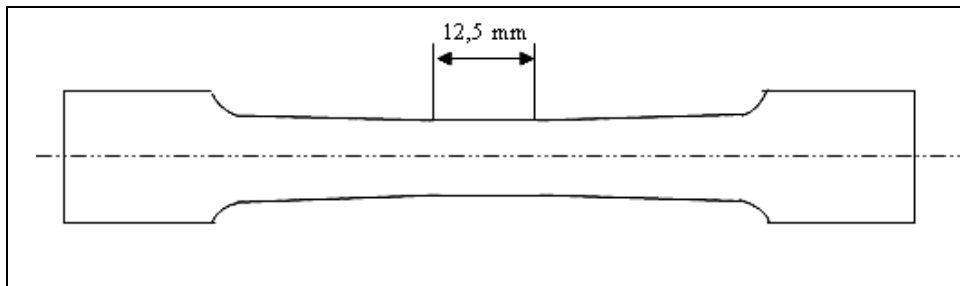


Fig 1. Geometria dei provini

Questa geometria garantisce condizioni di carico uniassiale nella zona di misura e, inoltre, consente di conoscere a priori la zona dove si avrà il danneggiamento e, quindi, la rottura del provino. Per verificare la rispondenza tra la misura effettuata con clip gauge e quella con strain gauge di dimensioni 6x3 mm², è stata effettuata una prova preliminare montando sul provino entrambi gli strumenti di misura. I risultati hanno dimostrato la buona rispondenza tra le due misure, figura 2, e, pertanto, si è proceduto all'effettuazione delle prove con il solo clip gauge.

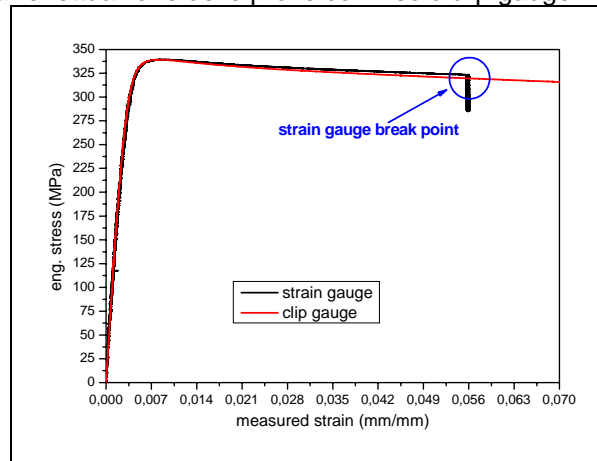


Fig. 2. Confronto tra la misura effettuata con il clip gauge e quella con lo strain gauge

Definita quindi la metodologia di prova, si è proceduto all'effettuazione di prove di trazione con scarichi e ricarichi intermedi al fine di poter valutare la variazione del modulo di Young (E) del materiale. Come illustrato da Bonora et al. (2005) è possibile misurare l'evoluzione del danno attraverso la misura del decadimento del modulo di Young:

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (3)$$

con E_0 modulo iniziale ed E modulo misurato durante gli scarichi parziali, figura 3a. Per ogni provino è stata quindi ricavata la *curva true stress – measured strain*.

