

Comportamento meccanico delle schiume di Al

In questo lavoro si analizza il comportamento meccanico delle schiume di Al stabilizzate con ossido di zinco e polveri di grafite. Le schiume sono prodotte in stampo a 12 t su stampo in forno a 700 °C. Successivamente, le schiume sono sottoposte a compressione in dotto. La curva di compressione è caratterizzata da una fase di traversa di compressione a temperatura ambiente 25 °C. Le schiume sono elastiche e deformabili. La formazione delle schiume avviene a parità di condizioni di compressione. La resistenza a compressione è

PAROLE CHIAVE : COMPORTAMENTO MECCANICO, SCHIUME DI AL, COMPRESIONE, TEMPERATURA ELEVATA

Le schiume di Al sono utilizzate in molti settori industriali. Le schiume di Al sono prodotte in stampo a 12 t su stampo in forno a 700 °C. Successivamente, le schiume sono sottoposte a compressione in dotto. La curva di compressione è caratterizzata da una fase di traversa di compressione a temperatura ambiente 25 °C. Le schiume sono elastiche e deformabili. La formazione delle schiume avviene a parità di condizioni di compressione. La resistenza a compressione è

Girolamo Costanza, Maria Elisa Tata

Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Università di Roma Tor Vergata, Roma, Italia

impiegate quelle a porosità aperta [16]. Al giorno d'oggi vengono prodotte schiume di diversi metalli e leghe: Al [17], Ti [18], Cu [19], Pb [20-21], Fe [8], superleghe [22]. I campi di applicazione sono svariati e spaziano dall'automobilistico all'aeronautico, dall'aerospazio alle strutture off-shore, dall'ingegneria civile al settore biomedicale, dalla ltrazione agli scambiatori di calore.

Vari metodi sono stati messi a punto per la produzione di schiume metalliche, ciascuno con diverse peculiarità e caratteristiche delle schiume prodotte. Di seguito elenchiamo i principali: decomposizione di agenti schiumanti nel fuso, iniezione di gas nel fuso, metodo delle polveri compattate, replica di una matrice polimerica, impiego di space-holder e in ne sinterizzazione di sfere cave. Le schiume analizzate in questo lavoro sono state prodotte in laboratorio secondo il metodo delle polveri compattate. La tecnica prevede il mescolamento di polveri del metallo da schiumare (p.e.

Al) con polveri di un opportuno agente stabilizzante (SiC) e di un agente schiumante (p.e. TiH_2) in grado di liberare gas (H_2 nella fattispecie) ad una temperatura inferiore a quella di fusione del metallo. La miscela di polveri così ottenuta viene pressata in apposito stampo in acciaio no ad ottenere un precursore maneggiabile. Quest'ultimo a sua volta è inserito in un crogiolo di rame e posto ad una temperatura superiore a quella di fusione del metallo. Nel caso di Al la temperatura del forno è impostata a 700 °C. Il precursore inserito nel crogiolo arriva a fusione ed il rilascio di H_2 , che inizia intorno ai 400 °C, fa sì che la schiuma possa espandersi. Una volta raggiunta la massima crescita della schiuma si estrae il crogiolo dal forno e lo si immerge in acqua così da mantenere la struttura porosa a temperatura ambiente. Una volta estratta dal crogiolo si ottiene una schiuma a porosità chiusa esternamente rivestita da un sottile strato di Al.

