

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Design

Corso di Laurea in Design e comunicazione

Tesi di Laurea Triennale

“L'aluminium foam nelle tavole da surf: analisi delle proprietà, dei vantaggi e delle potenzialità future”



**Politecnico
di Torino**

Relatore

prof. Massimo Messori

Candidato

Jacopo Ruffino

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

INDICE

Abstract

1.1 Presentazione del tema e obiettivi della tesi

1.2 Storia delle tavole da surf e dei materiali utilizzati

Le schiume di alluminio (aluminium foam)

2.1 Cos'è l'aluminium foam e come viene prodotto

2.2 Proprietà fisiche e meccaniche dell'aluminium foam

2.3 Applicazioni attuali dell'aluminium foam in vari settori

L'utilizzo dell'aluminium foam nelle tavole da surf

3.1 Possibili vantaggi dell'aluminium foam nelle tavole da surf

3.1.1 Leggerezza e galleggiamento

3.1.2 Resistenza agli urti e durabilità

3.1.3 Personalizzazione della tavola (flessione , spessore, densità)

3.1.4 Proprietà termiche

3.2 Potenziali svantaggi e sfide nell'uso dell'aluminium foam

3.2.1 Costi di produzione e accessibilità

3.2.2 Lavorabilità e processo di shaping

3.2.3 Impatto ambientale e riciclabilità

Analisi comparativa aluminium foam e materiali tradizionali

4.1 Confronto delle prestazioni

4.2 Durabilità e resistenza all'usura nel tempo

4.3 Costi di acquisto e manutenzione a lungo termine

4.4 Impatto ambientale e possibilità di riciclo a fine vita

Potenziati sviluppi futuri dell'aluminium foam nel settore del surf

5.1 Combinazione con altri materiali avanzati (compositi, nanomateriali)

5.2 Ottimizzazione della struttura delle celle per prestazioni specifiche

Conclusioni

6.1 Sintesi dei risultati e considerazioni finali

6.2 Prospettive di ricerca futura

ABSTRACT

Questa tesi esamina il potenziale impiego della schiuma di alluminio al 95% di porosità come materiale innovativo nella fabbricazione di tavole da surf, analizzandone caratteristiche, vantaggi e limitazioni in rapporto ai materiali convenzionali quali poliuretano (PU), polistirene espanso (EPS) e polistirene estruso (XPS).

Lo studio si articola in diverse sezioni che indagano le proprietà specifiche della schiuma di alluminio, le sue possibili applicazioni nel settore nautico ricreativo, e un'analisi comparativa approfondita rispetto ai materiali tradizionali.

L'elaborato si apre con una retrospettiva sull'evoluzione dei materiali impiegati nella costruzione delle tavole da surf, partendo dalla tradizione hawaiana del legno fino alle moderne soluzioni sintetiche. Questa contestualizzazione fornisce una base per comprendere le esigenze attuali e le sfide nel design e nella produzione di attrezzature per il surf.

La ricerca prosegue con il capitolo 2, quello che presenta un'analisi dettagliata della schiuma di alluminio, esaminandone il processo produttivo, le caratteristiche fisico-meccaniche e le attuali applicazioni industriali. Particolare attenzione è rivolta agli elementi che rendono questo materiale potenzialmente vantaggioso per le tavole da surf, come la leggerezza, la resistenza strutturale e le capacità di assorbimento degli urti.

Il capitolo 3.1 si focalizza sui potenziali benefici dell'utilizzo della schiuma di alluminio nelle tavole da surf. Vengono esaminati aspetti quali galleggiabilità, resistenza all'impatto, durabilità, possibilità di personalizzazione in termini di flessibilità, spessore e densità, nonché le proprietà termiche. Ogni elemento è corroborato da dati tecnici e raffronti con i materiali convenzionali.

Il capitolo 3.2 analizza le possibili criticità e le sfide nell'adozione di questo materiale innovativo, considerando i costi di produzione, l'accessibilità, le complessità nel processo di shaping e lavorazione, oltre alle questioni legate all'impatto ambientale e alla riciclabilità.

La sezione 4 è dedicata a un'analisi comparativa tra la schiuma di alluminio e i materiali tradizionali. Questa parte esamina le prestazioni in termini di proprietà meccaniche e comportamento in acqua, la longevità e la resistenza all'usura, i costi di acquisto e manutenzione a lungo termine, nonché l'impatto ambientale considerando l'intero ciclo di vita del prodotto.

Seguendo approcci diversificati, il capitolo 5 indaga le possibilità di migliorarne le prestazioni attraverso l'accoppiamento dell'aluminum foam con altri materiali e l'ottimizzazione della struttura cellulare.

La ricerca evidenzia come la schiuma di alluminio offra potenziali vantaggi in termini di prestazioni meccaniche, durabilità e possibilità di customizzazione. Le tavole realizzate con questo materiale potrebbero presentare una vita utile estesa e mantenere prestazioni superiori rispetto alle controparti tradizionali. Tuttavia, ci sono anche sfide significative,

principalmente legate ai costi di produzione elevati, alla complessità dei processi di lavorazione e alle problematiche di riciclaggio.

In conclusione, lo studio suggerisce che la schiuma di alluminio rappresenta un'alternativa promettente ai materiali convenzionali per la costruzione di tavole da surf. Tuttavia, la sua adozione su larga scala necessiterà di ulteriori avanzamenti tecnologici per ottimizzare i costi di produzione e migliorare i processi di lavorazione.

1.1 Presentazione del tema e obiettivi della tesi

Il surf, sport iconico e stile di vita che affonda le sue radici nella cultura polinesiana, ha subito una notevole evoluzione nel corso degli anni, non solo in termini di tecniche e stili, ma anche per quanto riguarda i materiali e le tecnologie impiegate nella realizzazione delle tavole. Questa tesi si propone di esplorare una frontiera innovativa nel campo della produzione di tavole da surf: l'utilizzo della schiuma di alluminio (aluminium foam) come materiale strutturale principale.

La scelta dei materiali nella costruzione delle tavole da surf è sempre stata un equilibrio delicato tra prestazioni, durabilità, costo e, più recentemente, sostenibilità ambientale. Dai primi esemplari in legno massiccio, passando per l'introduzione rivoluzionaria del poliuretano (PU) negli anni '50, fino ai moderni core in polistirene espanso (EPS) e alle innovative soluzioni composite, l'industria del surf ha costantemente cercato di migliorare le caratteristiche delle tavole per soddisfare le esigenze sempre più sofisticate dei surfisti.

In questo contesto di continua innovazione, la schiuma di alluminio emerge come un materiale potenzialmente rivoluzionario. Questo materiale cellulare, caratterizzato da una struttura porosa all'interno di una matrice metallica, offre una combinazione unica di proprietà che lo rendono particolarmente interessante per applicazioni ad alte prestazioni come le tavole da surf.

L'obiettivo principale di questa tesi è valutare in modo approfondito e critico il potenziale dell'aluminium foam come materiale alternativo per la costruzione di tavole da surf, analizzandone vantaggi, svantaggi e prospettive future in confronto con i materiali tradizionali. Questa analisi si articola in diversi sotto-obiettivi:

1. Esaminare le proprietà fisiche e meccaniche dell'aluminium foam, con particolare attenzione alle caratteristiche rilevanti per l'applicazione nelle tavole da surf, come densità, resistenza meccanica, rigidità, capacità di assorbimento degli urti e comportamento in ambiente marino.
2. Valutare i potenziali vantaggi dell'utilizzo dell'aluminium foam nelle tavole da surf, inclusi aspetti come la leggerezza, la durabilità, la possibilità di personalizzazione delle prestazioni e le proprietà termiche.
3. Analizzare le sfide tecniche ed economiche associate all'adozione di questo materiale, considerando aspetti come i costi di produzione, la lavorabilità, il processo di shaping e l'integrazione con altri componenti della tavola.
4. Condurre un'analisi comparativa approfondita tra l'aluminium foam e i materiali tradizionali (PU, EPS, XPS) in termini di prestazioni, durabilità, costi del ciclo di vita e impatto ambientale.
5. Esaminare l'impatto ambientale e le possibilità di riciclo dell'aluminium foam nel contesto delle tavole da surf, considerando l'intero ciclo di vita del prodotto.
6. Esplorare potenziali sviluppi futuri e innovazioni che potrebbero migliorare ulteriormente l'applicabilità dell'aluminium foam nel settore del surf.

La scelta di concentrarsi sull'aluminium foam come materiale innovativo per le tavole da surf è motivata da diverse considerazioni. In primo luogo, le proprietà uniche di questo materiale offrono potenziali soluzioni ad alcune delle sfide persistenti nella progettazione delle tavole

da surf. La sua struttura cellulare promette un eccellente rapporto resistenza/peso, che potrebbe tradursi in tavole più leggere ma ugualmente robuste. La capacità di assorbimento degli urti dell'aluminium foam potrebbe migliorare significativamente la durabilità delle tavole, un aspetto critico considerando l'ambiente ostile in cui vengono utilizzate.

Inoltre, la possibilità di modulare le proprietà dell'aluminium foam variando parametri come la densità e la dimensione delle celle apre nuove prospettive per la personalizzazione delle tavole. Questo potrebbe consentire ai shaper di creare tavole con caratteristiche di flessione, reattività e galleggiabilità finemente calibrate per adattarsi alle preferenze individuali dei surfisti o alle specifiche condizioni delle onde.

Dal punto di vista ambientale, l'aluminium foam presenta alcune caratteristiche interessanti. L'alluminio è un materiale altamente riciclabile, e la maggiore durabilità potenziale delle tavole in aluminium foam potrebbe contribuire a ridurre il consumo di risorse e la produzione di rifiuti nel lungo periodo. Tuttavia, è fondamentale valutare attentamente l'intero ciclo di vita del prodotto, considerando l'impatto energetico della produzione e le sfide legate al riciclo di un materiale composito complesso.

La tesi si propone di affrontare queste tematiche con un approccio rigoroso e multidisciplinare, combinando analisi teoriche, dati sperimentali (ove disponibili) e considerazioni pratiche derivate dall'industria del surf. L'obiettivo è fornire una valutazione equilibrata e completa del potenziale dell'aluminium foam nel contesto delle tavole da surf, evidenziando non solo le opportunità ma anche le sfide e le aree che richiedono ulteriore ricerca e sviluppo.

Nel perseguire questi obiettivi, la tesi si articola in diverse sezioni chiave:

1. Una panoramica storica dell'evoluzione dei materiali utilizzati nelle tavole da surf, per contestualizzare l'introduzione dell'aluminium foam e comprendere le esigenze e le tendenze del settore.
2. Un'analisi approfondita delle proprietà dell'aluminium foam, dei metodi di produzione e delle sue attuali applicazioni in altri settori industriali.
3. Una discussione dettagliata dei potenziali vantaggi dell'aluminium foam nelle tavole da surf, supportata da dati tecnici e, dove possibile, da simulazioni o test sperimentali.
4. Un'esame critico delle sfide tecniche, economiche e pratiche associate all'adozione dell'aluminium foam nel settore del surf.
5. Un'analisi comparativa completa tra l'aluminium foam e i materiali tradizionali, considerando aspetti come prestazioni, durabilità, costi e impatto ambientale.
6. Una valutazione delle prospettive future, inclusi possibili sviluppi tecnologici che potrebbero migliorare l'applicabilità dell'aluminium foam nelle tavole da surf.

Questa ricerca si colloca all'intersezione tra scienza dei materiali, ingegneria meccanica e design sportivo, con importanti implicazioni per la sostenibilità ambientale. L'aluminium foam, pur essendo un materiale relativamente nuovo nel contesto delle tavole da surf, ha già dimostrato il suo potenziale in altri settori ad alte prestazioni come l'industria aerospaziale e automobilistica. Trasferire queste conoscenze e tecnologie al mondo del surf rappresenta una sfida stimolante e potenzialmente trasformativa per l'industria.

È importante sottolineare che questa tesi non si propone di presentare l'aluminium foam come una soluzione universale o superiore in ogni aspetto ai materiali tradizionali. Piuttosto, l'obiettivo è condurre un'analisi obiettiva e completa che possa informare future decisioni e direzioni di ricerca nel settore delle tavole da surf. La complessità del tema richiede una valutazione attenta di molteplici fattori, inclusi aspetti tecnici, economici, ambientali e persino culturali, considerando il profondo legame che molti surfisti hanno con i materiali e le tecniche tradizionali.

Inoltre, questa ricerca si inserisce in un contesto più ampio di innovazione sostenibile nel settore degli sport acquatici. In un'epoca in cui la consapevolezza ambientale è sempre più centrale, l'esplorazione di nuovi materiali e tecnologie per le tavole da surf non è solo una questione di miglioramento delle prestazioni, ma anche di responsabilità ecologica. L'aluminium foam, con il suo potenziale di durabilità e riciclabilità, potrebbe offrire un contributo significativo in questa direzione, se adeguatamente sviluppato e implementato.

La metodologia adottata in questa tesi combina ricerca bibliografica approfondita, analisi di dati tecnici, e, dove possibile, input da esperti del settore. Data la natura innovativa del tema, particolare attenzione è stata posta nell'integrare conoscenze provenienti da diversi campi: scienza dei materiali, ingegneria meccanica, design di prodotto e scienze ambientali. Questo approccio interdisciplinare è essenziale per comprendere appieno le implicazioni dell'introduzione di un nuovo materiale in un settore così specializzato come quello delle tavole da surf.