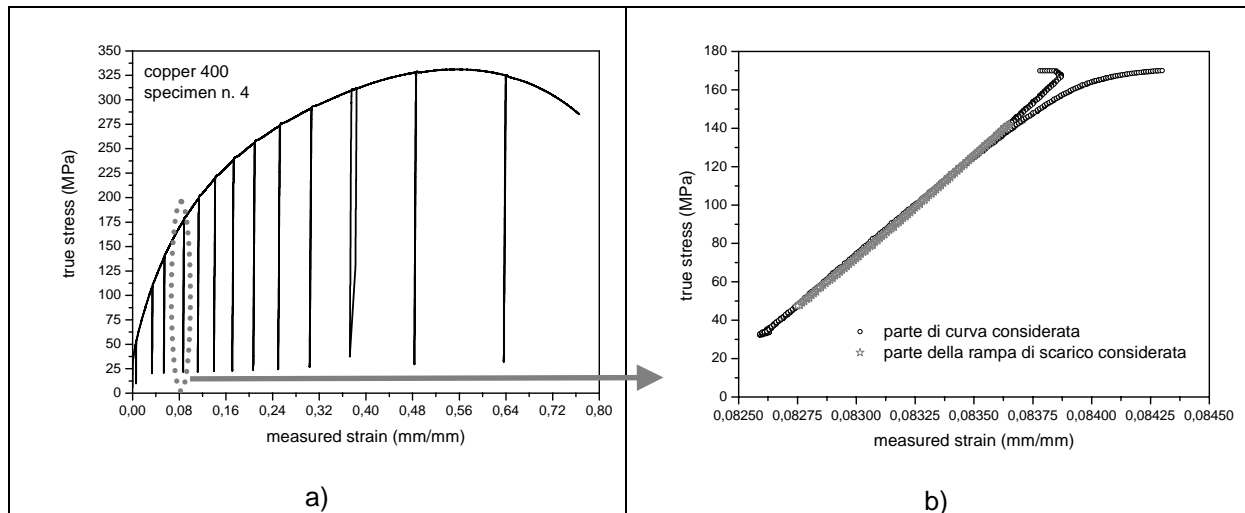


Fig. 3. a) Curva true stress-measured strain per il provino n.4 – rame(400)
b) in grigio è indicata la parte di rampa di scarico considerata per il calcolo di E

Lo sforzo vero è stato derivato da quello ingegneristico attraverso la relazione: $\sigma_{vero} = \sigma_{ingegneristico} (1 + \varepsilon_{misurata})$. Questo per tener conto della riduzione di sezione durante la prova di trazione. Nella realtà poichè quello che interessa sono soltanto le pendenze della fase di scarico e tenendo conto che la differenza tra la deformazione all'inizio dello scarico e quella alla fine è data dal solo ritorno elastico, si può anche utilizzare direttamente la curva ingegneristica.

La misura di E è valida fino alla comparsa del necking. Poi si perdono le condizioni di triassialità uniforme necessarie per la corretta esecuzione della prova.

La determinazione di E viene effettuata, come detto, considerando gli scarichi parziali e tagliando la parte iniziale e finale di tali scarichi, dove sono presenti delle piccole non linearità. Seguendo quanto proposto da Lemaitre e Dufailly (1987) si è calcolato il modulo E nel range:

$$0,15 \frac{P_{max}}{A} < \frac{P}{A} < 0,85 \frac{P_{max}}{A} \quad (4)$$

Dove P rappresenta il carico di trazione ed A la sezione minima, figura 3b.

I parametri della legge evolutiva del danno, Bonora (1997), presenti nella eq. (2) sono stati ricavati separando il danno D dalla deformazione ε nella (2) ed effettuando il logaritmo dell'espressione così ottenuta, Gentile et.al. (2004):

$$\ln \left(\frac{D_{cr} - D}{D_{cr} - D_0} \right) = \alpha \ln \left[\ln \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon} \right) \right] - C \quad \text{con} \quad C = \alpha \ln \left[\ln \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{th}} \right) \right] \quad (5)$$

$$\varepsilon_{th} = \varepsilon_f \cdot e^{-B} \quad \text{con} \quad B = e^{\frac{C}{\alpha}} \quad (6)$$

Si ottengono così i dati di danno in un diagramma doppio-logaritmico in cui l'esponente α viene determinato dalla pendenza della retta ottenuta effettuando il fit lineare dei punti sperimentali. Il parametro C è l'intersezione della stessa retta con l'asse delle ordinate. Una volta misurata la ε_f è quindi possibile determinare la deformazione di soglia per il materiale testato.

3. RISULTATI

Utilizzando l'eq. 3 sono state ricavate le curve di danno in funzione della deformazione per ciascun provino testato. In figura 4 sono riportati i risultati complessivi per le tre differenti condizioni del materiale analizzate. Sono riportati i risultati relativi a 2 provini per condizione data l'alta ripetibilità dei risultati riscontrata nei test eseguiti.

