

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI TUBI IN AISI 316 RIEMPITI CON SCHIUMA IN LEGA DI AL

G. Costanza*, A. Sili**, M.E.Tata*

*) Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Roma - Tor Vergata

**) Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Chimica e Ingegneria Industriale, Università of Messina

1. RIASSUNTO

Negli ultimi anni sono stati impiegati come assorbitori di energia tubi metallici con pareti sottili, grazie alla leggerezza ed alla facilità con cui raggiungono, in caso di collisione, condizioni favorevoli all'ingobbamento, ottimali per trasformare energia cinetica in energia spesa per la deformazione. Il riempimento di elementi tubolari con schiume metalliche può ritardare la fase di collasso strutturale accrescendo ulteriormente l'energia assorbita durante compressione o flessione; sotto questo aspetto le modalità produttive risultano determinanti in quanto da esse dipendono la morfologia cellulare del riempimento e la formazione di legami interfacciali schiuma – parete.

In un precedente lavoro sono stati prodotti tubi di rame riempiti con schiuma in alluminio, attraverso un processo di schiumaggio di polveri compattate direttamente al loro interno. Nel presente lavoro sono stati realizzati, con la stessa procedura, tubi in acciaio riempiti sia con schiuma di alluminio che di leghe Al-Si. Sui tubi sezionati sono state effettuate osservazioni di microscopia ottica ed elettronica in scansione; il comportamento meccanico è stato valutato attraverso la prova di compressione radiale denominata "Brazilian test".

2. INTRODUZIONE

Il settore automobilistico è in continua crescita sia dal punto di vista delle prestazioni che della sicurezza del veicolo. Particolare attenzione viene rivolta alla funzione svolta dagli elementi strutturali di un autoveicolo come assorbitori di energia, in grado di offrire una valida protezione ai passeggeri trasformando, in caso di collisione, energia cinetica in energia spesa per la deformazione [1]. Materiali cellulari, come le schiume metalliche, con una bassa massa volumica ed un'elevata capacità di assorbire energia meccanica durante deformazione [2], vanno incontro alle esigenze di contenere la massa complessiva dell'autoveicolo riducendone i consumi di carburante e le emissioni di gas serra. Negli ultimi anni le schiume di alluminio si sono affermate grazie alla loro ridotta densità ed al basso punto di fusione che ne facilita i processi produttivi [3]. La struttura porosa consente di assorbire notevoli quantitativi di energia per livelli di sforzo relativamente bassi e costanti e la sua morfologia ha effetti sostanziali sul comportamento a compressione, come documentato in letteratura sia attraverso prove sperimentali [4, 5] che simulazioni numeriche [6].

La velocità di deformazione è determinante ai fini del comportamento a compressione delle schiume [7]: in condizioni quasi-statiche, il diagramma di compressione di una schiuma di alluminio a celle chiuse è caratterizzato da una breve fase elastica iniziale, un ampio plateau di deformazione plastica (fino al 50-60%), durante il quale si verifica la scomparsa progressiva delle celle di maggior diametro, fino alla fase finale in cui si osserva un rapido incremento del carico determinato dal collasso delle celle nell'intero campione [8]. Le proprietà a compressione, come il modulo elastico, l'ampiezza del tratto plastico e quindi l'energia assorbita, dipendono dalle modalità di collasso delle celle [9, 10], che a loro volta dipendono dal processo produttivo adottato

[11,12]. Utilizzando la tecnica della tomografia computerizzata è possibile studiare le fasi di compressione di una schiuma metallica analizzando, passo dopo passo, le fasi di compressione di un singolo campione di schiuma [8].

Le schiume metalliche sono utilizzate anche per il riempimento di elementi tubolari, dal momento che sono in grado di modificarne le modalità di deformazione, ritardando la fase di collasso strutturale ed accrescendo l'energia assorbita durante compressione o flessione [13]. Gli sforzi di molti ricercatori sono stati indirizzati verso l'ottimizzazione delle condizioni di schiumaggio per il riempimento di elementi tubolari con schiume di alluminio [14], sperimentando gli effetti di tale riempimento sull'assorbimento di energia per impatto nei componenti strutturali [15] e sviluppando simulazioni numeriche per studiare il collasso provocato dall'ingobbamento progressivo delle sezioni [16]. In particolare si è cercato di ottimizzare durante la fase progettuale le dimensioni di un tubo vuoto con funzione di assorbitore di energia valutando gli effetti del riempimento [17].

Durante la deformazione di un tubo riempito mediante schiuma metallica, le modalità di collasso delle celle e l'interazione con la superficie interna del contenitore giocano un ruolo fondamentale. In relazione al processo produttivo, occorre evitare la formazione di una pellicola isolante di ossido tra la schiuma e la superficie del tubo: in letteratura [18] è stata sperimentata la possibilità di ottenere la formazione di legami metallurgici attraverso schiumatura in situ effettuata con opportuni accorgimenti.

Uno studio accurato della deformazione di schiume metalliche e di elementi tubolari riempiti richiede la preparazione di numerosi provini da cui ricavare, a vari livelli di compressione, sezioni a differenti spessori, in modo da effettuare la ricostruzione tridimensionale della struttura cellulare [19] e dell'insieme schiuma/tubo [20].

In un precedente lavoro [20] sono stati prodotti tubi di rame riempiti con schiuma in alluminio, attraverso un processo di schiumatura di polveri compattate direttamente al loro interno. Il comportamento alla compressione assiale di tali elementi e, per confronto di tubi vuoti, è stato studiato mediante osservazioni metallografiche di alcune sezioni e tomografiche effettuate a vari livelli di compressione dei campioni.