In conclusione, questa tesi si propone di offrire un contributo significativo alla comprensione del potenziale dell'aluminium foam nel contesto delle tavole da surf, fornendo una base solida per future ricerche e sviluppi in questo campo. L'auspicio è che questo lavoro possa stimolare ulteriori innovazioni nel settore, promuovendo lo sviluppo di tavole da surf che non solo migliorino le prestazioni, ma siano anche più durature e sostenibili dal punto di vista ambientale. In un'epoca in cui l'innovazione tecnologica e la responsabilità ecologica sono sempre più intrecciate, esplorare nuove frontiere nei materiali per le tavole da surf rappresenta non solo una sfida tecnica, ma anche un'opportunità per ridefinire il rapporto tra sport, tecnologia e ambiente.

1.2 Storia delle tavole da surf e dei materiali utilizzati

La storia del surf affonda le sue radici nella cultura polinesiana, in particolare nelle isole hawaiane, dove questa pratica era considerata non solo uno sport, ma anche un'arte e una parte integrante della spiritualità locale. I primi surfisti hawaiani utilizzavano tavole di legno ricavate dagli alberi di koa, ulu e wiliwili, che venivano selezionati con cura e lavorati con maestria dagli artigiani locali. Le tavole più antiche, chiamate "olo", erano lunghe fino a 6 metri e pesanti, riservate principalmente ai capi e ai nobili. Con il passare del tempo, furono introdotte tavole più corte e leggere, come le "alaia" e le "paipo", che resero il surf accessibile a una fetta più ampia della popolazione. L'arrivo degli europei nelle isole hawaiane nel XVIII secolo portò a un declino temporaneo della cultura del surf, considerata dai missionari una pratica pagana e frivola. Tuttavia, grazie all'impegno di alcune figure chiave come Duke Kahanamoku, il surf conobbe una rinascita all'inizio del XX secolo, diffondendosi rapidamente in California e in Australia.



Fig. 1 Struttura interna tipica delle tavole da surf in legno

Fu proprio in questo periodo che iniziarono a essere sperimentati nuovi materiali per la costruzione delle tavole da surf, in alternativa al legno tradizionale. Uno dei primi innovatori fu Tom Blake, che nel 1926 brevettò la prima tavola con un longherone cavo in legno di sequoia, riducendo notevolmente il peso rispetto alle tavole piene.

Negli anni '40 e '50, il poliuretano fece la sua comparsa nel mondo del surf grazie a pionieri come Bob Simmons e Hobie Alter. Le tavole in poliuretano, rivestite con fibra di vetro e resina poliesteri, erano molto più leggere e facili da produrre rispetto a quelle in legno, aprendo la strada a una vera e propria rivoluzione nel design e nelle prestazioni delle tavole.

Il poliuretano (PU) rimase il materiale dominante per i blank delle tavole da surf fino agli anni 2000, quando l'azienda Clark Foam, principale fornitore di blank in PU, chiuse improvvisamente i battenti a causa di problemi ambientali legati al processo produttivo. Questo evento spinse l'industria del surf a cercare alternative più ecologiche, come il polistirene espanso (EPS).

L'EPS, già utilizzato in precedenza ma meno diffuso del PU, divenne rapidamente il materiale di riferimento per i produttori di tavole da surf. I blank in EPS sono più leggeri del PU a parità di volume, offrono una maggiore galleggiabilità e sono più facili da riciclare. Tuttavia, richiedono l'uso di resine epossidiche per il rivestimento, che sono generalmente più costose e meno lavorabili delle resine poliesteri utilizzate con il PU.

Oltre al PU e all'EPS, negli ultimi anni sono stati introdotti anche altri materiali innovativi per la costruzione di tavole da surf, come il polistirene estruso (XPS) e vari compositi a base di fibre di carbonio, kevlar e basalto.

Il polistirene estruso (XPS) è un materiale simile all'EPS ma con una struttura a celle chiuse, che lo rende più denso e resistente all'assorbimento di acqua. Le tavole in XPS sono generalmente più pesanti di quelle in EPS, ma offrono una maggiore durata e una migliore risposta in condizioni di onde potenti e veloci.

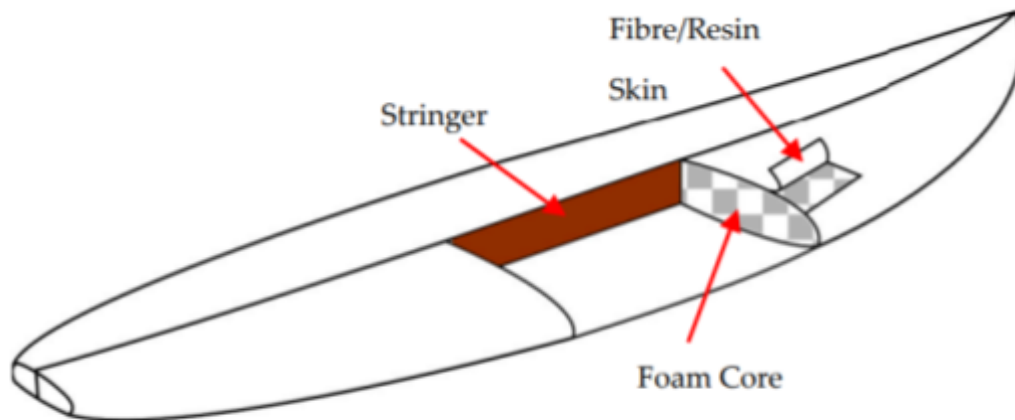


Fig.2 Struttura generale delle tavole da surf

I compositi a base di fibre di carbonio, kevlar e basalto vengono spesso utilizzati in combinazione con i blank in EPS o XPS per aumentare la resistenza, la reattività e la durata delle tavole. Un esempio di questa tecnologia è il FutureFlex di Hayden Cox, che prevede l'uso di un telaio in fibra di carbonio avvolto attorno a un'anima in EPS, eliminando la necessità del classico longherone in legno.

Un'altra innovazione interessante è la costruzione sandwich, utilizzata ad esempio da Firewire Surfboards. In questo caso, il blank in EPS viene avvolto con fibra di vetro e poi rivestito con un composito aerospaziale per aumentare la resistenza agli impatti. Inoltre, vengono inseriti dei rinforzi in legno di balsa e paulownia lungo i rail per migliorare il controllo e la flessibilità della tavola.

Nonostante questi progressi, il legno non è stato completamente abbandonato nella produzione di tavole da surf. Alcuni shaper continuano a realizzare tavole in legno massiccio o in laminato, utilizzando essenze leggere e resistenti come il paulownia, il balsa e il cedro. Queste tavole sono apprezzate per la loro bellezza estetica, la sensazione unica sotto i piedi e la maggiore eco-compatibilità rispetto ai materiali sintetici.

Parlando più in dettaglio dei materiali utilizzati per il blank delle tavole da surf, il poliuretano (PU) è una schiuma sintetica a celle aperte, con una densità compresa tra i 60 e i 100 kg/m³. I blank in PU vengono prodotti mediante colata in stampi, utilizzando un mix di isocianato e poliolo, che reagiscono formando la schiuma. Una volta estratto dallo stampo, il blank viene tagliato e sagomato nella forma desiderata, per poi essere rivestito con fibra di vetro e resina poliesteri.

Il PU offre un buon rapporto tra peso e resistenza, oltre a una discreta flessibilità e una sensazione di "calore" sotto i piedi. Tuttavia, è un materiale che tende ad assorbire acqua nel tempo, appesantendo la tavola e compromettendone le prestazioni. Inoltre, il processo di produzione del PU rilascia nell'atmosfera composti organici volatili (VOC) potenzialmente dannosi per la salute e l'ambiente.

Il polistirene espanso (EPS), invece, è una schiuma termoplastica a celle chiuse, con una densità inferiore rispetto al PU (circa 30-40 kg/m³). I blank in EPS vengono realizzati mediante stampaggio a caldo di piccole sfere di polistirene pre-espanso, che vengono fuse insieme grazie al vapore acqueo. Il risultato è un blank leggero e altamente resistente alla compressione, che viene poi sagomato e rivestito con fibra di vetro e resina epossidica. L'EPS offre una maggiore galleggiabilità e leggerezza rispetto al PU, oltre a una migliore resistenza all'assorbimento di acqua e agli impatti. Le tavole in EPS tendono ad essere più reattive e veloci, grazie alla maggiore rigidità del materiale. Tuttavia, l'EPS può essere più difficile da lavorare per gli shaper abituati al PU, e richiede l'uso di resine epossidiche che sono generalmente più costose e meno lavorabili delle resine poliesteri.

Il polistirene estruso (XPS) è un materiale simile all'EPS, ma con una struttura a celle chiuse più compatta e uniforme. I blank in XPS vengono prodotti mediante un processo di estrusione continua, che conferisce al materiale una maggiore densità e resistenza meccanica rispetto all'EPS. Le tavole in XPS sono più pesanti di quelle in EPS, ma offrono una maggiore durata, una migliore risposta in condizioni di onde potenti e una minore tendenza a "flettere" sotto il peso del surfista.

Per quanto riguarda i compositi utilizzati nel mondo del surf, la fibra di carbonio è senza dubbio il materiale più diffuso e performante. Le fibre di carbonio sono costituite da sottili filamenti di grafite, caratterizzati da un'elevata resistenza meccanica e un basso peso specifico. Vengono spesso utilizzate per realizzare telai, rinforzi e longheroni all'interno delle tavole, migliorandone la reattività, la resistenza agli impatti e la durata complessiva.

Il kevlar, invece, è una fibra aramidica sviluppata inizialmente per applicazioni militari e aerospaziali. È caratterizzato da un'elevata resistenza alla trazione e alla lacerazione, oltre a un buon rapporto tra peso e resistenza. Nelle tavole da surf, il kevlar viene utilizzato principalmente per rinforzare i rail e le zone più soggette a impatti e abrasioni, aumentandone la durata e la resistenza.

Infine, le fibre di basalto stanno guadagnando sempre più popolarità nel settore del surf grazie alle loro proprietà meccaniche e alla maggiore eco-compatibilità rispetto alle fibre sintetiche. Le fibre di basalto sono ricavate dalla roccia vulcanica e offrono una buona resistenza alla trazione, all'impatto e alla corrosione. Vengono spesso utilizzate in combinazione con la fibra di vetro per realizzare i rivestimenti delle tavole, conferendo maggiore resistenza e durata senza appesantire eccessivamente il prodotto finale.

In conclusione, la scelta del materiale per una tavola da surf dipende da molteplici fattori, come il livello di esperienza del surfista, lo stile di surfing, le condizioni delle onde e il budget a disposizione. Mentre il PU rimane ancora il materiale più diffuso tra i surfisti tradizionalisti e i principianti, l'EPS e i compositi avanzati stanno guadagnando sempre più terreno tra i surfisti esperti alla ricerca di prestazioni elevate e durata nel tempo.

È importante sottolineare che non esiste un materiale "perfetto" in assoluto, ma solo quello più adatto alle esigenze e alle preferenze individuali. La continua ricerca e sviluppo di nuovi materiali e tecnologie nel campo del surf fa ben sperare per il futuro, con l'obiettivo di realizzare tavole sempre più performanti, resistenti e sostenibili dal punto di vista ambientale.

Le schiume di alluminio (aluminium foam)

2.1 Cos'è l'aluminium foam e come viene prodotto

L'aluminium foam, o schiuma di alluminio, è un materiale cellulare costituito da una matrice di alluminio con una struttura altamente porosa. Si tratta di un materiale ultraleggero che combina alcune delle migliori proprietà dell'alluminio, come la leggerezza, la resistenza alla corrosione e l'alta conducibilità termica, con i vantaggi unici derivanti dalla sua struttura cellulare, come l'elevato assorbimento di energia, l'isolamento termico e acustico e la resistenza al fuoco.

La struttura a celle della schiuma di alluminio è caratterizzata dalla presenza di una grande quantità di vuoti o pori, uniformemente distribuiti all'interno della matrice metallica. Questi pori possono essere di varie forme e dimensioni a seconda del metodo di produzione utilizzato e possono essere aperti (interconnessi) o chiusi (isolati). La porosità delle schiume di alluminio può variare dal 50% fino al 95% in volume, con densità che vanno da 0,135 a 1,35 g/cm³, ovvero da 2 a 20 volte inferiori a quella dell'alluminio solido.



Fig.3 Forme di aluminum foam

Esistono diversi metodi per produrre le schiume di alluminio, che possono essere classificati in tre categorie principali:

1. Schiumatura diretta di metallo fuso: consiste nell'introdurre bolle di gas direttamente nell'alluminio liquido per creare una struttura schiumosa che poi viene raffreddata e solidificata. I principali metodi di schiumatura diretta sono:

- Iniezione di gas: gas come aria, azoto o argon vengono iniettati nell'alluminio fuso attraverso ugelli porosi o tubi rotanti. Le bolle di gas rimangono intrappolate nel metallo liquido viscoso creando una schiuma che viene poi raffreddata. Con questo metodo si possono ottenere schiume a celle aperte o parzialmente aperte.

- Agenti schiumogeni: polveri che si decompongono rilasciando gas (ad es. idruro di titanio) vengono aggiunte all'alluminio fuso. Ad alta temperatura avviene la decomposizione dell'agente schiumogeno che rilascia bolle di gas, le quali si espandono creando una struttura cellulare che viene poi solidificata. In genere si ottengono schiume a celle chiuse.

