

Comportamento a compressione a temperatura elevata di schiume di Al a porosità chiusa

a cura di: Girolamo Costanza, Maria Elisa Tata

In questo lavoro si analizza il comportamento a compressione di schiume di Al a porosità chiusa a temperatura elevata. Le schiume di alluminio sono state prodotte con il metodo delle polveri compattate miscelando polveri di Al, agente stabilizzante (SiC) e agente schiumante (TiH_2). Da precedenti lavori è stata identificata la composizione ottimale delle polveri di partenza: 0.4 % in peso di TiH_2 e 2.8 % in peso di SiC. Per mezzo della compattazione in pressa, applicando 12 t su stampo di 16 mm diametro, sono stati realizzati precursori cilindrici. Questi ultimi a loro volta sono stati inseriti in forno a 700 °C all'interno di apposito crogiolo di rame il tempo necessario affinché la schiuma potesse espandersi. Il successivo raffreddamento in acqua ha consentito di mantenere a temperatura ambiente la struttura porosa così prodotta. La caratterizzazione meccanica è stata eseguita in macchina di trazione/compressione MTS con velocità della traversa di 2 mm/min e fino ad un carico limite imposto di 35 kN. In camera termostatica le temperature di test sono state 25 °C, 100 °C, 200 °C e 300 °C. All'aumentare della temperatura di prova si è evidenziata una riduzione del limite elastico e del modulo di Young, una diminuzione del carico di plateau e più in generale dell'intera curva stress-deformazione. Di conseguenza anche l'energia assorbita si riduce considerevolmente. Al tempo stesso è stata rilevata, a parità di carico applicato, una maggiore deformazione al crescere della temperatura. E' possibile concludere che sia la resistenza a compressione che la capacità di assorbimento di energia diminuiscono al crescere della temperatura.

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

Le schiume metalliche sono materiali cellulari che presentano al loro interno porosità di opportune forme e dimensioni [1-4]. Questa caratteristica consente alle schiume di avere importanti proprietà quali elevata conduttività termica [5], assorbimento acustico [6], assorbimento di energia [7-9] anche sotto forma di riempitivi [10-11], isolamento termico [12] e capacità di smorzamento vibrazioni [13]. Sotto il profilo puramente morfologico le porosità nelle schiume metalliche possono essere a celle aperte oppure a celle chiuse, a seconda che siano, rispettivamente, interconnesse tra di loro o meno. Da un punto di vista tecnologico differenti metodi di produzione danno luogo a diverse morfologie delle porosità e, di conseguenza, diverse proprietà [14] oltre che campi di applicazione. Un'altra possibile classificazione riguarda le diverse tipologie di applicazioni: strutturali e funzionali. Nelle prime sono identificabili schiume metalliche a porosità chiusa in quanto presentano maggiore resistenza meccanica e capacità di assorbimento di energia [15]. Per le applicazioni funzionali generalmente vengono

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 filtrazione 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 infine 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 fino 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. È importante lasciare alla schiuma il tempo necessario per far liberare l'idrogeno e per farlo distribuire omogeneamente all'interno del campione. Le schiume ottenute con il procedimento sopra descritto presentano un'altezza circa tripla rispetto al campione di partenza e superfici esterne regolari. Una panoramica delle diverse schiume a porosità chiusa prodotte, così come estratte dal crogiolo, è mostrata in Fig. 1. In questo lavoro l'attenzione si è concentrata sul comportamento a compressione di schiume di Al eseguendo prove a step crescenti di temperatura fino a 300 °C in relazione ai possibili campi di impiego, primo fra tutti quello antincendio. Prima di procedere con la compressione è stato necessario, mediante l'utilizzo di una troncatrice, lavorare i campioni fino ad ottenere cilindri con facce piane e parallele alle superfici dei piatti della macchina di compressione (Fig. 2). I campioni così ottenuti sono stati sottoposti a compressione in condizioni quasi statiche (velocità della traversa imposta a 2 mm/min). Le temperature di test imposte, mediante l'utilizzo di una camera termostatica, sono state 25 °C, 100 °C, 200 °C e 300 °C. Ciascun campione è stato condizionato per 10 minuti alla temperatura di prova impostata nella camera termostatica. Inoltre sono state effettuate prove ripetute per ogni temperatura al fine di verificarne la ripetibilità.



Fig.1 - Esempi di alcune schiume di Al / Examples of Al foams.



Fig.2 - Esempi di alcune schiume di Al da sottoporre a prova di compressione /
Examples of Al foams for the compression test.