Sulla base di questa esperienza, nel presente lavoro sono stati realizzati tubi in acciaio, riempiti con schiume di Al commercialmente puro e in lega Al-Si ipoeutettica. Gli obiettivi sono stati in primis un'ottimizzazione dei parametri di processo per ottenere schiume a celle chiuse in lega di Al-Si con una porosità di qualità accettabile in termini morfologici e con buone proprietà meccaniche, quindi la realizzazione di tubi con qualità di assorbitori di energia.

La caratterizzazione metallografica e meccanica delle schiume prodotte è stata effettuata rispettivamente mediante osservazioni di microscopia ottica ed elettronica in scansione (SEM) e prove di compressione assiale. Infine la verifica del potenziale impiego come riempitivo per tubi in acciaio nelle applicazioni strutturali è stata condotta attraverso la prove di compressione radiale "Brazilian test".

2. MATERIALI E METODI SPERIMENTALI

2.1 Produzione delle schiume

La produzione delle schiume è stata realizzata mediante la tecnica di fusione di polveri compattate [21]. Sulla base di parametri di processo messi a punto in precedenti lavori [22, 23], sono state prodotte schiume a celle chiuse in alluminio e in lega AlSi ipoeutettica. Il silicio abbassa il punto di fusione dell'alluminio avvicinandolo a quello di inizio della decomposizione dell'agente schiumante (465°C). Si consideri che l'utilizzo di tale lega comporta un notevole incremento di durezza rispetto all'alluminio puro, migliorandone la resistenza all'usura e le proprietà meccaniche in generale; tuttavia un eccesso di silicio conferisce eccessiva fluidità rendendo più difficile il controllo della crescita delle bolle, inoltre il silicio può infragilire notevolmente le pareti delle bolle portando la schiuma al collasso durante la deformazione.

Sono state utilizzate polveri di Al commercialmente puro (99.6%), sia da sole che con polveri di lega AlSi12 (in entrambi i casi con diametro medio di 44 μm), opportunamente miscelate per ottenere composizioni ipoeutettiche, mescolandole insieme a polvere di TiH_2 (diametro medio di 5 μm) con funzione schiumante e polvere di SiC (37 μm) in grado di aumentare la viscosità del liquido e di stabilizzare la porosità agendo sull'interfaccia film di metallo - bolla.

Per le varie miscele di polveri prodotte sono state considerate le seguenti composizioni: TiH_2 (0.4 – 0.6 % in peso), SiC (3 - 12 %) e la rimanenza Al commercialmente puro oppure lega AlSi12 ed Al commercialmente puro in modo da ottenere leghe con tenori di Si compresi tra il 6 e il 10%. La miscela è stata mescolata con apposito dispositivo, in quanto la distribuzione omogenea all'interno del precursore delle particelle di polveri, e in particolar modo di quelle di TiH_2 , è un requisito fondamentale per ottenere schiume omogenee e quindi di buona qualità [24].

Le polveri sono state compattate, all'interno di uno stampo, per ottenere precursori con diametro di 15 mm e altezza di 10 mm, in una pressa idraulica con un carico ottimale per frantumare l'ossido presente sulle polveri stesse (120 kN per Al commercialmente puro e 150 kN per leghe Al-Si).

Lo strato di ossido presente sulla superficie del precursore, che, fondendo sopra i 2000°C, rimarrebbe intatto durante la schiumatura in forno ostacolando la crescita della schiuma, oltre che l'adesione delle superfici di contatto schiuma – parete del tubo, è stato eliminato mediante abrasione meccanica.

I precursori sono stati sottoposti al processo di schiumatura inserendoli direttamente in un tubo di rame (16 mm di diametro e 1 mm di spessore) o di acciaio AISI 316 (16 mm di diametro e 1 mm di spessore), posti all'interno di un forno, e mantenendoli a 700°C (temperatura giudicata ottimale per il rilascio di H_2 continuo nel tempo) per 5 min (nel caso di tubi di rame) e 8 min (tubi in AISI 316).

Il raffreddamento dei campioni estratti dal forno è avvenuto in acqua.

La combinazione di temperatura e tempo di permanenza in forno è stata scelta poiché determina un buon compromesso per la viscosità del fuso e per la crescita della schiuma.

2.2 Indagini metallografiche e tomografiche

Sui tubi sezionati, dopo opportuna preparazione metallografica e attacco chimico con HF (0.5%), sono state effettuate osservazioni di microscopia ottica ed elettronica in scansione SEM.

Inoltre sono state effettuate, sui tubi di Cu riempiti di schiuma di Alluminio, indagini di tomografia computerizzata (CT) mediante un'attrezzatura a fuoco variabile (tubo a raggi X in rame e tensione di accelerazione massima di 225 kV), che consente di ottimizzare i parametri operativi nel campo micro-macro focus con risoluzione spaziale fino a 30 μm . Dalla ricostruzione del volume dei campioni sottoposti alle misure CT, è possibile ottenere immagini 3D e sezioni 2D. Queste ultime sono state “elaborate” per aumentare contrasto e luminosità, in modo da evidenziare la struttura cellulare e lo stato delle interfacce schiuma - parete.

2.2 Prove di compressione

Per le prove di compressione si è utilizzata la macchina MTS Insight 50. Le prove sono state realizzate su provini cilindrici di schiuma e di tubo (vuoto o riempito) mantenendo un avanzamento della traversa costante, pari a 2 mm/min, con una frequenza di acquisizione dati pari di 5 Hz. Per ragioni di sicurezza il carico massimo esercitato sui campioni non ha ecceduto i 45 kN, avendo a disposizione una cella di carico da 50 kN.