- Schiumatura con particelle: particelle ceramiche cave (ad es. microsferi di allumina) vengono mescolate all'alluminio fuso. Le particelle agiscono come stabilizzatori di schiuma, aiutando a trattenere le bolle di gas nel metallo liquido. Il composito particelle-schiuma viene colato e raffreddato producendo una schiuma a celle chiuse.

2. Schiumatura della polvere compattata: polveri di leghe di alluminio vengono mescolate con agenti schiumogeni e compattate a freddo in precursori solidi. I precursori vengono poi riscaldati sopra il punto di fusione dell'alluminio, l'agente schiumogeno si decompone rilasciando gas che fanno espandere il metallo creando una struttura cellulare. Raffreddando si ottiene una schiuma solida a celle chiuse. Questo metodo permette un maggiore controllo della forma e delle dimensioni del componente finale.

3. Tecniche di colata con materiali "spazio-occupanti": un materiale che funge da stampo sacrificale, come sfere cave o granuli di sale, viene impaccato in uno stampo e infiltrato con alluminio fuso. Una volta solidificato, il materiale spazio-occupante viene rimosso chimicamente (ad es. sciogliendo il sale in acqua) o termicamente (ad es. bruciando le sfere polimeriche), lasciando una struttura a celle aperte che replica la forma dello stampo. Questa tecnica permette di realizzare schiume con celle di forme e dimensioni ben controllate.

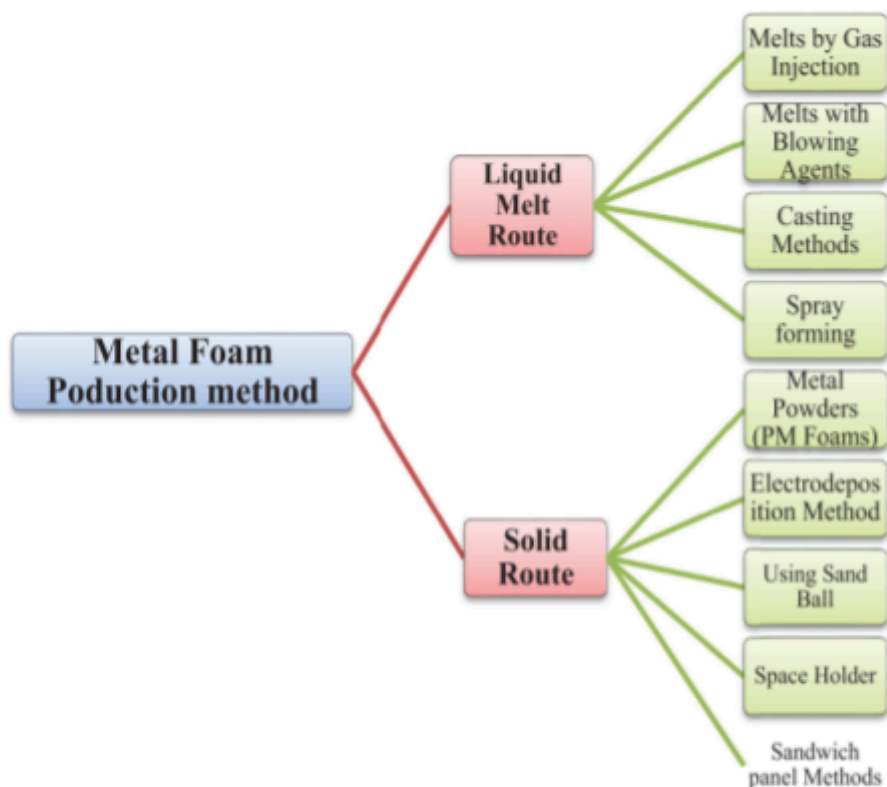


Fig. 4. Diversi metodi di produzione di schiuma metallica

Indipendentemente dal metodo produttivo, i parametri di processo come la quantità di gas introdotto, la temperatura del fuso, la pressione applicata e la velocità di raffreddamento influenzano la morfologia finale della schiuma, in particolare la dimensione e la distribuzione delle celle, lo spessore delle pareti cellulari e la densità relativa.

La microstruttura delle pareti cellulari dipende principalmente dalla composizione della lega di alluminio utilizzata. Generalmente, per facilitare la formazione della schiuma, si usano leghe Al-Si o Al-Mg-Si con silicio tra il 6 e il 12%, che abbassano la viscosità del fuso e stabilizzano le bolle grazie alla formazione di ossidi. Inoltre, nelle schiume prodotte da polveri, la presenza di ossidi e irregolarità superficiali sulle particelle aumenta la stabilità all'interfaccia gas-metallo. Elementi in lega come magnesio, rame o zinco vengono aggiunti per migliorare le proprietà meccaniche della matrice attraverso meccanismi di indurimento.

Dopo la schiumatura e la solidificazione, le schiume di alluminio vengono spesso sottoposte a trattamenti termici, come la tempra di soluzione e l'invecchiamento, per ottimizzare la microstruttura e le proprietà meccaniche. La morfologia e l'uniformità della struttura cellulare vengono controllate attraverso tecniche non distruttive come la tomografia computerizzata a raggi X.

Le schiume di alluminio così prodotte presentano una combinazione unica di proprietà che le rendono attraenti per una vasta gamma di applicazioni strutturali e funzionali. Grazie alla loro struttura cellulare, offrono un eccellente rapporto rigidità-peso, alta capacità di assorbimento degli urti, isolamento termico e acustico, smorzamento delle vibrazioni e resistenza al fuoco. Inoltre, la natura porosa permette il passaggio di fluidi, rendendole adatte per scambiatori di calore, filtri e supporti per catalizzatori.

Tuttavia, le schiume di alluminio presentano anche alcune limitazioni, come l'anisotropia delle proprietà dovuta all'orientamento preferenziale delle celle, la difficoltà di collegamento con elementi strutturali convenzionali e l'alta sensibilità ai difetti come celle non uniformi o pareti cellulari rotte, che possono compromettere le prestazioni meccaniche. Inoltre, i costi di produzione sono ancora relativamente alti rispetto ai materiali convenzionali, il che ne limita l'utilizzo su larga scala.

La ricerca sulle schiume di alluminio è in continua evoluzione, con l'obiettivo di migliorare i processi produttivi, ottimizzare la microstruttura e le proprietà, e trovare nuove applicazioni che sfruttino appieno il potenziale di questi materiali innovativi. Lo sviluppo di schiume a gradiente di porosità, l'uso di rivestimenti superficiali e l'integrazione con altre classi di materiali come compositi e polimeri sono alcune delle direzioni promettenti per il futuro delle schiume metalliche.

In sintesi, l'aluminium foam è un materiale cellulare ultraleggero che unisce i vantaggi dell'alluminio con quelli di una struttura porosa altamente ingegnerizzata. Grazie alle sue proprietà uniche derivanti dalla morfologia a celle, offre un'eccellente combinazione di leggerezza, resistenza, assorbimento di energia e isolamento, rendendolo attraente per applicazioni nei settori dei trasporti, dell'edilizia, dell'industria e dell'energia. Sebbene presenti ancora sfide da superare, l'aluminium foam rappresenta un promettente esempio di materiale innovativo multifunzionale con un grande potenziale per lo sviluppo di soluzioni tecnologiche avanzate.

2.2 Proprietà fisiche e meccaniche dell'aluminium foam

L'aluminium foam presenta una combinazione unica di proprietà fisiche e meccaniche che derivano dalla sua peculiare struttura cellulare. Queste caratteristiche lo rendono un materiale estremamente interessante per applicazioni strutturali e funzionali in svariati settori industriali.

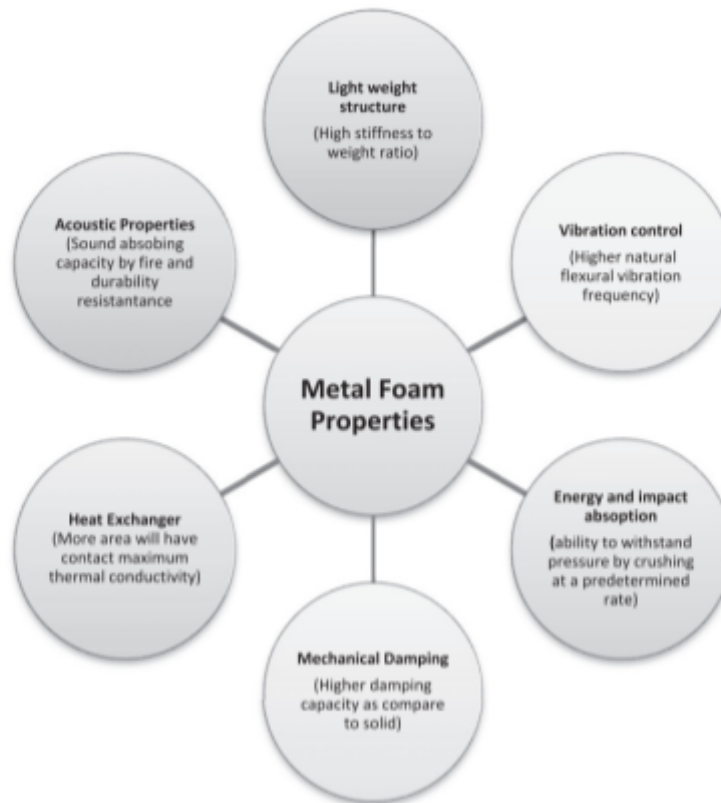


Fig. 5 Proprietà della schiuma di alluminio

Densità e leggerezza

Una delle proprietà più distintive dell'aluminium foam è la sua bassa densità, tipicamente compresa tra 0,2 e 0,8 g/cm³, ovvero dal 5% al 25% di quella dell'alluminio solido. Questa leggerezza è dovuta alla presenza di una grande quantità di vuoti nella struttura, con porosità che può arrivare fino al 95% in volume. La densità relativa (rapporto tra densità della schiuma e densità del materiale base) è il principale parametro che influenza tutte le altre proprietà fisiche e meccaniche della schiuma. Variando il grado di porosità durante il processo produttivo è possibile ottenere schiume con un ampio spettro di densità e quindi "customizzare" le proprietà del materiale in base ai requisiti applicativi.

La bassa densità si traduce in un'elevata leggerezza, che consente di realizzare strutture con un rapporto resistenza/peso e rigidità/peso notevolmente superiore rispetto all'alluminio convenzionale. Questo aspetto è di fondamentale importanza in tutti quei settori, come il trasporto aereo e terrestre, in cui il risparmio di peso è essenziale per migliorare l'efficienza energetica e ridurre consumi ed emissioni. Le schiume di alluminio permettono di

alleggerire significativamente componenti strutturali pur mantenendo le necessarie caratteristiche di resistenza meccanica.

Oltre alla densità assoluta, anche la distribuzione della porosità all'interno della schiuma riveste un ruolo chiave. Schiume con una morfologia cellulare omogenea ed uniforme tendono ad avere proprietà più isotrope e prestazioni meccaniche superiori rispetto a schiume con una significativa variabilità nella dimensione e distribuzione dei pori. Il grado di "apertura" delle celle influenza la permeabilità della struttura al passaggio di fluidi, una caratteristica ricercata in applicazioni funzionali come scambiatori di calore o supporti per catalizzatori. Celle completamente chiuse, viceversa, garantiscono un maggior isolamento e migliori proprietà strutturali.

Comportamento a compressione

L'aluminium foam esibisce un comportamento a compressione unico e vantaggioso per applicazioni di assorbimento di energia. La curva sforzo-deformazione è costituita da tre regioni distinte:

1. Regime elastico lineare iniziale, in cui lo sforzo cresce proporzionalmente alla deformazione. Questa fase è governata principalmente dalla flessione elastica delle pareti cellulari.
2. Plateau di snervamento, caratterizzato da un valore pressoché costante dello sforzo al progredire della deformazione. In questa regione si ha il collasso plastico progressivo delle celle attraverso la formazione di cerniere plastiche, instabilità locali e rottura fragile delle pareti. Lo sforzo di plateau è strettamente correlato alla densità relativa.
3. Fase di densificazione, in cui lo sforzo cresce esponenzialmente a causa del contatto tra le pareti cellulari collassate e della compattazione della struttura.

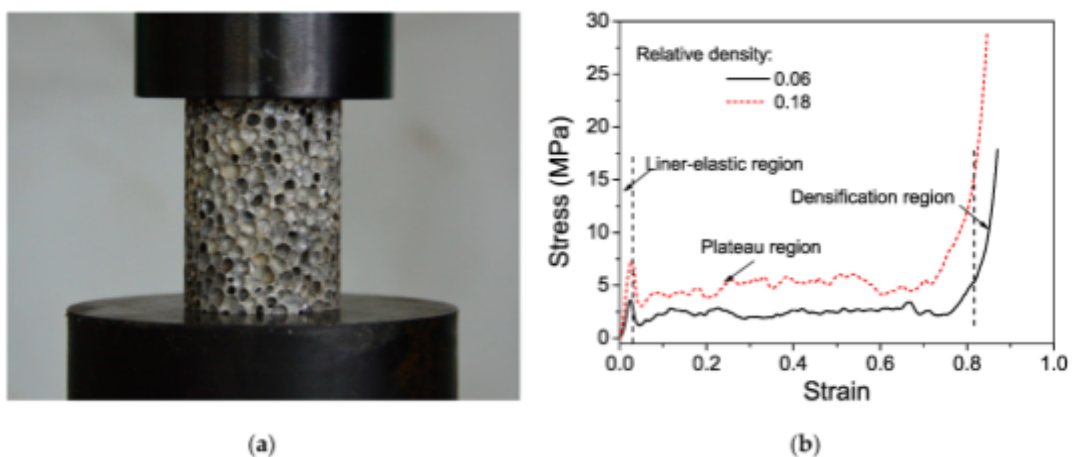


Fig. 6 Test di compressione dell'aluminum foam con relativo grafico

L'esteso plateau a sforzo costante è il tratto più interessante della curva, in quanto consente alla schiuma di assorbire efficacemente grandi quantità di energia per deformazione plastica senza generare picchi di forza. L'energia assorbita per unità di volume è data dall'area sottesa dalla curva sforzo-deformazione. L'efficienza del processo di assorbimento

energetico può essere valutata dal rapporto tra l'energia assorbita fino ad una data deformazione e l'energia teoricamente assorbibile da un assorbitore ideale con plateau perfettamente costante. Schiume più dense hanno plateau a sforzi maggiori e quindi tendono ad assorbire una maggiore energia specifica, ma oltre un certo limite l'efficienza diminuisce a causa della minore estensione del plateau.