RISULTATI

Tutte le schiume testate hanno mostrato un trend simile della curva tensione-deformazione caratterizzato da un primo tratto lineare seguito da un tratto più o meno esteso a tensione circa costante (plateau) o moderatamente crescente al termine del quale si evidenzia un rapido incremento della curva di carico. In quest'ultimo tratto della curva si verifica la densificazione finale e la schiuma non è più in grado di subire deformazioni essendo quasi completamente addensata. Tutte le prove (run 1 e run 2) sono state eseguite fino ad un carico limite di 35 kN. Le schiume di Al della composizione analizzata hanno mostrato proprietà ottimali in

termini di resistenza a compressione come di ripetibilità dei risultati (Fig. 3). Il decremento delle proprietà meccaniche risulta abbastanza contenuto al crescere della temperatura di prova fino a 200 °C mentre nelle prove eseguite a 300 °C il decremento risulta decisamente più marcato, in particolare modo per quanto riguarda la tensione di plateau. Da un punto di vista ingegneristico sono state identificate alcune caratteristiche meccaniche delle schiume in questione ed analizzato il comportamento al variare delle temperature di prova: limite del tratto lineare, modulo di Young, tensione di plateau ed energia assorbita durante la deformazione.

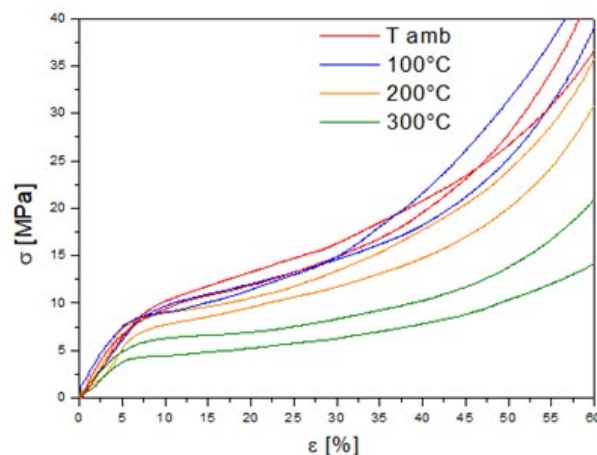


Fig.3 - Comportamento a compressione σ - ϵ di schiume di Al a T 25 °C, 100 °C, 200 °C e 300 °C /
Compressive behavior σ - ϵ of Al foams at T 25 °C, 100 °C, 200 °C e 300 °C.

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, identificata graficamente 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 σ - ϵ 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 σ - ϵ all'aumentare della temperatura. Infine l'energia di deformazione (Fig. 5) subisce un modesto incremento seguito da un decremento all'aumentare della temperatura dovuti al fatto che le due componenti che la determinano (σ e ϵ) 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.

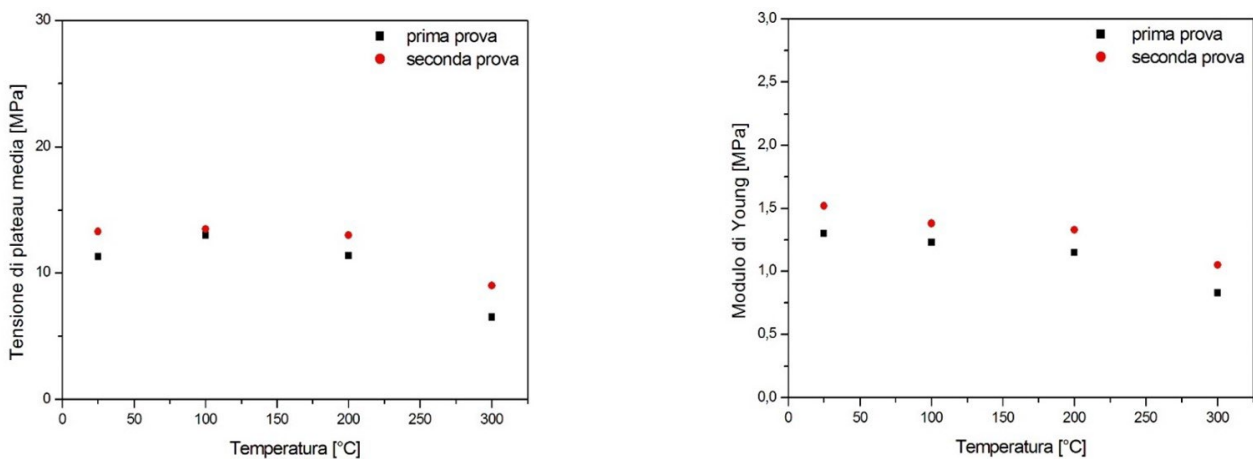


Fig.4 - A sinistra Tensione di Plateau media vs. temperatura. A destra modulo di Young vs. temperatura. Confronto tra due ripetizioni. / Left Average plateau stress vs. temperature. Right Young modulus vs. temperature. Comparison between two runs.

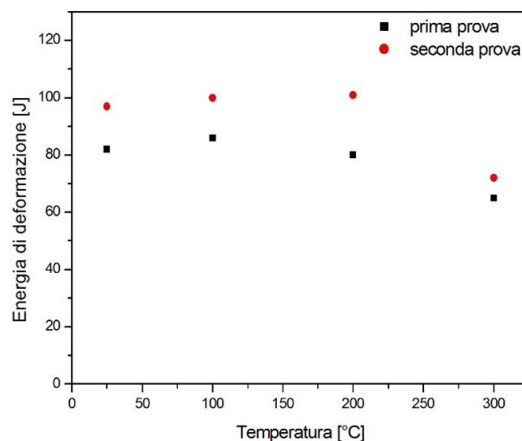


Fig.5 - Andamento energia di deformazione (J) vs. temperatura (°C), confronto tra due ripetizioni / Deformation energy (J) vs. temperature (°C), comparison between two runs.

