

## Schiume metalliche: recenti risultati e sviluppi futuri

G. Costanza, M.E. Tata

*In questa rassegna vengono presentati e discussi i risultati degli studi condotti dagli autori negli ultimi anni riguardo la produzione e caratterizzazione di materiali metallici porosi. Dopo le prime esperienze nella produzione di schiume di Al a porosità chiusa, partendo da polveri e con l'aggiunta di  $TiH_2$  come agente soffiante, si è passati alla produzione di schiume di diversi metalli a porosità aperta mediante la tecnica "SDP" (sintering and dissolution process) modificata. Un'altra via percorsa per la produzione di schiume a basso costo è la cosiddetta "RP" (replication process), anch'essa sottoposta ad alcune varianti rispetto alla tecnica classica a seconda del metallo o della lega che si intende schiumare. Un importante aspetto di questo filone di ricerca ha riguardato la produzione di schiume partendo da materiale di riciclo, truciolo tal quale per quanto riguarda Al e sue leghe, griglie e pasta recuperate da batterie esauste per le schiume di piombo. Questa rappresenta un'interessante prospettiva, anche sotto il profilo energetico e ambientale, per la conversione diretta del materiale, prodotto di scarto di lavorazioni, in schiume di Al e Pb rispettivamente. Vengono quindi presentati i risultati sperimentali e le problematiche emerse durante il processo di ottenimento della schiuma utilizzando il materiale recuperato. Un ulteriore aspetto ha riguardato la produzione di schiume di Fe che combinano un buon mix tra proprietà meccaniche e requisiti di leggerezza. Infine l'ultimo punto della rassegna illustra i principali risultati della ricerca più recente che riguarda la produzione di elettrodi porosi realizzati in schiume di Pb. Una possibile applicazione potrebbe essere la realizzazione di lamierini in piombo da impiegare come elettrodi microporosi in accumulatori al piombo acido con l'obiettivo di ridurre il peso e migliorarne le prestazioni. Critico da questo punto di vista si presenta il problema del controllo della dimensione della porosità. A tale proposito alcune problematiche devono ancora essere superate e sono tuttora oggetto di sperimentazione. Per tutte le tipologie di schiume prodotte è stata effettuata una caratterizzazione morfologica e meccanica.*

### PAROLE CHIAVE:

Schiume metalliche, Materiali leggeri, Comportamento meccanico, Metallurgia delle polveri, Riciclaggio

### INTRODUZIONE

Le schiume metalliche abbinano peso ridotto con buona rigidità, resistenza meccanica, capacità di smorzamento delle vibrazioni e del rumore, resistenza agli shock e ridotta conducibilità termica. Oggi vengono prodotte schiume di numerosi metalli e leghe come: Al, Ti, Fe, Cu, Pb, superleghe etc. Le possibili applicazioni dipendono da numerosi parametri quali ad esempio il tipo di metallo, la porosità (aperta o chiusa), il processo con cui viene ottenuta la schiuma (temperatura, pressione, tempo di permanenza, fluidità del fuso ecc.), la densità e, non di minore importanza, i costi.

Nei settori automobilistico, aeronautico e aerospaziale, dove sono richiesti nuovi materiali per la realizzazione di strutture con un alto rapporto resistenza/peso, di grande interesse risultano essere le schiume di Al e sue leghe [1]. Esistono molti metodi per produrre le schiume metalliche [2-4], uno dei più utilizzati è quello delle polveri compattate, procedimento messo a punto presso l'Istituto Fraunhofer di Brema [4]. Il metodo di produzione con-

siste nel mescolare polveri metalliche con un materiale in grado di liberare gas (p.e. polveri di Al e idruro di Ti), pressare la miscela per ottenere un precursore compatto ed infine scaldare il tutto portando a fusione il metallo. L'agente soffiante viene scelto in modo che si decomponga ad una temperatura più bassa di quella di fusione del metallo, così che il gas rilasciato possa poi far espandere il fuso producendo la schiuma. Per favorire la crescita e la stabilità della schiuma allo stato liquido si aggiungono delle sostanze in grado di modificare i valori di tensione superficiale e di viscosità del fuso. Ad esempio, nel caso di Al o sue leghe, per aumentare la viscosità del liquido, si aggiungono additivi quali Ca metallico o polveri di  $Al_2O_3$  o SiC.