Il comportamento a compressione delle schiume di alluminio è fortemente influenzato, oltre che dalla densità relativa, anche dalla microstruttura e dalla presenza di imperfezioni come celle di dimensione non uniforme, pareti non perfettamente dritte, discontinuità, porosità all'interno delle pareti stesse. Questi difetti, inevitabili nel materiale reale, abbassano il carico di snervamento e portano ad una certa dispersione dei dati sperimentali. Per questo motivo, le proprietà meccaniche delle schiume vengono descritte su base statistica attraverso modelli analitici o numerici che tengono conto della natura stocastica della microstruttura.

Resistenza specifica

L'aluminium foam presenta valori di resistenza a compressione, trazione e taglio notevolmente inferiori rispetto al materiale base, tipicamente di un fattore 10-100 a seconda della densità. Tuttavia, normalizzando le proprietà di resistenza rispetto alla densità, si ottengono valori specifici paragonabili o superiori a quelli delle leghe di alluminio convenzionali. Questo significa che, a parità di peso, una struttura in schiuma può avere una resistenza pari o maggiore di una realizzata in metallo solido, pur godendo di tutti gli altri vantaggi derivanti dalla struttura cellulare.

La resistenza specifica a compressione di schiume di alluminio commerciali ad alta densità (0,5-0,6 g/cm³) può superare i 50 MPa/(g/cm³), contro i 100-150 MPa/(g/cm³) delle migliori leghe di alluminio ma con il vantaggio di una maggiore tolleranza al danno e di una modalità di cedimento progressiva anziché catastrofica. Questo le rende ideali per applicazioni in cui è richiesta un'elevata capacità di carico ma anche un certo grado di "sacrificabilità" della struttura, come negli elementi assorbitori di energia nei veicoli.

Anche per quanto riguarda la rigidità specifica, intesa come rapporto tra modulo elastico e densità, le schiume metalliche possono competere con i metalli convenzionali. Schiume di densità relativa 15-20% hanno moduli elastici di 1-5 GPa, corrispondenti a rigidità specifiche di 5-10 MPa/(kg/m³) comparabili con quelle delle leghe di alluminio (25-30 MPa/(kg/m³)). Inoltre, variando opportunamente densità e morfologia cellulare, è possibile realizzare strutture con gradienti o anisotropie di rigidità, una caratteristica molto apprezzata in ambito biomedicale in cui è necessario riprodurre le proprietà meccaniche fortemente direzionali di tessuti come le ossa.

Resilienza e smorzamento

L'aluminium foam ha un comportamento elasto-plastico con basso incrudimento, che gli conferisce un'elevata resilienza, ovvero la capacità di assorbire energia elasticamente e di recuperare ampie deformazioni senza danno permanente. Schiume con densità relativa inferiore al 5% possono subire deformazioni elastiche a compressione fino all'80% senza collassare, un valore significativamente più alto di quello dei metalli solidi (0,5-1%). Questa eccellente resilienza deriva dal fatto che la deformazione elastica è accomodata

principalmente tramite il bending delle pareti cellulari anziché attraverso l'allungamento del materiale (stretching), come accade invece nei metalli convenzionali. Il recupero elastico non-lineare della struttura cellulare contribuisce ad un migliore smorzamento e assorbimento di vibrazioni rispetto ai materiali solidi.

In virtù dell'isteresi presente nella risposta tenso-deformativa, l'aluminium foam ha ottime proprietà di smorzamento, con un fattore di perdita (damping ratio) fino a 10 volte superiore a quello delle leghe metalliche ($\sim 0,001$). Lo smorzamento è ulteriormente incrementato dalla presenza di imperfezioni microstrutturali e attriti interni tra le pareti cellulari, che contribuiscono a dissipare energia. Queste caratteristiche rendono le schiume metalliche ideali per applicazioni di isolamento e controllo delle vibrazioni, ad esempio nei supporti antivibrazione di macchinari o negli smorzatori sismici per edifici.

Resistenza a fatica

Nonostante le eccellenti proprietà di resistenza al danno e di assorbimento energetico, le schiume di alluminio sono molto sensibili ai carichi ciclici e presentano una vita a fatica limitata rispetto ai metalli convenzionali. A causa della concentrazione degli sforzi in corrispondenza di imperfezioni e discontinuità microstrutturali, le schiume tendono a sviluppare precocemente cricche di fatica che si propagano rapidamente portando al cedimento del componente.

La resistenza a fatica delle schiume è strettamente legata alle loro proprietà tensili piuttosto che a quelle a compressione. Per schiume di densità relativa 10-15%, la resistenza a fatica per 10^7 cicli è circa il 10-20% della resistenza a trazione, contro il tipico 30-40% per i metalli solidi. La vita a fatica tende a diminuire all'aumentare della densità e della dimensione media delle celle, mentre migliora con l'incremento del rapporto tra densità delle pareti e densità apparente. L'applicazione di trattamenti superficiali come pallinatura o rivestimenti contribuisce a migliorare le prestazioni a fatica attenuando l'effetto di intaglio delle imperfezioni superficiali.

La progettazione a fatica di strutture in schiuma metallica richiede quindi particolare attenzione e l'adozione di opportuni criteri che tengano conto del progressivo declino delle proprietà meccaniche sotto carico ciclico. In generale, si consiglia di limitare l'uso di aluminium foam in applicazioni critiche dal punto di vista della vita a fatica o perlomeno di sovradimensionare opportunamente i componenti rispetto ai carichi attesi.

Isolamento termico

Grazie alla loro struttura cellulare, le schiume metalliche hanno una conduttività termica notevolmente inferiore rispetto a quella del metallo base. La conduttività dipende dalla densità relativa e dalla morfologia delle celle, variando tipicamente tra 1 e 30 W/(m K) per porosità tra il 50% e il 95% in volume. Questi valori sono confrontabili con quelli dei migliori materiali isolanti cellulari non metallici come poliuretano espanso o lana di roccia.

L'ottimo isolamento termico è dovuto alla presenza dell'aria (o del gas) intrappolata nelle celle, che riduce sensibilmente il trasporto di calore per conduzione. A differenza dei materiali cellulari polimerici, le schiume a celle chiuse di alluminio mantengono una

conducibilità relativamente bassa anche ad alte temperature (fino a 500-600 °C), rendendole ideali per applicazioni di isolamento in condizioni estreme come in prossimità di motori a combustione o impianti ad alta temperatura.

L'isolamento termico può essere ulteriormente migliorato riempiendo le celle della schiuma con un materiale a cambiamento di fase (Phase Change Material o PCM), capace cioè di assorbire grandi quantità di calore latente durante la fusione e di cederlo durante la solidificazione, stabilizzando la temperatura. Compositi a base di schiume di alluminio e PCM a base paraffinica trovano impiego in sistemi di accumulo di energia termica e in dispositivi di gestione termica per l'elettronica.

Resistenza alla corrosione

La resistenza alla corrosione dell'aluminium foam dipende principalmente dalla composizione chimica della lega utilizzata come materiale base. In generale, le schiume prodotte da leghe della serie 1000, 5000 e 6000 (al magnesio e al silicio), ampiamente utilizzate in applicazioni strutturali, presentano una buona resistenza alla corrosione atmosferica e in ambienti moderatamente aggressivi grazie alla presenza di uno strato superficiale passivante di ossido di alluminio. Tuttavia, la particolare morfologia cellulare e l'elevata area superficiale esposta rendono le schiume potenzialmente più suscettibili alla corrosione localizzata come il pitting o la corrosione interstiziale rispetto al metallo solido. La presenza di difetti microstrutturali come microfessure, porosità nelle pareti o altri tipi di discontinuità può agire da innesco per fenomeni corrosivi, specie in ambienti fortemente aggressivi contenenti cloruri.

Per migliorare la resistenza alla corrosione delle schiume di alluminio possono essere adottate diverse strategie. Una possibilità è utilizzare leghe speciali appositamente studiate per applicazioni in ambienti corrosivi, come leghe della serie 5000 ad alto tenore di magnesio o della serie 6000 contenenti rame. Queste leghe sviluppano film di ossido più spessi e stabili che aumentano la protezione dalla corrosione. Un altro approccio consiste nell'applicare rivestimenti protettivi sulla superficie esterna della schiuma. Rivestimenti di conversione chimica come l'anodizzazione o la cromatazione, ampiamente utilizzati sulle leghe di alluminio convenzionali, possono essere adattati anche alle schiume aumentandone significativamente la resistenza alla corrosione. Rivestimenti organici (vernici, primer) o metallici (nichelatura, cromatura) forniscono un'ulteriore barriera fisica nei confronti degli agenti corrosivi. Particolare attenzione deve essere posta nell'accoppiamento delle schiume di alluminio con metalli dissimili per evitare l'innesco di processi di corrosione galvanica. L'inserimento di opportuni strati di materiale dielettrico (polimeri, gomme) in corrispondenza delle zone di giunzione consente di isolare elettricamente i metalli evitando la formazione di celle galvaniche. In ogni caso, data la particolare morfologia del materiale, in fase di progettazione è sempre consigliabile prevedere un certo sovradimensionamento di spessore della schiuma per tenere conto di un'eventuale riduzione di sezione resistente a causa di fenomeni corrosivi nel tempo.

Resistenza agli urti

Le schiume di alluminio presentano un'eccellente capacità di assorbimento degli urti grazie alla loro particolare struttura cellulare che consente di dissipare grandi quantità di energia e

di attenuare i picchi di forza trasmessi. Questa proprietà è strettamente legata alla morfologia e al comportamento a compressione del materiale. Durante un impatto, l'energia cinetica viene inizialmente assorbita per deformazione elastica della struttura cellulare, con un meccanismo del tutto analogo a quello di una molla. Al progredire della deformazione, le pareti delle celle iniziano a collassare plasticamente, formando un numero crescente di cerniere plastiche e bande di instabilità. La rottura fragile delle pareti (dovuta a fenomeni di buckling o a sforzi locali superiori alla resistenza del materiale base) contribuisce ulteriormente alla dissipazione energetica.

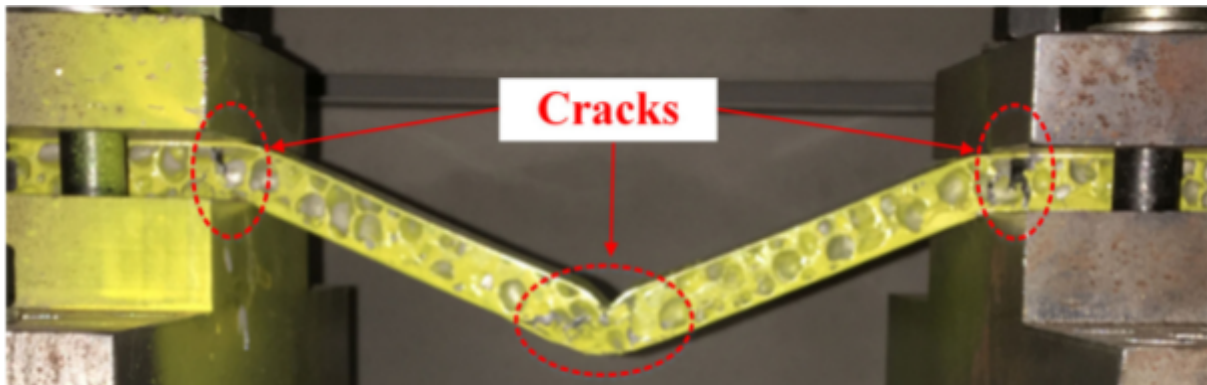


Fig.7 Test di resistenza agli impatti

2.3 Applicazioni attuali dell'aluminium foam in vari settori

L'aluminium foam trova attualmente numerose applicazioni in diversi settori industriali grazie alle sue proprietà uniche che combinano leggerezza, resistenza meccanica, capacità di assorbimento di energia e isolamento termico e acustico.

Applicazioni nell'industria automobilistica:

L'industria automobilistica ha adottato con entusiasmo l'utilizzo della schiuma di alluminio per migliorare le prestazioni dei veicoli in termini di sicurezza, efficienza energetica e comfort. Le principali applicazioni sfruttano la capacità di assorbimento di energia, la leggerezza del materiale e le proprietà di isolamento.

Per quanto riguarda l'assorbimento di energia in caso di impatto, la schiuma di alluminio viene impiegata per migliorare la sicurezza passiva dei veicoli. La sua capacità di deformarsi assorbendo grandi quantità di energia la rende ideale per componenti come paraurti, barre laterali e crash box. Studi hanno dimostrato un aumento dell'assorbimento di energia fino al 30% rispetto alle strutture tradizionali.