MATERIALI E TECNICHE SPERIMENTALI

La produzione delle schiume metalliche è stata realizzata secondo il metodo delle polveri compattate già descritto in precedenti lavori [2, 3]. Si tratta di una tecnica semplice e molto diffusa per la produzione di schiume metalliche risultando al tempo stesso versatile nella produzione di oggetti di svariate geometrie, anche complesse. Per contro la tecnica presenta anche degli svantaggi, sostanzialmente legati al maggior costo delle polveri oltre che dei macchinari necessari per la lavorazione. Partendo da risultati conseguiti nei precedenti lavori [23] si è deciso di focalizzare l'attenzione sulla composizione di TiH_2 e SiC che ha consentito di raggiungere un buon compromesso tra stabilità, grandezza e morfologia delle porosità, ossia 0,4 % TiH_2 e 2,8 % SiC. In linea di principio proprietà meccaniche ottimali si ottengono quando i pori sono sferici, di piccole dimensioni e uniformemente distribuiti. Queste ultime caratteristiche risultano profondamente dipendenti dalla scelta della composizione delle polveri di partenza oltre che dalla temperatura del forno (individuata in 700 °C e mantenuta costante per tutte le schiume prodotte) e dal tempo di mantenimento in forno per la schiumatura, generalmente compreso tra sei e sette minuti. Quest'ultimo parametro non è univocamente determinabile a priori; l'estrazione della schiuma dal forno viene di volta in volta effettuata al termine della sua fase di crescita. La scelta del tempo di mantenimento in forno della schiuma costituisce una delle fasi più delicate del processo. La formazione del-

le porosità dipende da moltissimi fattori dovuti a fenomeni fisici quali nucleazione, crescita, coalescenza dei pori, distribuzione delle particelle nel fuso etc. E' importante lasciare alla schiuma il tempo necessario per far liberare l'istrada per la distribuzione di H_2 e TiH_2 e SiC in un crogiolo di rame.

Tutte le sch
re della cur
primo tratto
a tensione c
scente al ter
to della curv

DISCUSSIONE

Gli andamenti delle tensioni di plateau medie e del modulo di Young al variare della temperatura sono riportate in Fig. 4. Come è possibile notare gli scostamenti rilevati tra le due ripetizioni sono limitati, contenuti al massimo entro il 15%. La tensione di plateau media, identica praticamente come il valore medio tra la tensione di snervamento ed il valore di tensione di fine plateau, mostra un leggero aumento passando da temperatura ambiente a 100 °C, mentre per temperature superiori il trend è decrescente. L'anomalia risulta evidente anche dalla curva P-B in blu relativa ad una prova a 100 °C nella quale la schiuma appare maggiormente resistente rispetto alla schiuma testata a 25 °C. Nella fattispecie si tratta di un artefatto legato alla differente altezza della schiuma prima della compressione ed alla normalizzazione rispetto a questa grandezza per la determinazione della deformazione. Il modulo di Young non risente di tale effetto pertanto esso risulta monotonamente decrescente

con l'aumentare della temperatura di prova.

Si nota altresì che la diminuzione delle grandezze considerate risulta maggiormente marcata nel passaggio da 200 a 300 °C. Anche la deformazione massima risulta crescente all'aumentare della temperatura di prova, comportamento che si spiega con la diminuzione generalizzata delle curve P-B all'aumentare della temperatura. Invece l'energia di deformazione (Fig. 5) subisce un modesto incremento seguito da un decremento all'aumentare della temperatura dovuto al fatto che le due componenti che la determinano (P e B) hanno trend opposti all'aumentare della temperatura oltre che, per quanto già illustrato, relativamente alla tensione di plateau media. Nel complesso se da un lato il plateau diventa più esteso ed aumentano le deformazioni (per via dell'aumento di duttilità dovuto alle più alte temperature), per contro le tensioni diminuiscono. Il confronto tra le principali grandezze analizzate è riportato in Tab. 1.