Una tecnica alternativa a quella delle polveri compattate con aggiunta di agente schiumante è quella del "sintering and dissolution process" (SDP) [5]. Essa consiste nel mescolare polvere del metallo base o della lega che si intende schiumare con un riempitivo (ad esempio urea o NaCl) che potrà essere successivamente rimosso facilmente per esempio mediante lavaggio in acqua lasciando al suo posto la porosità della morfologia e delle dimensioni del riempitivo utilizzato.

Una soluzione ancora più semplice ed economica che non si basa sull'utilizzo di polveri bensì impiega granuli o direttamente metallo fuso consiste nella cosiddetta "replication process" (RP) [6].

G. Costanza, M.E. Tata

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Roma  
Tor Vergata, Via del Politecnico 1, 00133 Roma (Italy)

In questo lavoro verranno presentati più avanti i risultati dell'impiego di questa tecnica per la produzione di schiume di Pb. L'obiettivo è quello di utilizzare non costose polveri bensì metallo massivo, meglio ancora se di scarto. Il processo base descritto in [6] per l'alluminio è stato convenientemente modificato stante le nuove condizioni sperimentali e il differente metallo base.

## TECNICHE SPERIMENTALI

### Polveri compattate

Nel caso del metodo delle polveri compattate ci sono molti parametri di processo critici, di cui si è discusso diffusamente in lavori precedenti [7-8], che entrano in gioco e condizionano la buona riuscita del prodotto finale. Fra i principali si ricordano: la composizione della miscela di polveri; la dimensione e forma delle particelle che la compongono; le modalità di mescolamento delle polveri; la pressione e la temperatura di compattazione della miscela; la temperatura del fuso durante il processo di formazione delle schiume; la velocità con cui questa temperatura è raggiunta; il tempo di permanenza alla temperatura di lavoro; l'atmosfera e la pressione sul fuso; la velocità di raffreddamento. Nel presente lavoro questa tecnica è stata applicata alla produzione di schiume di Al.

### SDP

La tecnica del "Sintering and Dissolution Process" impiega sempre polveri del metallo base ma non necessita di un agente soffiante per la realizzazione della schiuma. La scelta del riempitivo (urea o NaCl nei casi in esame) è dettata innanzitutto dalla facilità di rimozione, secondariamente si è tenuto conto del basso costo a confronto con altre possibili soluzioni. Prima della compattazione, polveri e riempitivo sono stati adeguatamente miscelati allo scopo di ottenere una uniforme distribuzione dei due componenti. Dopo il miscelamento si è eseguita la compattazione uniaassiale a freddo, applicando un carico massimo di 12 tonnellate tramite una pressa idraulica su una sezione del diametro di 15 mm. Ottenuto il precursore, il passo successivo è consistito nella sinterizzazione. In questo caso molti esperimenti sono stati ripetuti allo scopo di individuare il corretto abbinamento temperatura-tempo di sinterizzazione. Alla fine non rimane che immergere il pezzo in acqua calda (70 °C) allo scopo di rimuovere il riempitivo e lasciare al suo posto la porosità di tipo aperto. La tecnica SDP è stata applicata dagli autori per la produzione di schiume di Al, Fe e Pb.

### RP

La tecnica "Replication Process" è la più semplice ed economica tra quelle fin qui analizzate. In particolare ben si presta all'impiego nel caso di metalli basso fondenti. In questa rassegna è trattato il caso del Pb (o la lega di Pb) che viene portato a fusione direttamente all'interno di un crogiolo (di rame o di acciaio inox) inserito in forno o scaldato esternamente con l'applicazione di una fiamma. Il crogiolo è preventivamente riempito da una miscela di graniglia di Pb e di NaCl, riscaldato al di sopra della temperatura di fusione del Pb. Giunti a fusione del metallo base è stata applicata dall'alto una modesta pressione tramite un piccolo pistone. Questo espediente ha consentito, nella fase iniziale della sperimentazione, una migliore infiltrazione del fuso. Tuttavia una campagna sistematica di prove con l'infiltrazione a pressioni e temperature del fuso crescenti è tuttora in corso.