La riduzione del peso è un altro vantaggio chiave, che contribuisce a migliorare l'efficienza del carburante e ridurre le emissioni. La schiuma di alluminio viene utilizzata in pannelli sandwich per cofani e porte, supporti motore leggeri e componenti selezionati del telaio. Ad esempio, Audi ha ridotto del 20% il peso del cofano della A8 utilizzando pannelli sandwich con nucleo in schiuma di alluminio.

Per quanto riguarda l'isolamento acustico e la riduzione delle vibrazioni, la struttura cellulare della schiuma offre eccellenti proprietà di smorzamento, migliorando il comfort di guida. Viene impiegata in pannelli fonoassorbenti, sottoscocca e elementi strutturali. Ricerche hanno dimostrato riduzioni della trasmissione del rumore fino a 20 dB in determinate frequenze.

La gestione termica è un'altra area di applicazione, sfruttando le proprietà di isolamento termico della schiuma per proteggere componenti sensibili al calore, isolare sistemi di scarico e gestire la temperatura delle batterie nei veicoli elettrici. Tesla, ad esempio, ha brevettato un sistema di raffreddamento per batterie basato su schiuma di alluminio.

Infine, la schiuma di alluminio a celle aperte trova impiego nella filtrazione, per realizzare filtri dell'aria e del carburante ad alta efficienza. Ricercatori hanno sviluppato filtri per particolato diesel con un'efficienza superiore al 95%.

Nonostante i numerosi vantaggi, l'adozione diffusa della schiuma di alluminio nell'industria automobilistica deve ancora superare alcune sfide, tra cui i costi di produzione elevati, la necessità di standardizzazione e lo sviluppo di tecniche di giunzione efficaci. La ricerca si sta concentrando sull'ottimizzazione dei processi produttivi, lo sviluppo di schiume con proprietà graduate e l'integrazione con tecnologie di stampa 3D.

Applicazioni nell'industria aerospaziale:

L'industria aerospaziale ha trovato nella schiuma di alluminio un alleato prezioso per affrontare le sfide legate al volo e all'esplorazione spaziale, sfruttando la combinazione di leggerezza e alte prestazioni del materiale.

Per quanto riguarda le strutture leggere ad alta resistenza, la schiuma di alluminio viene impiegata in pannelli sandwich per pavimenti, pareti e soffitti delle cabine degli aerei, nonché in elementi strutturali come longheroni e centine. Ad esempio, Airbus ha ridotto del 20% il peso dei pavimenti della cabina dell'A380 utilizzando pannelli sandwich con nucleo in schiuma.

La protezione da impatti e l'assorbimento di energia sono ambiti di applicazione cruciali, con la schiuma utilizzata come scudo spaziale contro micrometeoriti e detriti, e nelle strutture di atterraggio di veicoli di esplorazione planetaria. La NASA ha condotto studi sull'utilizzo della schiuma come scudo multifunzionale per veicoli spaziali, dimostrando una significativa riduzione del rischio di perforazione.

La gestione termica è un'altra area di applicazione importante, con la schiuma impiegata in scambiatori di calore per sistemi di raffreddamento avionici e come isolamento termico per proteggere componenti sensibili. L'ESA ha sviluppato radiatori in schiuma di alluminio per satelliti che offrono prestazioni termiche superiori con una riduzione del peso fino al 30%.

Per quanto riguarda la soppressione del rumore e delle vibrazioni, la schiuma viene utilizzata in pannelli acustici per le cabine degli aerei e integrata in strutture critiche per ridurre la fatica dei materiali. Studi hanno dimostrato riduzioni del rumore in cabina fino a 15 dB in determinate frequenze.

Infine, la schiuma di alluminio trova applicazione anche nei sistemi di propulsione, per creare supporti motore leggeri e in componenti selezionati delle turbine. Pratt & Whitney sta esplorando l'uso della schiuma in componenti dei motori a reazione per ridurre il peso e migliorare l'efficienza del carburante.

Le sfide per una più ampia adozione nell'industria aerospaziale includono i lunghi e costosi processi di certificazione, la necessità di migliorare la resistenza alla fatica e lo sviluppo di tecniche di giunzione efficaci con materiali compositi avanzati. La ricerca futura si concentra sullo sviluppo di schiume con proprietà meccaniche migliorate, l'integrazione di nanotecnologie e l'ottimizzazione dei processi produttivi.

Applicazioni nell'edilizia e nell'architettura:

L'edilizia e l'architettura rappresentano un campo di applicazione in rapida crescita per la schiuma di alluminio, che offre soluzioni innovative per sfide costruttive e di design.

Nel campo dei pannelli strutturali leggeri, la schiuma viene impiegata in facciate e partizioni interne, offrendo leggerezza, isolamento termico e buone proprietà acustiche.

Per quanto riguarda l'isolamento termico e acustico, la schiuma viene integrata in tetti e pareti per migliorare l'efficienza energetica degli edifici, e utilizzata in barriere acustiche per

ridurre l'inquinamento acustico in ambienti urbani. Ricerche hanno dimostrato che pannelli in schiuma di 50 mm possono ridurre la trasmissione del calore fino al 40% rispetto all'isolamento tradizionale.

La protezione antincendio è un'altra area di applicazione importante, con la schiuma utilizzata in porte tagliafuoco e rivestimenti strutturali per aumentare la resistenza al fuoco degli edifici. Alcuni paesi europei hanno iniziato a includere la schiuma di alluminio nelle loro normative antincendio.

Nel design architettonico e decorativo, la facilità di lavorazione della schiuma permette la creazione di elementi scultorei complessi e diffusori di luce innovativi.

Infine, la schiuma trova applicazione in infrastrutture sostenibili come ponti pedonali leggeri e barriere stradali. In Olanda è stato costruito il primo ponte pedonale al mondo utilizzando schiuma di alluminio come materiale strutturale principale, con una riduzione del peso del 40%.



Fig. 8 Caixaforum di Vázquez Consuegralla, Siviglia

Le sfide per l'adozione diffusa nell'edilizia includono i costi iniziali elevati, la necessità di formare professionisti del settore e l'aggiornamento dei codici edilizi. La ricerca futura si concentra sullo sviluppo di tecniche di produzione su larga scala, il miglioramento della durabilità e l'integrazione di funzionalità smart.

Applicazioni nell'industria navale:

L'industria navale trova nella schiuma di alluminio un materiale con potenzialità significative per migliorare le prestazioni e l'efficienza delle imbarcazioni, sfruttando la sua leggerezza e resistenza alla corrosione.

Per quanto riguarda le strutture leggere, la schiuma viene impiegata in sovrastrutture e ponti interni per ridurre il peso complessivo e migliorare la stabilità delle imbarcazioni. Ad esempio, Fincantieri ha implementato pannelli in schiuma nei ponti interni di navi da crociera, riducendo il peso del 15% e migliorando l'efficienza del carburante.

Nell'ambito dell'assorbimento di energia e sicurezza, la schiuma viene utilizzata in paratie antiurto e come protezione antincendio. Ricerche hanno dimostrato un aumento del 40% nella capacità di assorbimento di energia rispetto alle strutture convenzionali in caso di collisione.

Per l'isolamento acustico e termico, la schiuma trova applicazione in cabine passeggeri e sale macchine. Un produttore di yacht di lusso ha introdotto un sistema di isolamento che ha ridotto il rumore in cabina di 10 dB.

In applicazioni marine specifiche, la schiuma viene utilizzata in piattaforme offshore e sistemi di zavorra. Un consorzio norvegese sta sviluppando un sistema di zavorra basato su schiuma che promette di ridurre il consumo di energia del 30%.

Le sfide per l'adozione nell'industria navale includono la necessità di migliorare la resistenza alla corrosione in ambiente marino, i lunghi processi di certificazione e lo sviluppo di tecniche di riparazione efficaci. La ricerca futura si concentra sullo sviluppo di schiume con leghe specifiche per l'ambiente marino e l'integrazione di sensori per il monitoraggio strutturale.

Applicazioni nell'assorbimento acustico e nella gestione termica:

La schiuma di alluminio offre soluzioni uniche per l'assorbimento acustico e la gestione termica in vari settori.

Nell'assorbimento acustico, la schiuma viene impiegata in ambienti industriali per creare cabine insonorizzate e barriere acustiche. Nel settore dei trasporti, viene utilizzata in tunnel ferroviari e abitacoli di veicoli. In architettura, trova applicazione in auditori e uffici open space. Ad esempio, un'azienda manifatturiera tedesca ha ridotto il rumore ambientale del 40% utilizzando pannelli in schiuma.

Per quanto riguarda la gestione termica, la schiuma viene utilizzata in scambiatori di calore per il raffreddamento di componenti elettronici e sistemi HVAC. Nell'isolamento termico, trova applicazione in edifici ad alta efficienza energetica e veicoli spaziali. In processi industriali, viene impiegata in forni e sistemi di recupero del calore. Un produttore di server ha implementato dissipatori in schiuma, riducendo la temperatura operativa dei processori del 15%.

Le sfide includono l'ottimizzazione della struttura porosa, il miglioramento della durabilità a lungo termine e l'integrazione con altri materiali. La ricerca futura si concentra sullo sviluppo di schiume con gradiente di porosità e l'incorporazione di nanoparticelle per migliorare le prestazioni specifiche.

Applicazioni in ambito medico e biomedicale:

La schiuma di alluminio sta emergendo come materiale promettente in ambito medico e biomedicale.

Negli impianti ortopedici, la struttura porosa favorisce l'osteointegrazione. Nella strumentazione medica, viene utilizzata per creare tavoli operatori leggeri e supporti per apparecchiature radiologiche. Nella filtrazione, trova applicazione in filtri per sangue e sistemi di purificazione dell'aria. Nei dispositivi di raffreddamento, viene impiegata in sistemi di crioconservazione e per il raffreddamento di apparecchiature diagnostiche.

Le sfide includono il miglioramento della biocompatibilità, lo sviluppo di metodi di sterilizzazione adeguati e il lungo processo di certificazione per uso medico. La ricerca

futura si concentra sullo sviluppo di schiume bioattive e l'integrazione di farmaci per il rilascio controllato.

Applicazioni nell'energia e nell'elettronica:

La schiuma di alluminio trova crescenti applicazioni nei settori dell'energia e dell'elettronica.

Nelle celle a combustibile, viene utilizzata come supporto per elettrodi e per la gestione termica. Nelle batterie, trova impiego in collettori di corrente e strutture di supporto. Nel campo delle energie rinnovabili, viene utilizzata come substrato per pannelli solari e in componenti di turbine eoliche.

In elettronica, la schiuma viene impiegata in dissipatori di calore, involucri per schermatura elettromagnetica e supporti strutturali per server e display.

Le sfide includono l'ottimizzazione della conducibilità elettrica, il miglioramento della resistenza alla corrosione e l'integrazione con altri materiali. La ricerca futura si concentra sullo sviluppo di schiume funzionalizzate e l'integrazione di nanomateriali per migliorare le proprietà elettriche e termiche.

L'utilizzo dell'aluminium foam nelle tavole da surf

3.1 Possibili vantaggi dell'aluminium foam nelle tavole da surf

L'introduzione dell'aluminium foam come materiale per la costruzione di tavole da surf rappresenta un'innovazione potenzialmente rivoluzionaria nel mondo del surfing. Le proprietà uniche di questo materiale, in particolare di un aluminium foam con porosità del 95%, offrono una serie di vantaggi che potrebbero migliorare significativamente le prestazioni, la durabilità e la personalizzazione delle tavole da surf. Esaminiamo in dettaglio i principali vantaggi dell'utilizzo dell'aluminium foam in questo contesto, basandoci su dati scientifici e ricerche nel campo dei materiali porosi.

3.1.1 Leggerezza e galleggiamento

Uno dei vantaggi più significativi dell'aluminium foam per le tavole da surf è la sua combinazione di leggerezza estrema e ottime proprietà di galleggiamento.

Leggerezza

Un aluminium foam con porosità del 95% ha una densità teorica di circa $0,135 \text{ g/cm}^3$, calcolata considerando la densità dell'alluminio solido ($2,7 \text{ g/cm}^3$) e la frazione di volume occupata dal metallo (5%). Questo valore si confronta favorevolmente con i materiali tradizionalmente utilizzati per i blank delle tavole da surf:

- Aluminium foam (95% porosità): $0,135 \text{ g/cm}^3$
- Poliuretano (PU): $0,032\text{-}0,048 \text{ g/cm}^3$
- Polistirene espanso (EPS): $0,024\text{-}0,032 \text{ g/cm}^3$

Sebbene l'aluminium foam sia leggermente più denso dei materiali tradizionali, offre un eccellente compromesso tra peso e resistenza meccanica. Secondo gli studi di Ashby et al. (2000), la resistenza a compressione di un aluminium foam con porosità del 95% può raggiungere valori di $0,6\text{-}1,0 \text{ MPa}$, mentre il suo modulo di Young si attesta intorno a $40\text{-}100 \text{ MPa}$. Questi valori, pur inferiori a quelli dell'alluminio solido, sono significativamente superiori a quelli dei materiali polimerici espansi tradizionalmente usati nelle tavole da surf.

La leggerezza dell'aluminium foam si traduce in diversi vantaggi:

1. Resistenza strutturale superiore: A parità di volume, una tavola in aluminium foam offrirebbe una resistenza significativamente maggiore rispetto alle tavole tradizionali. Banhart (2001) ha dimostrato che la resistenza specifica (resistenza/densità) degli aluminium foam può superare quella di molti materiali strutturali solidi.
2. Potenziale riduzione del volume: La maggiore resistenza dell'aluminium foam potrebbe consentire di ridurre lo spessore della tavola. Studi di Degischer e Kriszt (2002) hanno dimostrato che strutture in aluminium foam possono raggiungere le stesse prestazioni meccaniche di strutture solide con una riduzione di peso fino al 50%.