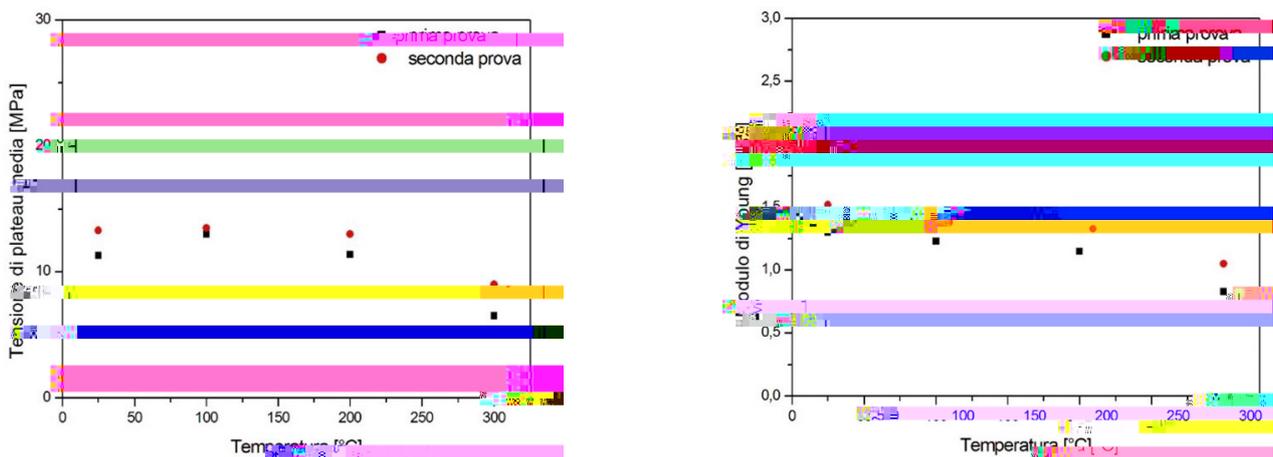


Fig.4 - A sinistra Tensione di Plateau media vs. temperatura. A destra modulo di Young vs. temperatura. Confronto tra due ripetizioni. / Left Average plateau stress vs. temperature. Right Young modulus vs. temperature.

Comparison between two runs.

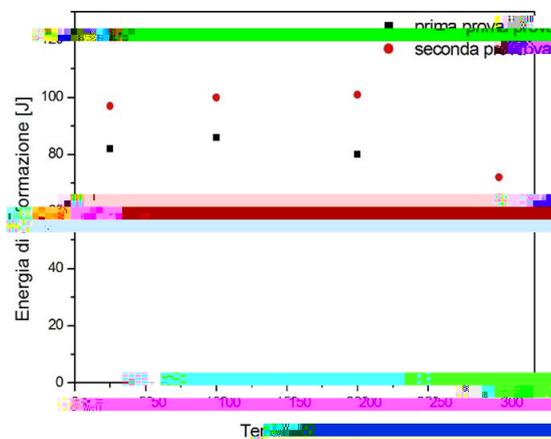


Fig.5 - Andamento energia di deformazione (J) vs. temperatura (°C), confronto tra due ripetizioni / Deformation energy (J) vs. temperature (°C), comparison between two runs.

Densità relativa (ρ/ρ_0)	T di test (°C)	Modulo di Young (MPa)	Tensione media plateau (MPa)	Energia specifica assorbita (J/cm ³)
---------------------------------------	-------------------	--------------------------	------------------------------------	--

Le schiume
 lulari, presen
 plateau a ba
 oltre il 50% d
 sione in cor
 perature no
 Qualitativam
 è simile a
 presenta un
 au a sforzo
 mento dello
 le porosità
 Tuttavia il m
 teau, l'esten
 cazione nal
 della temper
 tratto lineare
 rileva a temp
 au la diminu
 che tale dec
 quello dello
 di base mas
 rature di pro
 quello a tem