## RICICLO DI MATERIALE DI SCARTO (Al, Pb)

Un aspetto interessante, con numerose implicazioni economiche, energetiche ed ambientali riguarda la possibilità di ottenere schiume metalliche a partire da materiale da riciclare (scarti di produzione quali ad esempio trucioli di Al o materiale recuperato da

oggetti dismessi, p.e. Pb di batterie esauste). Nel 2003 oltre il 50% di tutto l'alluminio grezzo prodotto in Europa Occidentale derivava da materiale recuperato e riciclato, in Italia la percentuale arrivava al 75% e l'andamento è costantemente in crescita. Trovare nuove vie per trasformare materiale da riciclare è di grande importanza pertanto si è cercato di produrre schiume di alluminio partendo da scarti di lavorazioni meccaniche. In particolare sono state individuate le condizioni sperimentali utilizzate per ottenere una schiuma di alluminio a porosità chiusa sostituendo le polveri di Al con truciolo, prodotto di scarto di precedenti lavorazioni. Tra i differenti scarti di Al il truciolo è forse quello più difficilmente riutilizzabile secondo i metodi convenzionali. Ciò è dovuto principalmente al fatto che si trova sotto forma di lunghe spirali e di dimensioni ridotte in confronto agli altri tipi di scarti [9]. Inoltre la densità apparente è bassa e il rapporto superficie/volume è elevato oltre ad avere una grande quantità di ossidi. Infine la presenza di olio lubrificante non permette una rifusione immediata. Come conseguenza i metodi tradizionali di riciclo sono costosi, complessi e articolati in varie fasi. I principali problemi emersi durante la sperimentazione sono stati risolti (rimozione del lubrificante, triturazione e affinamento del truciolo di Al, innalzamento della pressione di compattazione del precursore rispetto alla pressione normalmente impiegata per la produzione a partire da polveri di Al) e sono state prodotte schiume aventi morfologia del tutto analoga a quelle ottenute con l'impiego di ben più costose polveri di Al [10].

Sul tema delle schiume di piombo si è partiti dalle esperienze compiute da Irretier et al. [11] nella produzione di schiume di Pb a partire da polveri e con aggiunta di agente soffiante (idruri e carbonati). Considerata la complessità del processo produttivo, si è deciso di cambiare strategia. Infatti per quanto riguarda lo studio sul riciclo del piombo da accumulatori al piombo acido esausti è stata effettuata una duplice sperimentazione. Da un lato si è analizzato l'impiego del materiale attivo di scarto normalmente impiegato per la produzione degli elettrodi, dall'altro si è analizzata la possibilità di reimpiegare solo le griglie in lega di Pb [12]. Con entrambi i materiali di recupero è stato possibile produrre delle schiume di Pb con la tecnica RP. La dimensione della porosità così ottenuta risulta ancora troppo elevata per cui gli elettrodi in schiuma di Pb attualmente prodotti non possono essere utilizzati in sostituzione di quelli ottenuti con il metodo classico della "griglia + materiale attivo" in quanto non reggono il confronto in termini di performance. Infatti ulteriori sforzi si concentreranno nella realizzazione di porosità di minori dimensioni, con pori di diametro del micron, risultato che sarà possibile ottenere selezionando accuratamente la tipologia di lega di Pb e la tecnica di produzione per infiltrazione [13]. La realizzazione di elettrodi microporosi consentirà un duplice vantaggio: da un lato un minor peso dell'accumulatore al Pb, dall'altro una maggiore capacità di accumulo di energia incrementando il rapporto superficie/volume andando a riempire molti degli spazi vuoti che con il metodo "griglia + materiale attivo" non sono sfruttati.

## MATERIALI

### Schiume di Al

I primi esperimenti hanno riguardato le schiume di alluminio prodotte a partire da polveri di Al 99.5% (diametro medio delle particelle 45 µm), TiH<sub>2</sub> (diametro medio 5 µm) e due tipi di SiC (diametro medio 37 µm e 60 µm). Sono state considerate diverse composizioni della miscela di polveri variando il contenuto di TiH<sub>2</sub> (0.1, 0.2, 0.4 e 0.6 % in peso) e di SiC (0.8, 2.8, 6 e 9 % in peso). Le diverse miscele di polveri sono state compattate applicando una pressione uniaassiale di 250 MPa a temperatura ambiente ottenendo precursori di forma cilindrica (diametro  $\phi$  = 15 mm, altezza h = 6 mm). Lo step successivo è stato inserire i precursore