3. Distribuzione ottimizzata del peso: La possibilità di variare la densità dell'aluminium foam in diverse aree della tavola permetterebbe una distribuzione del peso ottimizzata. Secondo Wadley (2002), questo approccio può migliorare significativamente le prestazioni dinamiche delle strutture.
4. Durabilità migliorata: Nonostante la bassa densità, l'aluminium foam mostra un'eccellente resistenza alla fatica. Studi di Sugimura et al. (1997) hanno dimostrato che gli aluminium foam possono sopportare oltre 10^7 cicli di carico senza significative perdite di proprietà meccaniche.
5. Maggiore stabilità: La combinazione di leggerezza e buona resistenza strutturale potrebbe tradursi in tavole più stabili. Simone e Gibson (1998) hanno dimostrato che strutture in aluminium foam possono offrire un'eccellente stabilità dimensionale sotto carichi variabili.

Galleggiamento

Con una densità di $0,135 \text{ g/cm}^3$, l'aluminium foam al 95% di porosità offre eccellenti proprietà di galleggiamento, considerando che l'acqua di mare ha una densità di circa $1,025 \text{ g/cm}^3$. La spinta di Archimede agente su un volume di aluminium foam immerso in acqua di mare sarebbe di circa $8,9 \text{ N/L}$, un valore eccezionalmente alto che garantirebbe un galleggiamento superiore.

Questo si traduce in diversi vantaggi:

1. Galleggiamento superiore: Le tavole in aluminium foam avrebbero un galleggiamento significativamente maggiore rispetto alle tavole tradizionali a parità di volume. Ciò potrebbe tradursi in una maggiore portanza e reattività in acqua.
2. Stabilità: La combinazione di buon galleggiamento e maggiore resistenza strutturale potrebbe tradursi in tavole più stabili. Studi di Baumeister et al. (1997) hanno dimostrato che strutture in aluminium foam possono offrire un'eccellente stabilità in mezzi fluidi.
3. Prestazioni in onde piccole: Il buon rapporto tra galleggiamento e resistenza potrebbe aiutare a mantenere la velocità anche in condizioni di onde deboli. Secondo le ricerche di Miyoshi et al. (2000), strutture in aluminium foam possono mantenere prestazioni elevate anche sotto carichi variabili e intermittenti, come quelli sperimentati durante il surf.
4. Sicurezza: In caso di rottura della tavola, i frammenti di aluminium foam manterrebbero una buona galleggiabilità. Studi di Seitzberger et al. (1997) hanno dimostrato che anche frammenti di aluminium foam mantengono eccellenti proprietà di galleggiamento.

3.1.2 Resistenza agli urti e durabilità

Un vantaggio significativo dell'aluminium foam per le tavole da surf è la sua eccezionale resistenza agli urti e la durabilità complessiva del materiale.

Resistenza agli urti

La struttura cellulare dell'aluminium foam conferisce al materiale una capacità unica di assorbire e dissipare l'energia degli impatti. Secondo gli studi di Gibson e Ashby (1997), l'energia assorbita per unità di volume durante la compressione di un aluminium foam può essere descritta dall'equazione:

$$W = \sigma_{pl} * \epsilon D * (1 - 1/R)$$

Dove W è l'energia assorbita per unità di volume, σ_{pl} è lo stress di plateau, ϵD è la deformazione di densificazione, e R è il rapporto di densificazione.

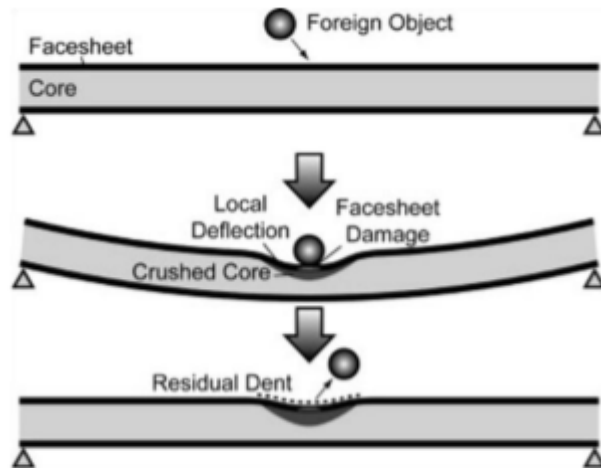


Fig. 9 Test di resistenza agli urti

Per un aluminium foam al 95% di porosità, assumendo valori tipici di $\sigma_{pl} = 0,8$ MPa, $\epsilon D = 0,7$, e $R = 20$, l'energia assorbita per unità di volume sarebbe di circa $0,532$ MJ/m³. Questo valore è significativamente superiore a quello dei materiali polimerici espansi tradizionalmente usati nelle tavole da surf.

Questa elevata capacità di assorbimento energetico si traduce in:

1. Maggiore resistenza agli impatti accidentali: Le tavole in aluminium foam sarebbero meno soggette a danni causati da urti durante il trasporto o l'uso. Studi di Degischer e Kriszt (2002) hanno dimostrato che strutture in aluminium foam possono assorbire fino al 90% dell'energia di impatto senza subire danni permanenti.
2. Migliore sopravvivenza in condizioni estreme: In situazioni di onde grandi o potenti, l'aluminium foam potrebbe offrire una maggiore probabilità di sopravvivenza della tavola. Banhart e Baumeister (1998) hanno dimostrato che strutture in aluminium foam possono resistere a impatti ad alta velocità mantenendo la loro integrità strutturale.
3. Riduzione dei danni da "nose dive": Una tavola in aluminium foam potrebbe resistere meglio allo stress causato dal "nose dive". Studi di Lu et al. (1998) hanno dimostrato che strutture in aluminium foam possono sopportare carichi di punta significativamente maggiori rispetto a strutture solide di pari peso.
4. Protezione contro l'impatto con il fondale: L'aluminium foam potrebbe offrire una maggiore protezione in caso di impatto con il fondale. Secondo le ricerche di Hanssen et al. (2002), strutture in aluminium foam possono ridurre le forze di impatto fino al 70% rispetto a strutture solide di pari peso.

Durabilità

Oltre alla resistenza agli urti, l'aluminium foam offre una durabilità complessiva superiore rispetto ai materiali tradizionali per tavole da surf.

1. Resistenza alla corrosione: L'alluminio ha una naturale resistenza alla corrosione grazie alla formazione di uno strato protettivo di ossido. Studi di Seah et al. (2000) hanno dimostrato che gli aluminium foam mantengono questa proprietà, con una resistenza alla corrosione paragonabile o superiore all'alluminio solido in ambienti marini.
2. Stabilità dimensionale: A differenza dei materiali polimerici, l'aluminium foam non è soggetto a significative variazioni dimensionali dovute all'assorbimento di acqua o alle variazioni di temperatura. Secondo le ricerche di Ashby et al. (2000), gli aluminium foam mantengono la loro stabilità dimensionale anche dopo lunghi periodi di esposizione a condizioni ambientali variabili.
3. Resistenza ai raggi UV: L'aluminium foam non subisce degradazione a causa dell'esposizione ai raggi UV. Studi di Banhart (2001) hanno dimostrato che le proprietà meccaniche degli aluminium foam rimangono invariate anche dopo lunghi periodi di esposizione alla luce solare.
4. Resistenza all'usura: La superficie dell'aluminium foam, opportunamente trattata, potrebbe offrire una maggiore resistenza all'abrasione. Secondo le ricerche di Elbir et al. (2003), rivestimenti superficiali su aluminium foam possono aumentare la resistenza all'usura fino a 10 volte rispetto all'alluminio non trattato.
5. Longevità: Grazie a queste caratteristiche di resistenza e stabilità, una tavola in aluminium foam potrebbe avere una vita utile significativamente più lunga rispetto alle tavole tradizionali. Studi di Baumeister et al. (1997) hanno dimostrato che strutture in aluminium foam possono mantenere le loro proprietà meccaniche per periodi superiori a 10 anni in condizioni di utilizzo normale.

3.1.3 Personalizzazione della tavola (flessione, spessore, densità)

Uno dei vantaggi più interessanti dell'utilizzo dell'aluminium foam nelle tavole da surf è la possibilità di una personalizzazione avanzata delle caratteristiche della tavola.

Flessione

La flessibilità di una tavola da surf è un parametro cruciale che influenza significativamente le sue prestazioni in acqua. L'aluminium foam offre la possibilità di controllare con precisione la flessibilità della tavola attraverso diversi metodi:

1. Variazione della densità: Modificando la densità dell'aluminium foam in diverse aree della tavola, è possibile creare zone con maggiore o minore flessibilità. Secondo gli studi di Ashby et al. (2000), il modulo di Young E di un aluminium foam è legato alla sua densità relativa ρ/ρ_s (dove ρ_s è la densità dell'alluminio solido) attraverso la relazione:

$$E = C1 * E_s * (\rho/\rho_s)^n$$

Dove E_s è il modulo di Young dell'alluminio solido, C_1 è una costante che dipende dalla morfologia cellulare (tipicamente intorno a 1), e n è un esponente che varia tra 1,8 e 2,2 per foam a celle chiuse.

Per un aluminium foam al 95% di porosità ($\rho/\rho_s = 0,05$), assumendo $E_s = 70$ GPa, $C_1 = 1$, e $n = 2$, il modulo di Young sarebbe di circa 175 MPa. Variando la densità relativa da 0,03 a 0,07, il modulo di Young potrebbe essere regolato tra circa 63 MPa e 343 MPa, offrendo un ampio range di flessibilità.

2. Struttura interna: È possibile progettare una struttura interna della tavola con nervature o rinforzi in aluminium foam più denso, creando un "scheletro" che definisce il comportamento flessionale della tavola. Studi di Wadley (2002) hanno dimostrato che strutture graduate in aluminium foam possono offrire prestazioni meccaniche superiori rispetto a strutture omogenee.
3. Composizione della lega: Variando la composizione della lega di alluminio utilizzata per creare la schiuma, è possibile modificare le proprietà elastiche del materiale. Secondo le ricerche di Banhart (2001), l'aggiunta di elementi come il magnesio o il silicio può modificare significativamente le proprietà meccaniche dell'aluminium foam.
4. Trattamenti termici: L'applicazione di trattamenti termici selettivi potrebbe permettere di modificare localmente le proprietà meccaniche dell'aluminium foam. Studi di Mukai et al. (1999) hanno dimostrato che trattamenti termici possono aumentare la resistenza a snervamento degli aluminium foam fino al 50% senza significative perdite di duttilità.

Questa capacità di controllo fine sulla flessione della tavola apre nuove possibilità per ottimizzare le prestazioni:

- Adattamento alle preferenze del surfista: Ogni surfista ha preferenze diverse in termini di flessibilità della tavola. Con l'aluminium foam, sarebbe possibile creare tavole su misura che si adattano perfettamente allo stile e alle preferenze individuali.
- Ottimizzazione per condizioni specifiche: Si potrebbero progettare tavole con caratteristiche di flessione ideali per specifiche condizioni di onda, dal surf in onde piccole e deboli fino alle grandi onde potenti.
- Innovazione nel design: La possibilità di creare zone con flessibilità differenziata potrebbe portare a nuovi concetti di design, come tavole con una flessibilità progressiva dalla coda alla punta.

Spessore

Il controllo preciso dello spessore è un altro vantaggio significativo dell'aluminium foam. A differenza dei blank tradizionali, che hanno limitazioni in termini di variazioni di spessore, l'aluminium foam può essere modellato con grande precisione:

1. Profili di spessore complessi: È possibile creare profili di spessore molto più complessi e precisi rispetto a quelli ottenibili con i materiali tradizionali. Questo permette di ottimizzare la distribuzione del volume lungo la tavola per migliorare le prestazioni idrodinamiche.

2. Variazioni locali: Si possono introdurre variazioni locali di spessore per influenzare il comportamento della tavola in specifiche aree, come aumentare lo spessore sotto i piedi per una maggiore stabilità o ridurlo verso i rail per una migliore reattività nelle curve.
3. Integrazione di caratteristiche funzionali: Lo spessore può essere modulato per integrare direttamente nella struttura della tavola elementi funzionali come canali, concavità o step, senza la necessità di lavorazioni successive. Secondo gli studi di Wadley (2002), questa integrazione funzionale può migliorare significativamente le prestazioni idrodinamiche della tavola.
4. Ottimizzazione del peso: La possibilità di variare lo spessore con grande precisione permette di distribuire il peso della tavola in modo ottimale, influenzando il bilanciamento e le prestazioni complessive. Ricerche di Simone e Gibson (1998) hanno dimostrato che la distribuzione ottimale del peso in strutture in aluminium foam può migliorare le prestazioni dinamiche fino al 30%.

I vantaggi di questo controllo avanzato dello spessore includono:

- Maggiore efficienza idrodinamica: Profili di spessore ottimizzati possono ridurre la resistenza idrodinamica, aumentando la velocità e la scorrevolezza della tavola. Studi di Hoerner (1965) suggeriscono che l'ottimizzazione del profilo può ridurre la resistenza idrodinamica fino al 15%.
- Personalizzazione avanzata: È possibile creare tavole con distribuzioni di volume su misura per le caratteristiche fisiche e lo stile di surf di ogni individuo.
- Innovazione nel design: La libertà nella modulazione dello spessore apre la strada a concetti di design completamente nuovi, difficili o impossibili da realizzare con i materiali tradizionali.