Prove di compressione assiale

Sono state effettuate prove di compressione assiale sui provini di schiuma per confrontare il comportamento dell'alluminio commercialmente puro con quello delle leghe Al-Si, escludendo quindi l'effetto irrigidente del tubo.

Per un utile confronto si riportano anche i risultati della prova di compressione assiale sui tubi in rame, che è stata realizzata a gradini di carico e di scarico, in modo da effettuare passo dopo passo le osservazioni tomografiche [20]. Le varie curve di carico sono state montate in sequenza per ottenere un diagramma completo di compressione. Lo sforzo di compressione è stato determinato con la seguente espressione:

$$1) \quad \sigma = 4 P / (\pi D^2)$$

essendo P il carico applicato, D il diametro del provino. E' stato considerato il diametro iniziale. Per la deformazione ε è stato fatto riferimento all'avanzamento della traversa (δ):

$$2) \quad \varepsilon = (L - L_0) / L_0 = \delta / L_0$$

dove L è la lunghezza del provino deformato e L_0 la sua lunghezza iniziale.

Prove di compressione radiale

Sui tubi in acciaio, data la loro maggiore rigidità rispetto a tubi in rame, sono state effettuate prove di compressione radiale. Tale prova, denominata "Brazilian test", viene utilizzata nello studio delle rocce, della metallurgia delle polveri [27] o comunque quando non è possibile effettuare la prova di trazione [28]. Con riferimento allo schema di figura 1, essa induce sforzi di compressione nella direzione dello schiacciamento (y) e di trazione nella direzione perpendicolare (x). Muovendosi lungo l'asse delle ascisse ($y=0$), i valore massimi degli sforzi di compressione (σ_y) e di trazione (σ_x) vengono raggiunti in $x=0$ ed assumono le seguenti espressioni [29]:

$$3) \quad \begin{aligned} \sigma_y &= - 6 P / (\pi D l) \\ \sigma_x &= 2 P / (\pi D l) \end{aligned}$$

dove l è la lunghezza del provino nella direzione dell'asse. E' stato considerato il diametro iniziale.

In questo caso la deformazione è stata riferita al diametro lungo la direzione di schiacciamento ed ha la seguente espressione:

$$4) \quad \varepsilon = (D_0 - D) / D_0$$

Essendo D_0 il valore iniziale del diametro.

RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Ottimizzazione dei parametri di processo

Il primo obiettivo del lavoro è stato quello di ottimizzare i parametri di processo per ottenere una schiumatura in loco, come mostrato in figura 2 nel caso di Al commercialmente puro all'interno di tubi di acciaio e di rame. In quest'ultimo caso si riporta un'immagine tomografica che consente di verificare l'instaurarsi o meno di una continuità schiuma – parete.

Tra i principali parametri di processo che intervengono nella schiumatura e che sono stati ottimizzati per ottenere schiume di lega di Al-Si, un ruolo importante è stato giocato dal tenore di Si sotto un duplice aspetto: è stato modificato il quantitativo di SiC nella miscela e successivamente il quantitativo di Si nella lega di Al-Si in quanto entrambi influenzavano la viscosità. Le particelle di

SiC hanno il duplice effetto di aumentare la viscosità del liquido e di stabilizzare la porosità. Alcuni studi di Banhart confermano come i principali effetti migliorativi delle schiume siano essenzialmente legati alla capacità di stabilizzare la crescita delle bolle stesse in fase di schiumatura [25-26]. Sotto questo aspetto il tenore ottimale di SiC è risultato del 9%, come mostrato in figura 3, dove si riportano a confronto i campioni in lega AlSi 6 ottenuti con lo 0.4 di TiH_2 per tre diverse concentrazioni di SiC. Poi si è passati all'ottimizzazione del quantitativo di Si nella lega Al-Si e i migliori risultati in termini di morfologia dei pori sono stati ottenuti con la lega AlSi8 come si può vedere nella figura 4.

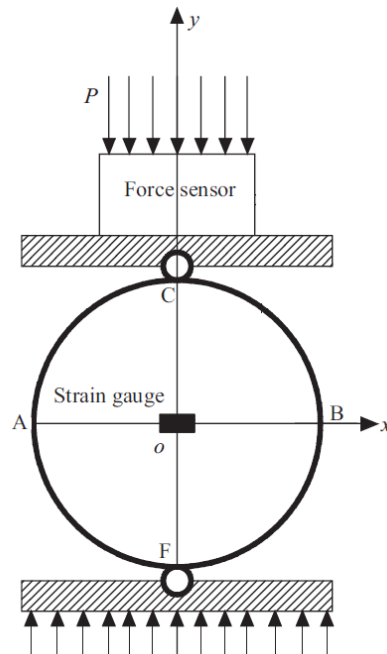


Fig. 1 Schema della prova di compressione radiale “Brazilian test”: y direzione degli sforzi di compressione, x direzione degli sforzi di trazione.