ri, posti all'interno di un crogiolo cilindrico, in un forno a 700 °C per 180 s allo scopo di far crescere la schiuma. L'ultimo passo del processo è stato la tempra in acqua per fissare la struttura porosa. Le schiume così prodotte, a porosità chiuse, sono state oggetto di uno studio morfologico e meccanico tramite prove di compressione statica e impulsiva. Nelle prove di compressione statica, dalle curve sforzo-deformazione si sono ottenute informazioni circa la tensione di snervamento, la tensione di plateau (20 MPa massima), la deformazione (fino ad un massimo dell'80%), per una densità relativa ( $\rho/\rho_0$ ) che va da 0.20 a 0.40, e l'energia assorbita durante la prova in funzione della composizione della schiuma stessa. Il risultato principale è stato che le differenze nel comportamento sono dovute, principalmente, alla quantità di  $TiH_2$  utilizzato nella preparazione della schiuma. Soprattutto perché il contenuto di agente soffiante è direttamente correlabile alla densità della schiuma, in particolare all'aumento di  $TiH_2$  corrisponde una diminuzione di densità. Queste diversità nella composizione si riflettono sulla morfologia delle porosità, le cui caratteristiche sono direttamente correlate alla resistenza meccanica della schiuma. Oltre a prove di compressione statica sono state eseguite anche prove impulsive. Da queste ultime si sono ottenuti diagrammi di forza e accelerazione in funzione del tempo. Da questi dati, tramite un calcolo, sono stati trovati gli andamenti della deformazione e dell'assorbimento energetico. Anche in questo caso sono state trovate importanti correlazioni tra la microstruttura della schiuma ed il comportamento manifestato durante la prova. È stato determinato, infatti, che il collasso di bolle di dimensioni molto maggiori della media influisce negativamente sullo smorzamento dell'urto, riducendo l'assorbimento dell'energia. Pertanto, per avere delle schiume utilizzabili come assorbitori di urti, è necessario garantire la loro massima omogeneità microstrutturale. Le schiume caratterizzate dalla presenza in miscela dello 0.4% di idruro di titanio hanno, in particolare, presentato i maggiori valori dell'assorbimento dell'energia cinetica messa a disposizione durante l'urto, grazie a delle deformazioni molto elevate. Come esempio in fig.1 vengono mostrate le sezioni di una schiuma ottenuta con composizione: 2.8% SiC e 0.4%  $TiH_2$  sottoposta a prove di compressione a successivi step di deformazione imposta. Il processo delle polveri compattate è un processo costoso e di non facile controllabilità in termini di porosità prodotta. Si è quindi passati a produrre schiume di diversi metalli tramite il processo SDP, descritto nelle tecniche sperimentali. Dapprima sono state prodotte schiume di Al con porosità aperte modificando il processo SDP noto in letteratura [5]. In particolare si è utilizzata urea al posto di NaCl ed è stata posposta la fase di dissoluzione del riempitivo in acqua (100 °C, 30 min) dopo la fase di sinterizzazione (650 °C, 30 min). Questa ultima modifica si è resa necessaria in quanto l'urea durante la sinterizzazione evaporava inficiando la riuscita del prodotto finale. Un aspetto comune a tutte le schiume prodotte con SDP è la porosità aperta e controllabile in quanto dipendente solo dalla morfologia dell'agente riempitivo poiché non si passa per il fuso. La forza di compattazione necessaria per ottenere un buon precursore dopo il mescolamento delle polveri è risultata essere 10 t su un diametro del precursore di 15 mm. Inoltre si è dovuto aggiungere dell'acetone nella miscela per garantire un miglior mescolamento dovuto alla diversa densità dei componenti e alle diverse dimensioni (1 mm per urea e 40  $\mu m$  Al). Sono state usate inoltre diverse composizioni dal 20 al 55% in volume di urea e il resto polvere di Al per ottenere schiume a porosità aperta con diversa densità. Per le schiume realizzate mediante il processo SDP modificato i risultati delle prove di compressione statica sono confrontabili con quelli delle schiume prodotte con il metodo della fusione delle polveri compatte. All'aumentare del contenuto di urea diminuisce la densità della schiuma e le migliori proprietà come assorbitori di energia sono sta-