BIBLIOGRAFIA

- [1] Banhart J, Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Prog Mater Sci.* 2001; 46(6): 559-632. doi: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5
- [2] Costanza G, Gusmano G, Montanari R, Tata ME, Manufacturing routes and applications of metal foams. *Metall Ital.* 2003; 95(2): 31-35.
- [3] Costanza G, Tata ME, Metal foams: recent experimental results and further developments. *Metall Ital.* 2011; 103(3): 3-7.
- [4] Costanza G, Mantineo F, Missori S, Sili A, Tata ME, Characterization of the compressive behaviour of an Al foam by X-Ray computerized tomography. *TMS Light Metals* 2012; 533-536.
- [5] Calmadi VV, Mahajan RL, The effective thermal conductivity of high porosity porous metal foams. *J Heat Trans T Asme.* 1999; 121(2): 466-471. doi:10.1115/1.2826001
- [6] Xia X, Zhang Z, Zhao WM, Li C, Ding J, Liu CX, Liu YC, Acoustic properties of closed cell aluminum foams with different macrostructures. 2017; 33(11): 1227-1234. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.07.012>
- [7] Costanza G, Tata ME, Dynamic and static behavior of aluminium foam. *Proc. 4th Int. Str Eng Constr Conf.* 2008; 2: 919-922.
- [8] Costanza G, Dodbiba G, Tata ME, Optimization of the process parameters for the manufacturing of open-cells iron foams with high energy absorption. *Procedia Struct Integrity.* 2016; 2: 2277-2282. doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.285
- [9] Costanza G, Tata ME, Parameters affecting energy absorption in metal foams. *Mater Sci. Forum.* 2018; 941: 1552-1557. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.1552
- [10] Brugnolo F, Costanza G, Tata ME, Manufacturing and characterization of AlSi foams as core materials, *Procedia Eng.* 2015; 109: 219-227. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.220
- [11] Costanza G, Sili A, Tata ME, Mechanical characterization of AISI 316 tubes filled with Al alloy foams. *Metall Ital.* 2015; 3(1): 9-14.
- [12] Lu TJ, Stone HA, Ashby MF, Heat transfer in open-cell metal foams. *Acta Mater.* 1998; 46(10): 3619-3635. doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00031-7
- [13] Banhart J, Baumeister J, Weber M, Damping properties of aluminium foams. *Mater Sci Eng A.* 1995; 1-2: 221-228. doi.org/10.1016/0921-5093(95)09973-5
- [14] Ashby MF, Medalist RFM, The mechanical properties of cellular solids, *Metall Trans A.* 1983; 14(9): 1755-1769. <https://doi.org/10.1007/BF02645546>
- [15] Costanza G, Tata ME, Mechanical behavior of PCMT and SDP Al foams: a comparison. *Procedia Struct Integrity.* 2020; 25: 55-62. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.04.009
- [16] Costanza G, Tata ME, Trillicoso G, Al foams manufactured by PLA replication and sacrificial. *Int J Light Mater Man.* 2021; 4(1): 62-66. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2020.07.001
- [17] Costanza G, Montanari R, Tata ME, Optimization of TiH₂ and SiC content in Al foams, *Metall Ital.* 2005; 97(6): 41-47.
- [18] Xie B, Fan YZ, Mu TZ, Deng B, Fabrication and energy absorption properties of titanium foam with CaCl₂ as a space holder. *Mat Sci Eng A.* 2017; 708: 419-423. doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.123
- [19] Liu Y, Zhou W, Lin Y, Chen L, Chu X, Zheng T, Wan S, Novel copper foam with ordered hole arrays as catalyst support for methanol steam reforming microreactor. *Appl Energy.* 2019; 246: 24-37. doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.199
- [20] Costanza G, Tata ME, Recycling of exhaust batteries in lead-foam electrodes. *TMS Annual Meeting, 2013:* 272-2780. doi: 10.1007/978-3-319-48763-2_28
- [21] Costanza G, Tata ME, Lead and lead alloys foams production. *Acta Metall. Slovaca.* 2018; 24(4): 347-352. DOI: 10.12776/ams.v24i4.1193
- [22] Choe H, Dunand DC, Synthesis, structure and mechanical properties of Ni-Al and Ni-Cr-Al superalloy foams. *Acta Mater.* 2004; 52: 1283-1295. doi:10.1016/j.actamat.2003.11.012
- [23] Costanza G, Gusmano G, Montanari R, Tata ME, Ucciardello N, Effect of powder mix composition on Al foam morphology. *Proc Inst Mech Eng L.* 2008; 222(2): 131-140. doi: 10.1243/14644207JMDA143

Hig

This work d
factured wit
(TiH₂). Foar
inside a mo
ted inside th
the crucible
characteriza
stant cross
and 300 °C
Young mod
reduction of
curve. Cons
corresponde
compressiv

KEYWORDS: MECHANICAL BEHAVIOUR, AL FOAMS, COMPRESSION, HIGH TEMPERATURE