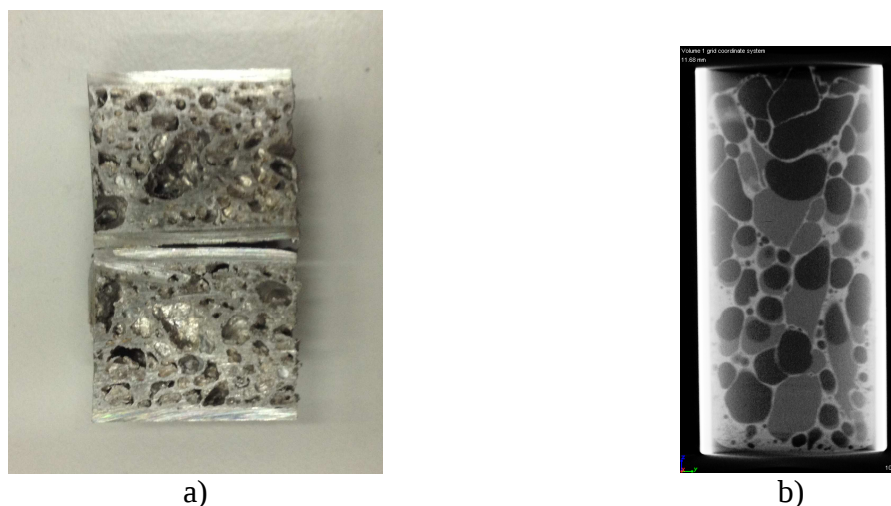


Fig. 2 – Campioni di schiuma di Al all'interno di tubi: a) tubo di acciaio (immagine fotografica del tubo sezionato), b) tubo in rame (immagine tomografica).

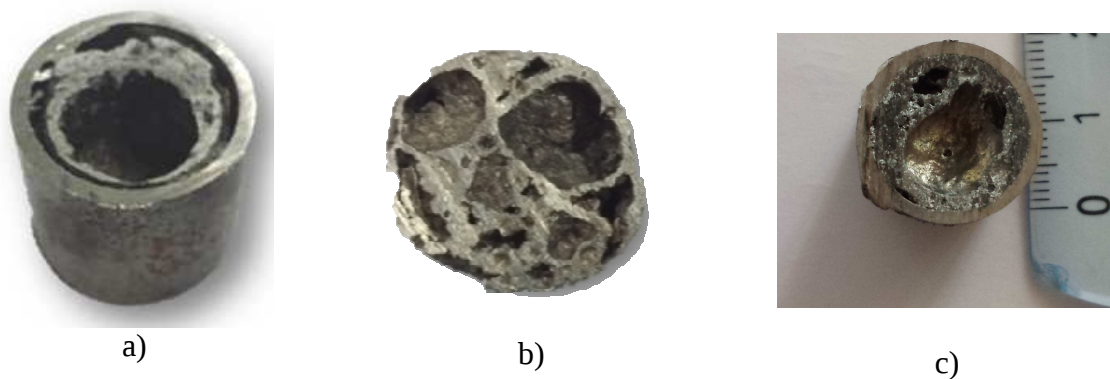


Fig. 3 – Effetto del tenore di SiC sul processo di schiumatura (lega AlSi 6 – TiH₂ 0.4%): a) 3%, b) 9%, c) 12%.

L'altro parametro critico è stato il TiH₂, che comincia a dissociarsi al di sopra dei 465°C, dando origine a bolle di H₂ provocando l'espansione del metallo fuso ed il conseguente riempimento del crogiuolo. Il tenore di TiH₂, insieme a quello di SiC, determina la densità relativa e, secondo le condizioni di raffreddamento, le dimensioni delle celle. Il tenore ottimale di TiH₂ è risultato essere dello 0,4% (fig. 4).



Fig. 4 – Effetto del tenore di TiH₂ sul processo di schiumatura (lega AlSi8 – SiC 9%): a) 0.4 %, b) 0.6%.

3.2 Indagini metallografiche

Le indagini metallografiche hanno consentito di verificare la formazione della lega ipoeutettica, a seguito della fusione delle polveri di Al commercialmente puro e delle leghe AlSi.

Come mostrato nell'immagine ottica a basso ingrandimento in fig. 5a, la dispersione di particelle SiC è perfettamente visibile, dal momento che esse non hanno preso parte al processo di fusione.

La matrice metallica, riportata nella micrografia ottica in fig. 5b, è chiaramente di natura ipoeutettica con grani di alluminio primario e precipitazione di Si eutettico al loro bordo. Queste ultime sono di dimensioni intorno a 1 μm come mostrato nella micrografia SEM in fig. 6.

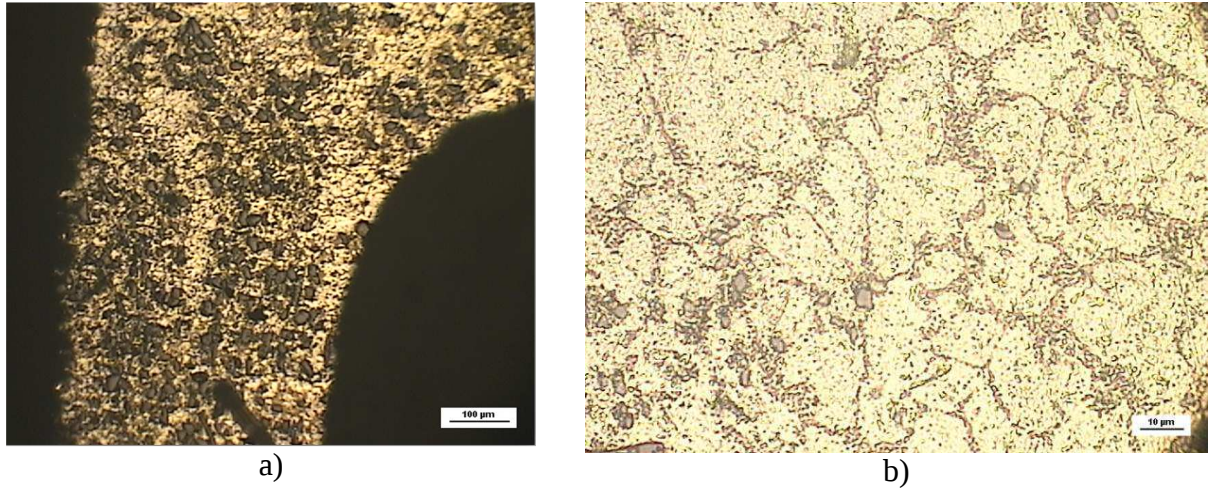


Fig. 5 – Micrografie ottiche di una sezione di un schiuma in lega AlSi6: a) parete di una cellula con evidenza delle particelle in SiC, b) dettaglio della matrice metallica.