**FIG. 1** *Sezioni di una schiuma ottenuta con composizione: 2.8% SiC e 0.4%  $TiH_2$  sottoposta a prove di compressione a successivi step di deformazione imposta.*

*Cross section view of Al foam obtained with the composition: 2,8% SiC and 0,4%  $TiH_2$  subjected to compression tests at successive deformation steps.*

te esibite dalle schiume con un contenuto di urea di circa il 40-45%. Per questa tipologia di schiume le prestazioni sono però inferiori, cioè si arriva a una tensione di plateau di circa 10 MPa massima e una deformazione fino ad un massimo del 60%. La densità relativa ( $\rho/\rho_0$ ) spazia, con questi tenori di urea, da 0,25 a 0,40. Risulta infatti che schiume prodotte con metodo SDP presentino un valore di energia assorbita di circa 15 Joule, mentre le altre tipologie di schiume prodotte con il metodo delle polveri compattate superano anche i 100 Joule, e quindi che ci sia un ordine di grandezza di differenza. C'è anche da dire che le schiume prodotte con il metodo delle polveri compattate hanno morfologia chiusa e non mostrano esternamente la porosità in quanto la loro superficie cilindrica appare liscia e non porosa. A differenza delle schiume di Al prodotte con metodo SDP che sono porose all'interno e all'esterno, a porosità interconnessa e quindi intrinsecamente meno resistenti.

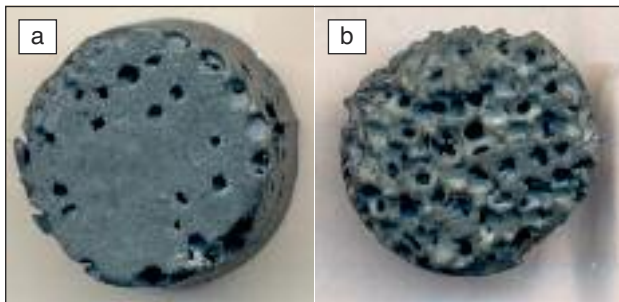
## Schiume di Fe

Un altro aspetto della ricerca ha riguardato la produzione di schiume di Fe. La polvere di metallo (diametro medio 70 $\mu m$ ) e il riempitivo urea (diametro medio 2 mm) ha subito lo stesso processo utilizzato per le polveri di Al con delle ulteriori modifiche nei parametri tempo e temperature della fase di sinterizzazione (950 °C per 30 minuti). La fase di mescolamento è stata più critica rispetto alle schiume di Al per la grande differenza di densità dei componenti. Dopo i primi tentativi si è deciso di aggiungere alla miscela una piccola quantità di acetone, allo scopo di favorire il processo di miscelazione delle polveri di ferro con quelle di urea. Le composizioni testate vanno dal 20 al 70 % di urea. Si è osservato come la schiuma 40-60, per esempio, presenti un valore di densità pari a 2.77 g/cm<sup>3</sup>, corrispondente ad una riduzione del 65% rispetto al ferro massivo. È un risultato interessante, viste anche le buone proprietà meccaniche verificate con la prova di



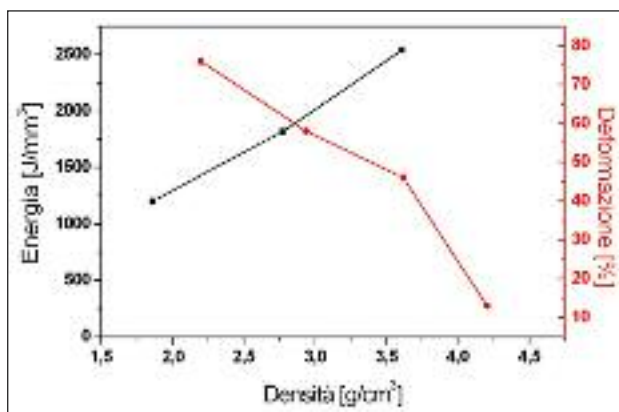
**FIG. 2** *Campione di schiuma di Al prodotto con metodo SDP (Al - 50% vol. urea).*

*Al foam sample manufactured by SDP method (Al - 50% vol. urea).*



**FIG. 3** Campioni di schiuma di Fe: a) 40%Fe-60% urea; b) 30%Fe-70% urea.

Samples of Fe foams: a) 40%Fe-60% vol. urea; b) 30%Fe-70% vol. urea.