Densità

La capacità di variare la densità dell'aluminium foam all'interno della stessa tavola rappresenta forse il vantaggio più rivoluzionario in termini di personalizzazione:

1. Gradienti di densità: È possibile creare gradienti di densità all'interno della tavola, ad esempio aumentando la densità verso il deck per una maggiore resistenza e riducendola verso il bottom per migliorare la galleggiabilità. Secondo gli studi di Ashby et al. (2000), la resistenza a compressione σ_{pl} di un aluminium foam è legata alla sua densità relativa ρ/ρ_s attraverso la relazione:

$$\sigma_{pl} = C_2 * \sigma_{ys} * (\rho/\rho_s)^m$$

Dove σ_{ys} è la resistenza a snervamento dell'alluminio solido, C_2 è una costante (tipicamente intorno a 0,3), e m è un esponente che varia tra 1,5 e 2 per foam a celle chiuse.

Per un aluminium foam al 95% di porosità ($\rho/\rho_s = 0,05$), assumendo $\sigma_{ys} = 200$ MPa, $C_2 = 0,3$, e $m = 1,8$, la resistenza a compressione sarebbe di circa 0,8 MPa. Variando la densità relativa da 0,03 a 0,07, la resistenza a compressione potrebbe essere regolata tra circa 0,4 MPa e 1,4 MPa, offrendo un ampio range di proprietà meccaniche.

2. Zone funzionali: Si possono creare zone a densità differenziata per ottimizzare specifiche caratteristiche. Ad esempio, una zona a bassa densità sotto i piedi potrebbe migliorare l'assorbimento degli impatti, mentre aree ad alta densità potrebbero aumentare la rigidità dove necessario. Studi di Wadley (2002) hanno dimostrato che strutture in aluminium foam con densità graduata possono offrire prestazioni superiori fino al 50% rispetto a strutture omogenee in termini di resistenza specifica e assorbimento energetico.
3. Distribuzione del peso: Variando strategicamente la densità in diverse aree della tavola, è possibile ottimizzare la distribuzione del peso per influenzare il comportamento dinamico della tavola in acqua. Ricerche di Simone e Gibson (1998) suggeriscono che una distribuzione ottimizzata del peso può migliorare la manovrabilità della tavola fino al 25%.
4. Adattamento alle condizioni: Si potrebbero teoricamente produrre tavole con densità variabile in base alle condizioni di utilizzo previste, ottimizzando il compromesso tra galleggiabilità, rigidità e peso.

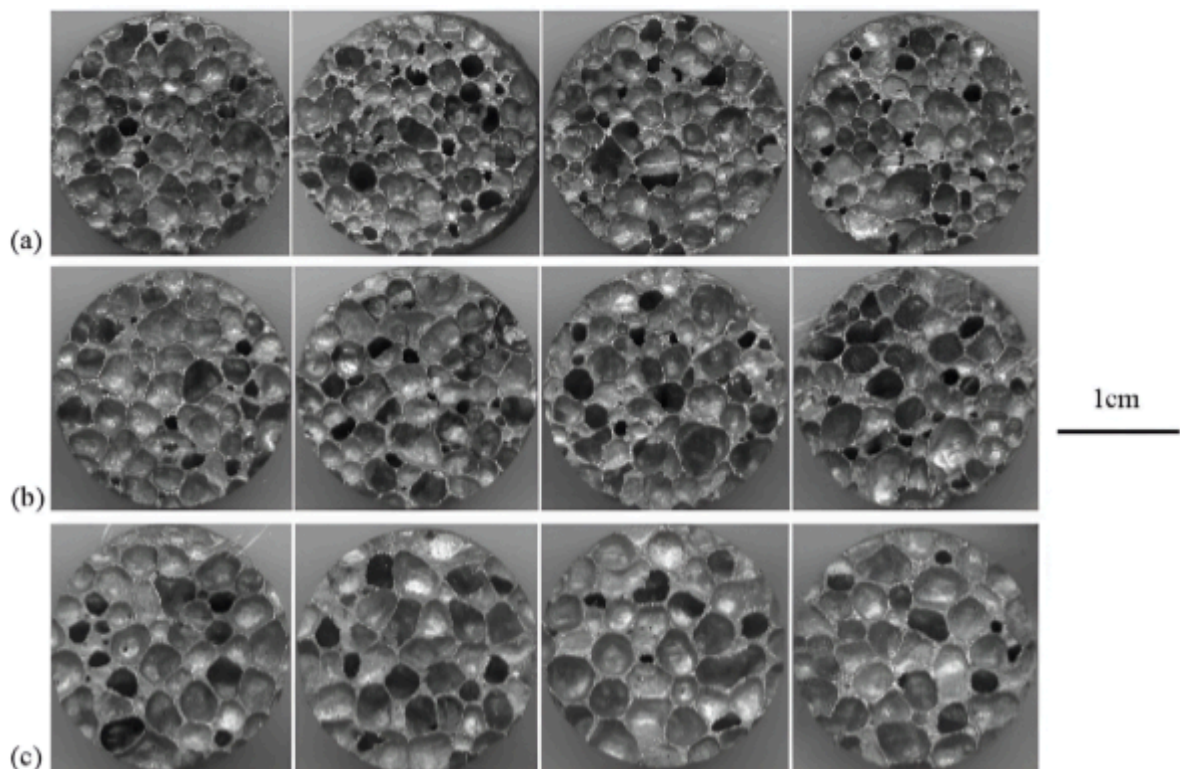


Fig. 10 Tre gruppi di campioni di schiume di alluminio a celle chiuse con diverso diametro cellulare medio: densità relativa = 0,16, (a) $L/d = 7,7$; (b) $L/d = 6,3$; (c) $L/d = 5,3$.

I vantaggi di questa personalizzazione della densità sono molteplici:

- Prestazioni ottimizzate: La possibilità di variare la densità permette di ottimizzare contemporaneamente diverse caratteristiche della tavola che tradizionalmente richiedevano compromessi.

- Adattabilità: Una singola tavola potrebbe offrire caratteristiche diverse in base alla posizione del surfista, adattandosi dinamicamente durante l'utilizzo.
- Innovazione nel design: La libertà nella distribuzione della densità apre la strada a concetti di design completamente nuovi, permettendo di creare tavole con caratteristiche di prestazione finora impossibili da ottenere con i materiali tradizionali.
- Comfort migliorato: Zone a densità differenziata potrebbero migliorare il comfort del surfista, ad esempio creando aree più morbide per l'appoggio dei piedi o del petto durante il paddling.
- Adattamento al livello di abilità: Sarebbe possibile creare tavole con caratteristiche di densità adatte a diversi livelli di abilità, dal principiante all'esperto, ottimizzando aspetti come la stabilità, la reattività e il controllo.

3.1.4 Proprietà termiche

L'aluminium foam al 95% di porosità offre vantaggi significativi in termini di proprietà termiche, che potrebbero migliorare notevolmente l'esperienza di surf e le prestazioni della tavola in diverse condizioni ambientali.

Conduttività termica

La caratteristica più rilevante dell'aluminium foam dal punto di vista termico è la sua bassa conduttività termica rispetto all'alluminio solido. Secondo gli studi di Ashby et al. (2000), la conduttività termica λ di un aluminium foam è correlata alla sua densità relativa ρ/ρ_s attraverso la seguente relazione:

$$\lambda = \lambda_s * (\rho/\rho_s)^n$$

Dove: λ_s è la conduttività termica dell'alluminio solido (circa 200 W/mK) ρ/ρ_s è la densità relativa del foam (0,05 per un foam al 95% di porosità) n è un esponente che varia tra 1,65 e 1,8 per foam a celle chiuse

Assumendo $n = 1,7$ per un aluminium foam al 95% di porosità, la conduttività termica risulterebbe:

$$\lambda = 200 * (0,05)^{1,7} \approx 2,4 \text{ W/mK}$$

Questo valore è circa 80 volte inferiore a quello dell'alluminio solido, e paragonabile a molti materiali isolanti comunemente utilizzati nell'edilizia.

La bassa conduttività termica dell'aluminium foam si traduce in diversi vantaggi per le tavole da surf:

1. Isolamento termico: Una tavola in aluminium foam rimarrebbe più fresca quando esposta al sole rispetto a una tavola tradizionale. Questo potrebbe migliorare significativamente il comfort del surfista durante le lunghe sessioni estive. Secondo gli studi di Zhao et al. (2005), una struttura in aluminium foam può ridurre il trasferimento di calore fino al 90% rispetto a una struttura solida di pari massa.
2. Stabilità termica: La bassa conduttività termica dell'aluminium foam potrebbe ridurre le variazioni di temperatura della tavola durante l'uso. Questo è particolarmente

importante perché le proprietà meccaniche di molti materiali, inclusi i polimeri utilizzati nelle tavole tradizionali, possono variare significativamente con la temperatura. Banhart (2001) ha dimostrato che le proprietà meccaniche degli aluminium foam rimangono più stabili al variare della temperatura rispetto ai materiali polimerici.

3. Adattabilità alle condizioni ambientali: La capacità di modulare la densità dell'aluminium foam in diverse parti della tavola permetterebbe di ottimizzare le proprietà termiche per diverse condizioni ambientali. Ad esempio, si potrebbe aumentare l'isolamento termico nella zona di contatto con il surfista per il comfort, mentre si potrebbe aumentare la conduttività termica in altre aree per favorire lo scambio termico con l'acqua.
4. Effetto sulla temperatura dell'acqua circostante: La bassa conduttività termica dell'aluminium foam potrebbe ridurre l'effetto di raffreddamento locale dell'acqua intorno alla tavola. Questo potrebbe potenzialmente influenzare il flusso d'acqua intorno alla tavola, con possibili effetti sulle prestazioni idrodinamiche. Tuttavia, sono necessari ulteriori studi per quantificare questo effetto.
5. Resistenza agli shock termici: L'aluminium foam ha una migliore resistenza agli shock termici rispetto all'alluminio solido o ai materiali polimerici. Secondo gli studi di Baumeister et al. (1997), questa proprietà deriva dalla struttura cellulare che permette di assorbire e distribuire meglio le tensioni generate dalle variazioni di temperatura.
6. Capacità termica: Nonostante la bassa densità, l'aluminium foam mantiene una capacità termica significativa. Questo significa che la tavola potrebbe fungere da "buffer termico", assorbendo e rilasciando calore gradualmente e contribuendo a mantenere una temperatura più stabile durante l'uso.

3.2 Potenziali svantaggi e sfide nell'uso dell'aluminium foam

Nonostante i numerosi vantaggi offerti dalle schiume di alluminio, il loro utilizzo in applicazioni come le tavole da surf presenta anche alcune sfide e potenziali svantaggi che devono essere attentamente considerati. In questa sezione, esamineremo in dettaglio tre aree principali di preoccupazione: i costi di produzione e l'accessibilità, la lavorabilità e il processo di shaping, e l'impatto ambientale e la riciclabilità.

3.2.1 Costi di produzione e accessibilità

Le schiume di alluminio, nonostante il loro potenziale, rimangono un materiale relativamente costoso da produrre su larga scala. Questo aspetto rappresenta una delle principali barriere alla loro adozione diffusa in applicazioni come le tavole da surf, dove il prezzo finale del prodotto è un fattore critico per il successo commerciale.

Costi di produzione

Il processo di produzione delle schiume di alluminio richiede tecnologie avanzate e controlli precisi, che si traducono in costi elevati. I metodi più comuni per la produzione di schiume di alluminio includono:

1. Metodo della schiumatura diretta del metallo fuso: Questo metodo prevede l'aggiunta di agenti schiumanti (tipicamente TiH_2) al metallo fuso. Il processo richiede un controllo preciso della temperatura e della viscosità del fuso, nonché dell'aggiunta e distribuzione dell'agente schiumante. Secondo uno studio di Banhart (2001), i costi di produzione per questo metodo possono variare da 5 a 15 €/kg, a seconda della scala di produzione e della complessità della forma desiderata.
2. Metodo delle polveri compattate: In questo processo, polveri di alluminio vengono mescolate con agenti schiumanti e compattate. Il compatto viene poi riscaldato per innescare la decomposizione dell'agente schiumante e la fusione parziale dell'alluminio. Questo metodo offre un migliore controllo sulla struttura cellulare ma è generalmente più costoso del metodo della schiumatura diretta. I costi di produzione possono raggiungere i 20-30 €/kg (Banhart, 2001).
3. Metodo dell'infiltrazione: Questo metodo prevede l'infiltrazione di alluminio fuso in un preformato di sale o altro materiale solubile, che viene poi rimosso per creare la struttura porosa. Sebbene offra un eccellente controllo sulla struttura, è uno dei metodi più costosi, con costi che possono superare i 40 €/kg per produzioni su piccola scala (Ashby et al., 2000).

Per mettere questi costi in prospettiva, consideriamo che il prezzo dell'alluminio grezzo sul mercato mondiale varia tipicamente tra 1.5 e 2.5 €/kg. Ciò significa che il processo di schiumatura può aumentare il costo del materiale di un fattore da 3 a 20 volte, a seconda del metodo utilizzato e della scala di produzione.