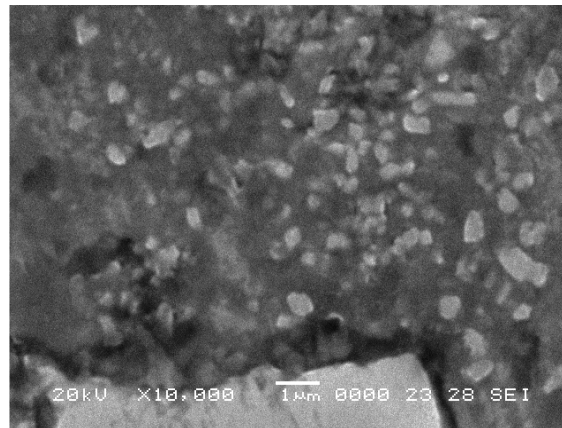


Fig. 6 – Micrografia SEM di una sezione di una schiuma in lega AlSi6.

3.3 Prove di compressione

Le curve di compressione σ - ϵ di quattro differenti campioni di schiuma (Al commercialmente puro, AlSi6, AlSi8 e AlSi10), non contenute nei tubi, sono riportate a confronto in figura 7.

Confrontando i valori del picco di sforzo, emerge come le schiume abbiano una resistenza a compressione crescente con il tenore di Si. Tuttavia per deformazioni superiori al 20% la lega AlSi8 presenta una riduzione dello sforzo di compressione, a causa del cedimento delle pareti cellulari dovuto all'eccessiva fragilità della lega o ad altri fattori come l'eventuale presenza di cavità dalla forma poliedrica che, inducendo stati di tensioni triassiali, favoriscono il collasso strutturale. In tutti i casi esaminati si assiste per deformazioni intorno all'80% ad un aumento dello sforzo a seguito del collasso generalizzato delle celle.

Nel caso della schiuma in Al commercialmente puro, la curva sforzo-deformazione non presenta un picco iniziale dello sforzo di compressione, che invece aumenta progressivamente al procedere della deformazione.

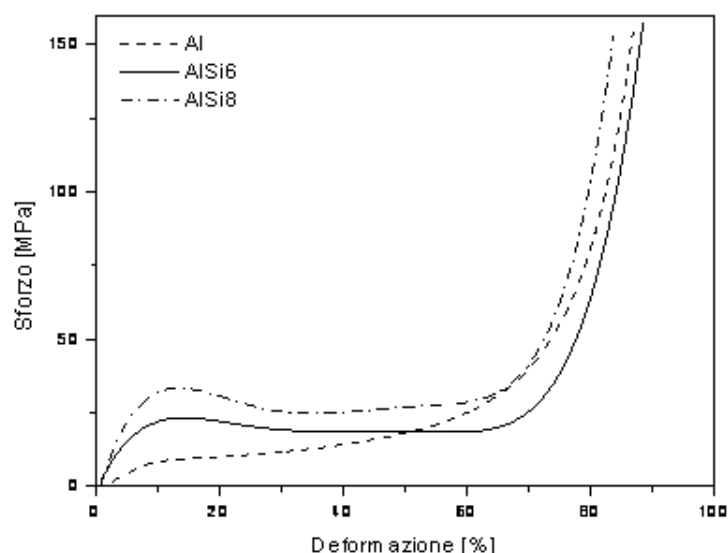


Fig. 7 – Diagrammi di compressione delle varie schiume: Al commercialmente puro e leghe AlSi.

Il sistema tubo – schiuma presenta una rigidezza a compressione notevolmente maggiore rispetto a quelle del tubo vuoto e della sola schiuma, come mostrato dai rispettivi diagrammi riportati in figura 8 [20]. L'andamento del carico in funzione dello spostamento è caratterizzato da una serie di picchi corrispondenti ciascuno ad uno stadio di collasso per ingobbamento delle pareti del tubo.

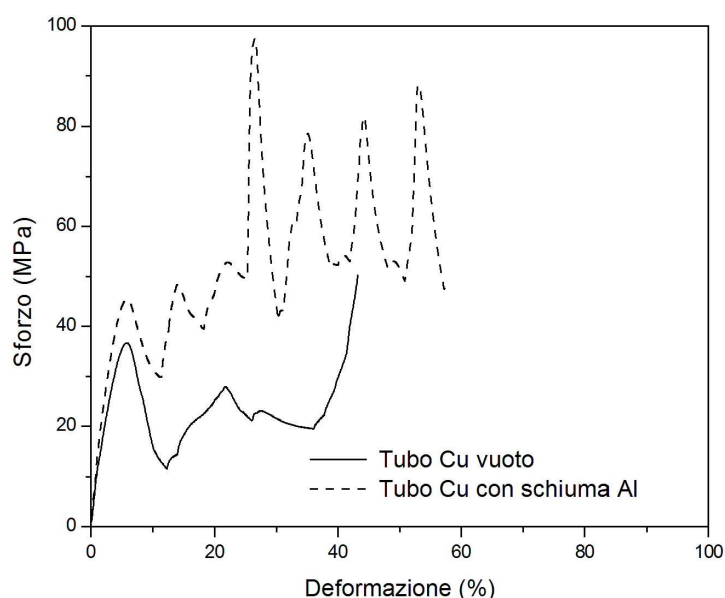


Fig. 8 – Diagrammi di compressione a confronto: tubo di rame vuoto, tubo di rame riempito con schiuma di Al commercialmente puro.