**FIG. 4** Confronto tra energia specifica assorbita e deformazione in schiume di Fe.

Comparison between specific energy absorption and deformation in Fe foams.

compressione corrispondente ad una tensione di plateau pari a 27 MPa, per la schiuma 50-50 la tensione è pari a 72 MPa, con deformazioni massime dell'ordine del 60%. Le prove di compressione hanno messo in evidenza il risultato più importante del lavoro: l'ottima resistenza dei campioni e la capacità di assorbire una buona quantità di energia per unità di volume a fronte di accettabili valori di deformazione. Alcune immagini di schiume di Fe sono mostrate in fig. 3 mentre in fig. 4 è riportato l'andamento dell'energia specifica assorbita da schiume di ferro a confronto con la densità e la massima deformazione subita.

Le possibili applicazioni delle schiume di Fe sono numerose, dalla realizzazione di componenti per automobili fino allo sfruttamento della porosità a celle aperte per operazioni di filtraggio. Sostituire nelle automobili elementi oggi realizzati in acciaio con eventuali leghe di ferro sviluppabili in futuro potrebbe essere la giusta soluzione per una riduzione di peso e di costo, oltre che di consumi dell'auto. Schiume a maggiore porosità, invece, che presentano una scarsa resistenza a compressione, potrebbero essere utilizzate per operazioni di filtraggio.

## Schiume di Pb

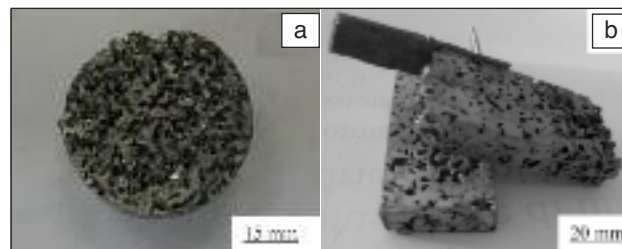
Un altro aspetto interessante della ricerca ha riguardato la produzione di schiume di Pb. Due tecniche sono state utilizzate per la produzione delle schiume: SDP (sintering and dissolution process) and RP (replication process). Gli obiettivi principali sono stati: ottenere una distribuzione omogenea delle porosità, una facile rimozione del riempitivo, possibilità di ottenere geometrie complesse. La tecnica SDP [5] è stata modificata utilizzando polveri

commerciali di Pb (200 mesh) e scarti derivanti da elettrodi di batterie al piombo esauste. L'agente riempitivo scelto è stato urea e NaCl per la facile dissoluzione di entrambi (in acqua a 70 °C), il basso costo e la facile reperibilità. Dopo il mescolamento della polvere con il riempitivo è stata effettuata la compattazione a freddo con un carico di 12 tonnellate su una sezione del diametro di 15 mm. Lo step successivo del processo è la sinterizzazione a 200-250°C e infine la dissoluzione del riempitivo in acqua calda (70 °C) [12-13]. La tecnica RP è stata utilizzata per poter impiegare materiali meno costosi delle polveri quali il Pb massivo e sue leghe. A partire dal processo noto in letteratura sono state portate a fusione particelle di Pb e sue leghe mescolate con NaCl in un piccolo crogiolo di Cu applicando una fiamma e una piccola pressione all'esterno dello stesso per rendere più facile l'infiltrazione del sale nel fuso [12]. In fig. 5 sono riportati: un campione di schiuma lega Pb-Sn 60-40 (a) e due elettrodi in schiuma di Pb (b) utilizzati per la produzione di una minicella di test. Questi ultimi hanno sezione rettangolare (13 mm X 27 mm, h 70mm) e sono stati impiegati per costruire una batteria sperimentale. I due elettrodi prodotti sono stati immersi in acido solforico al 31% e sottoposti a carica. Dopo quattro ore di carica (primo ciclo) il mini accumulatore presentava una tensione di 2,2 V. Una piccola lampada (3 W), impiegata per la scarica, è rimasta accesa per 30 minuti. Al momento si tratta quindi di una analisi qualitativa delle potenzialità del nuovo metodo di produzione. L'obiettivo è quello di realizzare elettrodi microporosi che possano sostituire quelli standard, consentendo un miglioramento delle prestazioni dell'accumulatore unitamente a una riduzione del suo peso.