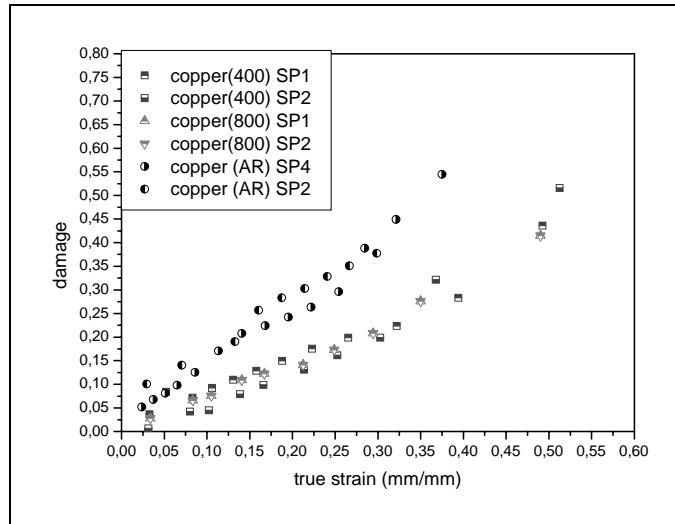


Fig. 4. Valori del danno in funzione della deformazione vera per le tre differenti condizioni del materiale analizzate.

Dalla figura 4 si può notare come il danno nel rame indicato con la sigla AR (as received) che non ha subito trattamento di ricottura dopo la lavorazione meccanica, i valori del danno sono più alti rispetto a quelli dei provini che sono stati sottoposti a processo di ricottura dopo la lavorazione, rame(400) e rame(800). Risultato questo che conferma quanto indicato da Ruggiero e Bonora (2003) di una possibile influenza della microstruttura del materiale sui parametri di danno.

Volendo calcolare con la procedura descritta i valori dei parametri di danno si ottengono delle curve del tipo di quella rappresentata in figura 5 per uno dei provini rame400. Si è assunto un valore di deformazione finale pari a 2.2, di danno critico pari a 1 e di danno iniziale pari a 0, secondo quanto descritto in Bonora et al. (2005). Analoghi grafici si ricavano per gli altri provini. Da questi si possono ottenere i valori dei parametri di danno cercati. In figura 6 è rappresentato il confronto tra la curva teorica ed i valori sperimentali per lo stesso provino considerato in figura 5. In tabella 1 sono riportati i valori dei parametri di danno rispettivamente per rame AR, rame400 e rame800 ricavati secondo la metodologia descritta.