Il tubo di rame riempito con la schiuma di alluminio inizia a deformarsi con le caratteristiche pieghe che si formano prima agli estremi e poi a circa metà altezza, diversamente da quello vuoto che presenta le pieghe tutte posizionate ad una estremità. Nella fase iniziale della deformazione (fig. 9a) la struttura cellulare appare integra ed aderente alla parete del tubo, con distacchi localizzati dove si è formata la prima piega o in prossimità delle zone dove stanno per formarsi le successive; nella fase di deformazione avanzata (fig. 9b) la struttura cellulare appare fortemente danneggiata con evidente distacco dalle pareti del tubo.

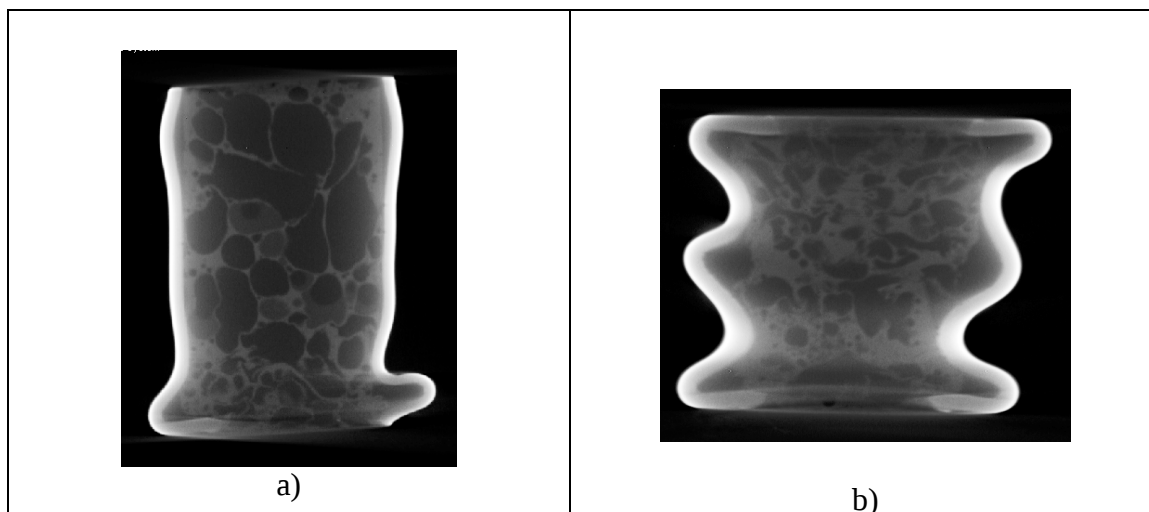


Fig. 9 – Sezioni tomografiche di due step di deformazione del tubo di rame riempito con la schiuma di alluminio: a) fase iniziale della deformazione; b) fase avanzata (50%).

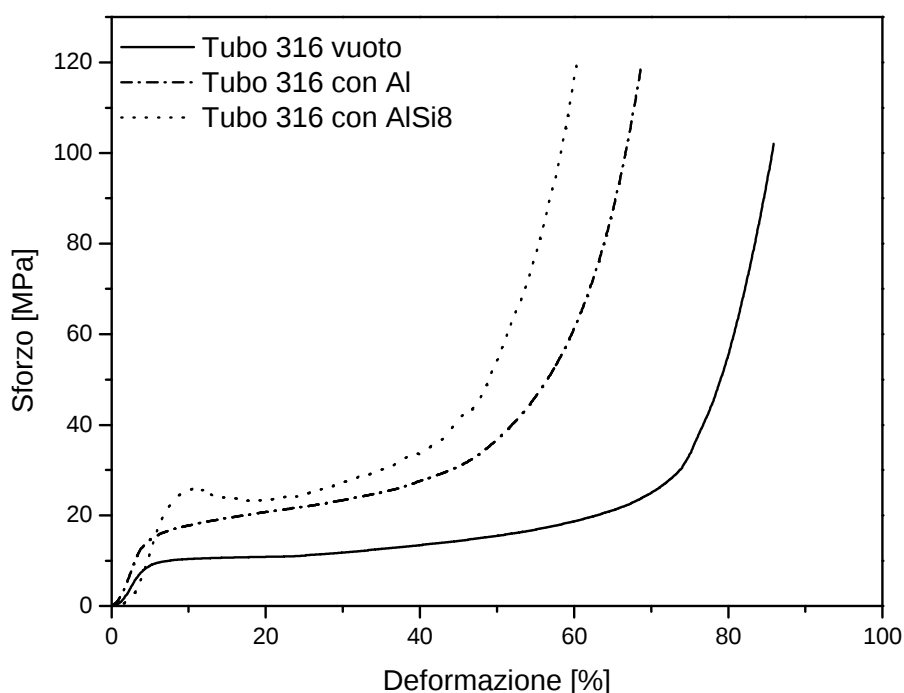


Fig. 10 – Risultati della prova di compressione radiale “Brazilian test” (sforzi di compressione in funzione della deformazione diametrale): tubo in acciaio AISI 316 vuoto, tubo in acciaio riempito con schiuma di Al commercialmente puro; tubo in acciaio riempito con lega AlSi8.

I risultati delle prove di compressione radiali per il tubo in AISI 316 vuoto e per quelli riempiti con Al commercialmente puro e con lega AlSi8, sono riportati a confronto in figura 10.