## Produzione di schiume di Al a partire da truciolo di riciclo

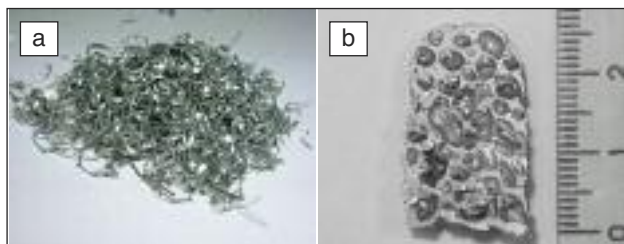
Per quanto riguarda la produzione di schiume di Al tramite truciolo di riciclo si è usato come materiale di partenza truciolo di Ergal [12]. Il truciolo aveva la classica forma mostrata in fig. 6 (sinistra), con spessore di circa 0.15 - 0.2 mm, lunghezza variabile e larghezza di 0.8 mm, ancora ricoperto dal lubrificante utilizzato in fase di tornitura. Per produrre schiume il truciolo viene sgrassato, triturato, mescolato agli agenti schiumanti e stabilizzanti, compattato, scaldato sopra il punto di fusione. In questa preparazione del precursore si presentano tuttavia alcuni problemi specifici rispetto al metodo classico con polveri. Il truciolo ha un rapporto superficie/volume inferiore a quello che presenta la stessa quantità di materiale in polvere quindi l'ossido superficiale è in quantità inferiore e dà un minor contributo alla stabilizzazione della schiuma. Le dimensioni sono molto differenti tra truciolo triturato e polveri di TiH<sub>2</sub> e SiC e ciò ne rende difficile il mescolamento omogeneo e la successiva buona compattazione del precursore.

Il truciolo è stato sgrassato per via chimica, ad esempio in bagno di tricloroetilene, poi è stato triturato ottenendo segmenti di lun-



**FIG. 5** In a) campione di schiuma lega Pb-Sn 60-40; in b) elettrodi in schiuma di Pb utilizzati per la produzione di una minicella di test.

Sample of Pb-Sn 60-40 alloy foam (a); Pb foam electrodes employed for the production of a test minicell (b).



**FIG. 6** Truciolo di ERGAL (a); schiuma prodotta con 80 % di truciolo e 20 % di polvere di Al (b).

*Ergal chips (a); foam produced with 80% chip and 20% Al powder (b).*

ghezza media di circa 2 mm. Per superare le difficoltà legate all'assenza di crescita della schiuma sono state effettuate diverse prove aggiungendo ai segmenti di truciolo triturato quantità variabili di polvere metallica fino ad una percentuale massima di 40% in peso. Si è reso necessario inoltre incrementare la pressione di compattazione fino a 400 MPa rispetto ai 250 MPa usati per miscele con solo polveri.

## CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Questo lavoro presenta il quadro dell'attività di ricerca sviluppata negli anni all'Università di Roma-Tor Vergata sulla produzione e caratterizzazione di schiume di alluminio Al, Fe e Pb. Sono state impiegate tecniche di produzione consolidate, come quella delle polveri compattate, e altre modificate ad hoc quali la "Sintering and Dissolution Process" e la "Replication Process". Le schiume di Al sono state dapprima prodotte con il metodo delle polveri e sono stati esaminati i parametri principali che influenzano la riuscita della schiuma stessa. L'impiego delle tecniche "SDP" ha consentito di svincolare la produzione della schiuma dall'impiego dell'agente soffiante in maniera da poter controllare accuratamente la dimensione e la morfologia della porosità scegliendo morfologia e dimensione del riempitivo impiegato. La tecnica "RP", accuratamente modificata, ha consentito di eliminare la fase di sintesi che richiede nuovamente la fusione del metallo base. Non si impiegano più polveri, quindi, bensì granuli di varie dimensioni o direttamente metallo fuso, magari partendo da materiale di scarto di altre lavorazioni o di recupero. Infatti un altro aspetto della ricerca ha riguardato la produzione di schiume partendo da materiale di riciclo, truciolo tal quale per quanto riguarda Al e sue leghe, griglie e pasta di riciclo da batterie esauste per le schiume di piombo. L'impiego del materiale di scarto è molto interessante, anche sotto il profilo energetico e ambientale, per la conversione diretta del materiale, prodotto di scarto di altre lavorazioni meccaniche, in schiume di Al e Pb rispettivamente. Una possibile applicazione potrebbe essere la realizzazione di lamierini in piombo da impiegare come elettrodi microporosi in accumulatori al piombo acido con l'obiettivo di ridurre il peso e migliorarne le prestazioni. Critico da questo punto di vista si presenta il problema del controllo della dimensione della porosità. A tale proposito alcuni nodi devono ancora essere sciolti e sono tuttora in corso ulteriori ricerche.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano i Sigg. Piero Plini e Benedetto Iacovone per l'assistenza tecnica fornita nelle prove sperimentali.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Costanza G., Gusmano G., Montanari R., Tata M.E., *La Metallurgia Italiana*, 2 (2003), p.31.
- [2] Banhart J., *Proc. of Fraunhofer USA Metal Foam Symposium*, Stanton Delaware (1997), p.3.