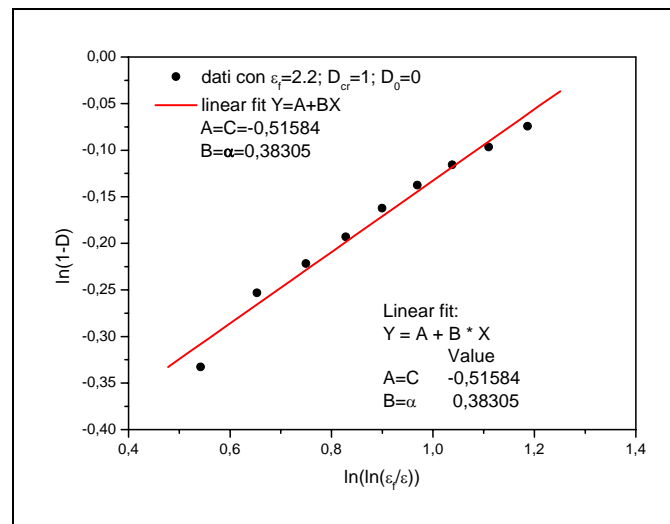


Fig. 5. Individuazione dei parametri C ed α per il provino SP1 rame400

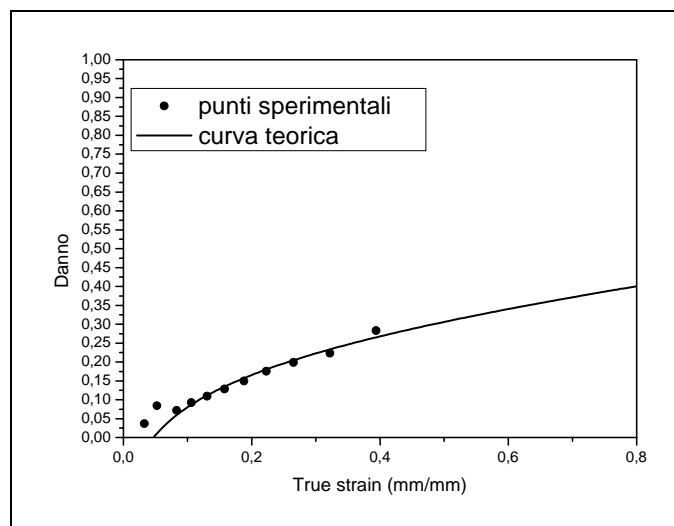


Fig. 6. Confronto tra la curva teorica ed i valori sperimentali per il provino SP1, rame 400.

	ϵ_f	α	ϵ_{th}
rame400	2.2	0.38	0.047
rame800	2.2	0.33	0.045
rame AR	1.5	0.436	0.022

Tabella 1. Valori dei parametri di danno per le tre differenti condizioni considerate.

Come si può notare dalla tabella 1, i valori dei parametri per il rame ricotto sono molto simili. Mentre il rame lavorato e non trattato termicamente presenta dei valori differenti. In particolare la soglia di danno e, cioè, il valore a cui incominciano i processi di danneggiamento del materiale, risulta circa la metà del valore ottenuto per il rame ricotto, in accordo con i dati riportati in figura 4.

Si può quindi notare come per uno stesso materiale, il trattamento termico influenzi in misura notevole la nucleazione, crescita e coalescenza dei microvuoti che sono all'origine dei fenomeni di danneggiamento duttile. E' quindi possibile ipotizzare che i parametri di danno di un materiale policristallino siano fortemente influenzati dalla microstruttura dello stesso.

Ulteriori analisi, in particolare analisi al SEM, sono necessarie per meglio comprendere la dipendenza dei parametri di danno dalla microstruttura del materiale.

CONCLUSIONI

Dalle prove sperimentali, effettuate secondo la procedura su esposta, si è evidenziato come i parametri della legge evolutiva del danno siano influenzati dalla microstruttura del materiale considerato. In particolare quello che emerge dai dati sperimentali è che il valore di soglia della deformazione plastica, raggiunto il quale comincia il processo di danneggiamento del materiale, nel caso del rame ricotto è circa il doppio di quello del rame lavorato ma non trattato termicamente dopo la lavorazione. Questo indica che la microstruttura del materiale gioca un ruolo molto importante nell'iniziazione dei fenomeni di danno. Una ulteriore analisi al SEM è necessaria per studiare la correlazione tra microstruttura ed i valori di soglia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bonora, N., 1997. A nonlinear CDM model for ductile failure. Eng. Frac. Mech. 58, 11-28.
- [2] Ruggiero, A. and Bonora, N., 2003. Ductile Damage Prediction In Taylor Impact Cylinder Test Using CDM Approach. 13th Applied Physics Society Shock Compression on Condensed Matter Conference, Portland, OR, USA
- [3] Bonora, N., Gentile, D., Pirondi, A. and Newaz, G., 2005. Ductile damage evolution under triaxial state of stress: theory and experiments. Int. J. of Plasticity 21, 981-1007.
- [4] Bonora, N., Gentile, D., Pirondi A., "Identification of the parameters of a non-linear continuum damage mechanics model for ductile failure in metals", Journal of Strain Analysis, 2004, 39, n°6.
- [5] J. Lemaitre and J. Dufailly. Damage Measurements. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 28, n. 5/6, pp643-661, 1987.