I tre diagrammi presentano un ampio plateau di deformazione plastica, inoltre la presenza della schiuma all'interno del tubo, quale essa sia, permette di ottenere un incremento della resistenza meccanica. Rispetto alla schiuma in Al commercialmente puro quelle in AlSi8 risultano essere più

performanti, in termini di resistenza meccanica ed energia assorbita, pur comportando un incremento di peso.

4. CONCLUSIONI

Le conclusioni sono riassunte con specifico riferimento ai tre obiettivi principali dello studio: ottimizzazione dei parametri di processo per la produzione delle schiume in alluminio – silicio, caratterizzazione meccanica delle stesse e alla verifica del potenziale impiego come riempitivo per tubi in acciaio nelle applicazioni strutturali. Per quanto riguarda il primo punto sono risultate schiumabili con la metodologia delle polveri compattate la lega AlSi6, la AlSi8, AlSi10. Per la realizzazione delle schiume in lega è stato necessario aumentare il quantitativo di stabilizzante rispetto a quello impiegato per le schiume in Al puro (9% di SiC contro il 3%) mentre è stata mantenuta costante la percentuale di agente soffiante (0,4% di TiH_2). A causa della maggiore resistenza meccanica delle leghe AlSi è stato necessario aumentare la pressione di compattazione di produzione del precursore (da 12 t a 15 t) rispetto a quelli delle schiume in Al puro. Sono invece rimasti invariati la temperatura del forno (700° C) e il tempo di permanenza nello stesso indipendentemente dalla composizione considerata (circa 5 minuti impiegando il crogiuolo in rame e 8 min impiegando il crogiuolo in inox).

I migliori risultati in termini di qualità della porosità (intesa come dimensione, forma regolare e distribuzione nel volume) si sono ottenuti con la lega AlSi8 mentre le altre composizioni presentavano problemi di coalescenza. Le valutazioni fatte sono relative all'utilizzo dei crogiuoli in rame mentre nell'inox il problema della coalescenza delle cavità è comune a tutte le leghe AlSi a causa del maggior tempo di permanenza in forno necessario per la produzione della schiuma stessa. Per quanto riguarda il secondo punto, la caratterizzazione meccanica delle schiume prodotte, è avvenuta mediante prove di compressione assiale. Dai risultati si evince come la resistenza meccanica aumenti all'aumentare della percentuale di silicio presente nella lega se la schiuma realizzata è di qualità, in termini di morfologia bolle, accettabile. Tutte le schiume realizzate in AlSi di qualità accettabile, ovvero quelle in AlSi6 e in AlSi8, sono risultate essere più resistenti rispetto a quelle in Al puro anche se di qualità morfologiche inferiore a quest'ultime. Un discorso analogo, ovvero aumento delle prestazioni all'aumentare del tenore di silicio, può essere fatto per l'energia assorbita durante la deformazione. Tale tendenza, ovvero l'aumento delle prestazioni con l'aumento del tenore di silicio, è stata confermata anche dalle prove di compressione radiale eseguite sulle schiume usate come riempitivo di tubi in AISI 316. È stato necessario eseguire la prova radialmente, in questo caso, in quanto la rigidità assiale dell'acciaio è di gran lunga superiore a quella delle schiume e quindi non sarebbe stato possibile cogliere l'effetto irrigidente. In tutti i casi l'aumento della resistenza meccanica viene pagato in termini di aumento di peso e l'incremento di peso sarà tanto maggiore quanto maggiore è il tenore di silicio presente. La maggiore densità delle schiume realizzate in lega AlSi rispetto a quelle in Al puro è ascrivibile sostanzialmente a due diversi fattori: minore crescita, a parità di dimensione del precursore, delle schiume in lega che si traduce in una minore presenza di vuoti all'interno della stessa; maggiore contenuto di agente stabilizzante il quale ha una densità molto maggiore rispetto ai costituenti della lega stessa. Un altro aspetto importante da sottolineare è il comportamento che hanno avuto le schiume AlSi durante la deformazione. Mentre le schiume in Al si sono deformate fino a diventare un sottile disco omogeneo, quelle realizzate in AlSi hanno avuto un problema di sfaldamento che non è riconducibile ad una non ottimale formazione della lega. Si è quindi supposto che l'azione combinata di concentrazione di tensione della porosità e delle particelle spigolose di stabilizzante, unite alla maggiore fragilità della lega, hanno determinato l'insorgere di cricche che portano allo sfaldamento delle schiume in lega durante il processo di deformazione. Tale effetto, anche se importante, non pregiudica tuttavia il possibile impiego delle schiume in lega come riempitivi in

quanto non sono stati osservati scorrimenti tra la schiuma e il tubo, almeno nelle prime fasi della deformazione, e ciò è indicativo di una buona interazione con le pareti interne del tubo.

5. RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano i Sigg. Piero Plini e Benedetto Iacovone per il supporto tecnico nella sperimentazione; l'ing. Francesco Brugnolo e Livio Longobardi, che con il loro lavoro di tesi hanno contribuito fattivamente alla ricerca oggetto di questo lavoro.