- [3] Banhart J., *Progress in Materials Science*, 46 (2001), p.559.
- [4] Banhart J., Baumeister J., Weber M., *Proc. of the European Conference on Advanced PM Materials*, Birmingham (1995), p.201.
- [5] Zhao Y.Y., Sun D.X., *Scripta Materialia*, 44 (2001), p.105.
- [6] San Marchi C., Mortensen A., *WILEY-VCH Handbook of cellular materials*, 2002, pp. 43-55.
- [7] G. Costanza, R. Montanari, M.E. Tata "Ottimizzazione del contenuto di TiH<sub>2</sub> e di SiC nelle schiume di Al" *La Metallurgia Italiana* 6 (2005) p.41-47.
- [8] G. Costanza, G. Gusmano, R. Montanari, M.E. Tata, N. Ucciarollo, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 222 n° 2 (2008) 131.
- [9] J.Z. Gronostajski, J.W. Kaczmar, H. Marciniak, A. Matuszak, J. Mater. Process. Technol. 64 (1997) 149.
- [10] Costanza G., Montanari R., Tata M.E., *Proceedings of the IV International SEEP Conference*, Bari, 29/6-2/7-2010, ISBN 978-88-905185-2-2, Paper Code PC 123.
- [11] Irretier A., Banhart J., *Acta materialia*, 53 (2005), p. 4903.
- [12] Costanza G., Tata M.E., *Proceedings of the IV International SEEP Conference*, Bari, 29/6-2/7-2010, ISBN 978-88-905185-2-2, Paper Code PC 124.
- [13] Costanza G., Tata M.E., *Proceedings of IV CELLMAT Conference*, Dresden (Germany) 27-29/10/2010.

## Abstract

### Metal foams: recent experimental results and further developments

**Key Words:** Metal foams, light-weight materials, mechanical behaviour, powder metallurgy, recycling

In this paper the main recent results of the investigation on the production and characterization of porous materials are presented and discussed by the authors. After preliminary experiments in Al foam production (closed cells) starting from powder and the addition of TiH<sub>2</sub> as blowing agent, the attention has been focused on the production of some porous metals (open cells) by SDP technique (sintering and dissolution process) suitable modified. Another technique employed for the production of low cost foams is the so called RP (replication process), subjected to some modifications in comparison to the standard technique according to the selection of the metal or the alloy. An important aspect of this research concerns foam production starting from recycled materials, chips for Al and its alloys, grids and paste from junk batteries for lead foams. It could represent an important perspective not only for the energy saving but also from the environmental point of view. The main objective is the direct conversion of the material, deriving from previous machining, in Al and Pb foams respectively. The experimental results and the problems arisen during foam manufacturing are presented too. Another aspect of the research is about Fe foams production, combining a good mixing of mechanical properties and low weight. Finally the last point of this review is about the production of porous electrodes of lead manufactured as metal foams. Microporous electrodes could substitute the standard ones in lead acid batteries in the perspective of weight reduction and performance improvement. Critical from this point of view is the control of porosity size. Some problems must be solved and the research is going on. For all kinds of manufactured foams a mechanical and morphological characterization has been performed.