Tab.1 - Confronto tra le principali grandezze considerate in funzione della temperatura di prova. /
Comparison between the main mechanical features at different test temperatures.

Densità relativa (ρ/ρ_0)	T di test (°C)	Modulo di Young (MPa)	Tensione media plateau (MPa)	Energia specifica assorbita (J/cm ³)
0,33	25	1,52	11,2	30,0
0,33	25	1,30	13,3	32,4
0,37	100	1,22	12,9	30,2
0,34	100	1,37	13,4	33,5
0,36	200	1,14	11,2	29,1
0,35	200	1,32	13,1	32,9
0,34	300	0,86	6,6	27,8
0,36	300	1,03	8,9	28,5

CONCLUSIONI

Le schiume metalliche, come la gran parte dei materiali cellulari, presentano, se sottoposti a compressione, un ampio plateau a basso livello di sollecitazione che si estende anche oltre il 50% di deformazione. Il comportamento a compressione in condizioni quasi-statiche di schiume di Al a temperature fino a 300 °C è stato analizzato in questo lavoro. Qualitativamente il trend delle curve ad elevata temperatura è simile a quello mostrato a temperatura ambiente, ossia presenta un primo tratto lineare seguito da un ampio plateau a sforzo relativamente basso ed infine un rapido incremento dello stress dovuto all'addensamento finale quando le porosità sono ormai quasi completamente collassate. Tuttavia il massimo valore del tratto lineare, lo stress di plateau, l'estensione del plateau e la deformazione di densificazione finale subiscono significative variazioni al crescere della temperatura. Nei test eseguiti a 300 °C il termine del tratto lineare della schiuma è circa un terzo di quello che si rileva a temperatura ambiente mentre per lo stress di plateau la diminuzione è ancora maggiore. E' interessante notare che tale decremento risulta decisamente più consistente di quello dello sforzo di snervamento a trazione del materiale di base massivo (Al) nel confronto alle medesime temperature di prova, attestandosi questo valore a circa il 50% di quello a temperatura ambiente.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano i Sig. Benedetto Iacovone e Piero Plini per l'assistenza fornita nella preparazione delle polveri e realizzazione delle schiume.

Al crescere della temperatura la tensione media di plateau diminuisce mentre l'estensione del plateau aumenta. Conseguentemente anche la deformazione di inizio densificazione si sposta verso valori maggiori. Ciò è dovuto da un lato al fenomeno del softening e dall'altro dal minore effetto dell'incrudimento che avviene nel campo di deformazione plastica, tanto maggiore quanto più elevata è la temperatura. La deformazione ad alta temperatura comporta una maggiore compattazione delle porosità causato dal softening del materiale e dal decremento del modulo di Young. La somma di tutti questi effetti modifica globalmente la curva sforzo-deformazione, con un impatto di tali fenomeni che risulta sempre più marcato al crescere della temperatura (da 25 a 300 °C). L'effetto combinato della diminuzione dello stress e dell'aumento della deformazione sull'energia assorbita ne determina un trend moderatamente decrescente per l'energia assorbita assoluta, osservabile anche dalle curve σ - ϵ di Fig. 3. Normalizzando l'energia assorbita nella deformazione rispetto al volume iniziale della schiuma si riscontra un effetto decisamente meno marcato dell'aumento di temperatura. L'energia specifica assorbita (J/cm³), infatti, risulta sostanzialmente costante (da 25 a 100 °C) e poi moderatamente decrescente (range di temperature 200-300 °C).

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 fibrous 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 AlSi 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 sacrifice. *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: 10.1243/1464420JMDA143

High temperature compressive behavior of closed-cell Al foams

This work deals with the compressive behavior of closed-cell Al foams at high temperature. Al foams have been manufactured with the powder compacted method, mixing together powders of Al, stabilizing agent (SiC) and blowing agent (TiH_2). Foams containing 0.4 wt% TiH_2 and 2.8 wt% SiC have been manufactured. By pressing (12 t) the mixed powders inside a mold, cylindrical precursors (diameter 16 mm) have been obtained. After that, each precursor has been inserted inside the oven at 700 °C in a suitable copper crucible for the time required for liquid foam expansion. Successively the crucible has been water quenched in order to obtain such a porous structure at ambient temperature. Mechanical characterization of the manufactured foams has been performed in compression employing a MTS machine at constant crosshead speed (2 mm/min) up to the maximum load of 35 kN. In thermostatic chamber 25 °C, 100 °C, 200 °C and 300 °C have been selected for mechanical testing. For the different temperatures relative density, elastic limit, Young modulus, plateau stress and specific absorbed energy have been compared. At increasing test temperature the reduction of the elastic limit and Young modulus has been evidenced as well plateau stress and the whole stress-strain curve. Consequently also the absorbed energy has been considerably reduced. At the same time it has been found, in correspondence of the same applied load, a greater deformation at increasing temperatures. It can be concluded that compressive behavior and energy absorption decrease as temperature increases.

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