6. RIFERIMENTI

1. G. Dong, D. Wang, J. Zhang, S. Huang, "Side Structure Sensitivity to Passenger Car Crashworthiness During Pole Side Impact", *Tsinghua Science and Technology*, 12(3) (2007). 290-295
2. G. Lu and T. Yu, "Energy absorption of structures and materials", Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, (2003), 1-424
3. M. Yu, J. Banhart, "Mechanical properties of metal foams", in *Metal Foams*, Ed. J. Banhart and H. Eifert, Verlag MIT, Bremen (1998), 37-48
4. H. Yu, Z. Guo, Bing Li, G. Yao, H. Luo, Y. Liu, "Research into the effect of cell diameter of aluminium foam on its compressive and energy absorption properties", *Material Science and Engineering A*, 454-455 (2007), 542-546
5. F. Campana, D. Pillone, "Effect of wall microstructure and morphometric parameters on the crush behaviour of Al alloy foams", *Materials Science and Engineering A*, 479 (2008), 58-64
6. Yang An, Cui'e Wen, Peter D. Hodgson, Chunhui Yang, "Investigation of cell shape effect on the mechanical behaviour of open-cell metal foams", *Computational Science*, 55 (2012), 1-9
7. G. Costanza, M.E. Tata, "Dynamic and static compressive behaviour of aluminium foam", Proceedings of the 4th International Structural Engineering and Construction Conference, ISEC-4 - Innovations in Structural Engineering and Construction, Vol. 2 (2008) 919-922
8. G. Costanza, F. Mantineo, S. Missori, A. Sili, M.E. Tata, "Characterization of the compressive behaviour of an Al foam by X-ray computerized tomography", TMS 2012 - 141st Annual Meeting & Exhibition, March 11-15 2012, Orlando FL, Light Metals 2012, Edited by Carlos E. Suarez, John Wiley & Sons, pp. 533-536
9. H.W. Song, Q.J. He, J.J. Xie, A. Tobota, "Fracture mechanisms and size effects of brittle metallic foams: in situ compression test inside SEM", *Composites Science and Technology*, 68 (2008), 2441-2450
10. Y. Mu, G. Yao, L. Liang, H. Luo, G. Zu, "Deformation mechanisms of closed-cell aluminium foam in compression", *Scripta Materialia*, 63 (2010), 629-632
11. G. Costanza, R. Montanari, M.E. Tata, "Optimisation of TiH₂ and SiC content in Al foams", *La Metallurgia Italiana*, Vol. 97 n. 6 (2005), 41-47.
12. G. Costanza, M. E. Tata, Recycling of exhaust batteries in lead-foam electrodes, in REWAS 2013 Enabling Materials Resource Sustainability, Ed. Anne Kvithyld and Christina Meskers, ISBN 978-1-1186-0587-5, pp. 272-278.
13. M. Seitzberger, F.G. Rammerstorff, H.P. Degischer, R. Grading, "Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam", *Acta Mechanica*, 125 (1997), 93-105.
14. Makoto Kobashi, Ryosuke Sato, Naoyuki Kanetake, "Foaming and filling-in behavior of porous aluminum in hollow components", *Materials Transactions*, V. 47, No 9 (2006), 2178-2182.
15. Y. An, Cui'e Wen, P. Hodgson, C. Yang "Impact response and energy absorption of aluminum foam-filled tubes"; *Applied Mechanics and Materials*, V. 152-154 (2012), 436-439
16. Wenyi Yan, Emilien Durif, Yasuo Yamada, Cui'e Wen, "Crushing simulation of foam-filled aluminium tubes", *Materials Transactions*, V. 48, No. 7 (2007), 1901-1906.

- 17 H.R. Zarei, M. Kröger, “Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application”, *Thin-Walled Structures*, 46 (2008) 214–221
- 18 L. Bonaccorsi, E. Proverbio, N. Raffaele. “Effect of the interface bonding on the mechanical response of aluminium foam reinforced steel tubes”, *J. Mater. Sci.*, 45 (2010), 1514-1522
- 19 N. Michailidis, F. Stergioudi, H. Omar, D.N. Tsipas, “An image-based reconstruction of the 3D geometry of an Al open-cell foam and FEM modeling of the material response”, *Mechanics of Materials*, 42 (2010), 142-147
- 20 G. Costanza, F. Mantineo, A. Sili, M.E. Tata, “Characterization of Cu tube filled with Al alloy foam by means of X-ray computer tomography”, TMS2014 - 143rd Annual Meeting Supplemental Proceedings, San Diego, California (USA), February 16-20, 2014
- 21 J. Banhart, J. Baumeister, M. Weber, *Proc. of the European Conference on Advanced PM Materials*, Birmingham, (1995), p.201
- 22 G. Costanza. G. Gusmano, R. Montanari, M.E. Tata, N. Ucciardello, “Effect of powder mix composition on Al foam morphology”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 222 (2008), 131-140.
- 23 G. Costanza, M.E. Tata, “Metal foams: Recent experimental results and further developments”, *Metallurgia Italiana*, Vol. 103 n. 3 (2011), 3-7.
- 24 C. Park, S. R. Nutt, “Effect of process parameters on steel foam synthesis”, *Materials Science and Engineering*, A297 (2001), 62-68
- 25 J. Banhart, F. Baumgärtner, S. Cox, B. Kronberg, D. Langevin, S. Odenbach, D. Weaire, T. Wübben, “Development of advanced foams under microgravity”, *1st International Symposium on Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology*, 10-15 September 2000, Sorrento, Italy - Proceedings, ESTEC/ESA Publishing Division, Noordwijk, ESA Special Publications SP-454, (2000), 589–596
- 26 G. Costanza, G. Gusmano, R. Montanari, M.E. Tata, “Metodi di produzione e applicazioni delle schiume metalliche”, *Metallurgia Italiana*, Vol. 95 Issue 2 (2003) 31-35.
- 27 P. Jonsén, H.-A. Häggblad, “Fracture energy based constitutive models for tensile fracture of metal powder compacts”, *International Journal of Solids and Structures*, 44 (2007), 6398–6411
- 28 Proveti, J. and Michot, G., 2006, The Brazilian test: a tool for measuring the toughness of a material and its brittle to ductile transition. *Int. J. Fracture*, 139 455-460.
- 29 Ye Jianhong, F.Q. Wu, J.Z. Sun, “Estimation of the tensile elastic modulus using Brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46 (2009) 568–576