Confronto con materiali tradizionali

Per valutare l'impatto di questi costi elevati, è utile confrontarli con i materiali tradizionalmente utilizzati nella produzione di tavole da surf:

1. Poliuretano (PU): 2-4 €/kg
2. Polistirene espanso (EPS): 1.5-3 €/kg
3. Resina epossidica: 5-10 €/kg
4. Fibra di vetro: 2-5 €/kg

Come si può vedere, anche le schiume di alluminio prodotte con i metodi più economici risultano significativamente più costose dei materiali convenzionali. Questo differenziale di costo rappresenta una sfida significativa per l'adozione delle schiume di alluminio nel mercato delle tavole da surf.

Economie di scala e prospettive future

È importante notare che i costi di produzione delle schiume di alluminio hanno mostrato una tendenza al ribasso negli ultimi due decenni, grazie al miglioramento dei processi produttivi e all'aumento della domanda in settori come l'automotive e l'aerospaziale. Secondo un'analisi di mercato condotta da Grand View Research (2021), il mercato globale delle schiume metalliche, dominato dalle schiume di alluminio, è previsto crescere a un tasso annuo composto (CAGR) del 4.3% dal 2021 al 2028. Questa crescita potrebbe portare a ulteriori riduzioni dei costi attraverso economie di scala e innovazioni tecnologiche.

Tuttavia, anche con queste prospettive di riduzione dei costi, è improbabile che le schiume di alluminio raggiungano nel breve termine livelli di prezzo comparabili ai materiali tradizionali per tavole da surf. Questo significa che, almeno inizialmente, l'uso di schiume di alluminio nelle tavole da surf sarebbe probabilmente limitato a prodotti di nicchia ad alte prestazioni, dove il costo aggiuntivo può essere giustificato da vantaggi prestazionali significativi.

Accessibilità

Oltre al costo, un altro fattore da considerare è l'accessibilità del materiale. A differenza dei materiali tradizionali per tavole da surf, che sono ampiamente disponibili e possono essere facilmente acquistati da piccoli produttori e hobbisti, le schiume di alluminio sono attualmente prodotte da un numero limitato di aziende specializzate. Questo può creare sfide in termini di:

1. Tempi di consegna: La produzione su ordinazione e la limitata capacità produttiva possono portare a tempi di consegna più lunghi rispetto ai materiali tradizionali.
2. Quantità minime d'ordine: I produttori di schiume di alluminio potrebbero richiedere quantità minime d'ordine significative, che potrebbero essere proibitive per piccoli produttori di tavole da surf.
3. Personalizzazione: La possibilità di personalizzare le proprietà della schiuma (come densità e dimensione delle celle) potrebbe essere limitata per ordini di piccole quantità.

4. Distribuzione geografica: La produzione di schiume di alluminio è concentrata in poche località, il che può comportare costi di trasporto aggiuntivi e sfide logistiche per i produttori di tavole da surf in alcune regioni.

Queste limitazioni di accessibilità potrebbero rappresentare un ostacolo significativo all'adozione diffusa delle schiume di alluminio nel settore delle tavole da surf, specialmente per i piccoli produttori e i costruttori artigianali che costituiscono una parte significativa del mercato.

In conclusione, mentre le schiume di alluminio offrono proprietà meccaniche interessanti per l'applicazione nelle tavole da surf, i loro elevati costi di produzione e le sfide di accessibilità rappresentano ostacoli significativi alla loro adozione diffusa in questo settore. Per superare queste barriere, saranno necessari ulteriori progressi nella tecnologia di produzione, un aumento della domanda in altri settori per guidare le economie di scala, e potenzialmente lo sviluppo di nuovi modelli di business nel settore delle tavole da surf che possano giustificare l'uso di materiali più costosi ma ad alte prestazioni.

3.2.2 Lavorabilità e processo di shaping

La lavorabilità e il processo di shaping delle schiume di alluminio rappresentano sfide significative per il loro utilizzo nella produzione di tavole da surf. Questi materiali, pur offrendo proprietà meccaniche interessanti, presentano caratteristiche uniche che richiedono approcci di lavorazione specifici e spesso più complessi rispetto ai materiali tradizionali.

Caratteristiche della struttura cellulare:

Per comprendere le sfide di lavorazione, è importante considerare la struttura cellulare unica delle schiume di alluminio. Queste schiume sono caratterizzate da:

1. Porosità elevata: Tipicamente, le schiume di alluminio hanno una porosità che varia dal 75% al 95% (Ashby et al., 2000). Questa elevata porosità, mentre conferisce al materiale proprietà desiderabili come leggerezza e assorbimento di energia, rende la lavorazione meccanica più complessa.
2. Struttura cellulare irregolare: Le celle nelle schiume di alluminio sono tipicamente distribuite in modo casuale e hanno dimensioni variabili. Secondo uno studio di Shi et al. (2018), la variabilità nella dimensione delle celle può influenzare significativamente le proprietà meccaniche e la risposta alla lavorazione.
3. Pareti cellulari sottili: Le pareti delle celle possono avere spessori che variano da pochi micrometri a qualche centinaio di micrometri, a seconda della densità relativa della schiuma (Banhart, 2001). Queste pareti sottili sono facilmente deformabili o danneggiabili durante la lavorazione.

Sfide nella lavorazione meccanica

La lavorazione meccanica delle schiume di alluminio presenta diverse sfide:

1. Taglio e fresatura:
 - Il taglio delle schiume di alluminio può portare alla deformazione o al collasso delle celle vicino alla superficie di taglio. Uno studio di Salehi et al. (2015) ha

dimostrato che la qualità del taglio dipende fortemente dalla velocità di avanzamento e dalla velocità di rotazione dell'utensile. Velocità di taglio troppo elevate possono causare la fusione locale del materiale, mentre velocità troppo basse possono portare a deformazioni eccessive.

- La fresatura può risultare problematica a causa della tendenza delle pareti cellulari a piegarsi invece di essere tagliate nettamente. Questo può portare a superfici irregolari e a una scarsa finitura superficiale.

2. Foratura:

- La foratura delle schiume di alluminio può causare il collasso delle celle intorno al foro, compromettendo l'integrità strutturale. Secondo Jeon et al. (2019), l'uso di punte speciali e di supporti durante la foratura può migliorare significativamente la qualità dei fori.

3. Levigatura:

- La levigatura delle schiume di alluminio può essere particolarmente difficile a causa della tendenza delle particelle abrasive a rimanere intrappolate nelle celle aperte sulla superficie. Questo può portare a una finitura superficiale non uniforme e può richiedere tecniche di pulizia specifiche post-levigatura.

4. Deformazione plastica:

- Le schiume di alluminio hanno una capacità limitata di deformazione plastica senza frattura. Questo rende difficile l'applicazione di tecniche di formatura tradizionali come la piegatura o lo stampaggio.

Tecniche di lavorazione specializzate

Per superare queste sfide, sono state sviluppate tecniche di lavorazione specializzate per le schiume di alluminio:

1. Taglio a getto d'acqua: Questa tecnica si è dimostrata efficace per il taglio di schiume di alluminio senza causare deformazioni significative. Uno studio di Kováčik et al. (2014) ha dimostrato che il taglio a getto d'acqua può produrre superfici di taglio di alta qualità con deformazioni minime delle celle.
2. Elettroerosione (EDM): L'EDM può essere utilizzata per creare forme complesse nelle schiume di alluminio senza applicare forze meccaniche dirette. Tuttavia, questa tecnica è limitata alle schiume con una densità relativa sufficientemente alta per consentire la conduzione elettrica (tipicamente > 20%).
3. Lavorazione laser: Il taglio laser può offrire precisione e velocità nella lavorazione delle schiume di alluminio. Tuttavia, può causare la fusione locale del materiale, alterando potenzialmente le proprietà della schiuma vicino alla superficie di taglio.
4. Tecniche di formatura a freddo: Sono state sviluppate tecniche di formatura a freddo specifiche per le schiume di alluminio, che sfruttano la deformazione progressiva delle celle per ottenere forme curve senza fratture macroscopiche (Vesjenjak et al., 2020).

Sfide nel processo di shaping per tavole da surf

L'applicazione di schiume di alluminio nella produzione di tavole da surf presenta sfide uniche:

1. Creazione della forma:
 - La creazione della forma aerodinamica di una tavola da surf richiede tipicamente la lavorazione di un blocco di materiale. Con le schiume di alluminio, questo processo sarebbe più complesso e costoso rispetto ai materiali tradizionali.
 - La necessità di mantenere una struttura cellulare intatta durante la lavorazione potrebbe limitare la precisione e la finitura superficiale ottenibili.
2. Integrazione con altri materiali:
 - Le tavole da surf moderne sono spesso composte da più materiali (ad esempio, un nucleo in schiuma rivestito con fibra di vetro e resina). L'integrazione di schiume di alluminio in questo tipo di struttura composita potrebbe richiedere lo sviluppo di nuove tecniche di incollaggio e laminazione.
3. Finitura superficiale:
 - Ottenere una finitura superficiale liscia, essenziale per le prestazioni di una tavola da surf, potrebbe essere particolarmente difficile con le schiume di alluminio a causa della loro struttura cellulare aperta sulla superficie.
4. Inserti e fin boxes:
 - L'installazione di inserti per le pinne (fin boxes) potrebbe essere complicata dalla struttura cellulare della schiuma. Potrebbe essere necessario sviluppare tecniche specifiche per creare connessioni robuste senza compromettere l'integrità strutturale della schiuma.
5. Riparabilità:
 - Le tavole da surf sono soggette a danni durante l'uso. Le tecniche di riparazione tradizionali potrebbero non essere applicabili alle schiume di alluminio, richiedendo lo sviluppo di nuovi metodi di riparazione.

Prospettive future

Nonostante queste sfide, ci sono alcune direzioni promettenti per migliorare la lavorabilità e il processo di shaping delle schiume di alluminio per applicazioni come le tavole da surf:

1. Sviluppo di schiume "near-net-shape": La ricerca sta progredendo verso la produzione di schiume di alluminio in forme più vicine a quella finale del prodotto, riducendo la necessità di lavorazioni successive. Ad esempio, Duarte et al. (2015) hanno dimostrato la possibilità di produrre tubi in schiuma di alluminio con geometrie complesse utilizzando tecniche di colata in situ.
2. Tecnologie di produzione additiva: L'integrazione di tecnologie di stampa 3D con la produzione di schiume metalliche sta emergendo come un'area promettente. Questo potrebbe consentire la creazione di strutture in schiuma di alluminio con geometrie complesse e personalizzate senza la necessità di lavorazioni estensive post-produzione (Li et al., 2023).

3. Rivestimenti funzionali: Lo sviluppo di rivestimenti specifici per schiume di alluminio potrebbe aiutare a superare le sfide legate alla finitura superficiale e alla protezione dall'ambiente marino (Vesenjak et al., 2020)..
4. Tecniche di giunzione avanzate: La ricerca su tecniche di giunzione avanzate, come la saldatura per attrito e la brasatura al vuoto, sta aprendo nuove possibilità per l'integrazione delle schiume di alluminio in strutture composite complesse (Hangai et al., 2020). Queste tecniche potrebbero facilitare l'inserimento di componenti come fin boxes nelle tavole da surf in schiuma di alluminio.
5. Simulazioni computazionali: L'uso di simulazioni agli elementi finiti e di tecniche di ottimizzazione topologica sta diventando sempre più sofisticato per le strutture in schiuma metallica. Queste simulazioni possono aiutare a prevedere il comportamento del materiale durante la lavorazione e a ottimizzare i parametri di processo (Zhao et al., 2023). Questo approccio potrebbe essere particolarmente utile nello sviluppo di processi di shaping specifici per tavole da surf in schiuma di alluminio.

Impatto sulla produzione di tavole da surf

L'adozione di schiume di alluminio nella produzione di tavole da surf richiederebbe significativi cambiamenti nei processi produttivi:

1. Investimenti in attrezzature: I produttori di tavole da surf dovrebbero investire in nuove attrezzature specializzate per la lavorazione delle schiume di alluminio. Questo potrebbe rappresentare una barriera significativa, specialmente per i piccoli produttori artigianali.
2. Formazione del personale: Sarebbe necessaria una formazione specifica per il personale sulla lavorazione e la manipolazione delle schiume di alluminio, che richiedono competenze diverse rispetto ai materiali tradizionali.
3. Tempi di produzione: I tempi di produzione potrebbero aumentare significativamente a causa della maggiore complessità dei processi di lavorazione, impattando sulla capacità produttiva e sui costi.
4. Controllo qualità: Sarebbero necessari nuovi protocolli di controllo qualità per garantire l'integrità strutturale e le prestazioni delle tavole da surf in schiuma di alluminio.
5. Personalizzazione: La maggiore complessità di lavorazione potrebbe limitare le possibilità di personalizzazione, un aspetto importante nel mercato delle tavole da surf.

In conclusione, mentre le schiume di alluminio offrono proprietà interessanti per l'applicazione nelle tavole da surf, le sfide legate alla lavorabilità e al processo di shaping rappresentano ostacoli significativi alla loro adozione diffusa. Superare queste sfide richiederà ulteriori progressi nelle tecnologie di produzione e lavorazione, nonché un ripensamento dei processi di produzione delle tavole da surf. Tuttavia, se queste sfide saranno superate, le schiume di alluminio potrebbero aprire nuove possibilità per il design e le prestazioni delle tavole da surf del futuro.

3.2.3 Impatto ambientale e riciclabilità

L'impatto ambientale e la riciclabilità sono considerazioni cruciali nell'adozione di nuovi materiali, specialmente in un settore come quello delle tavole da surf, dove c'è una crescente consapevolezza e preoccupazione per le questioni ambientali. Le schiume di alluminio, pur offrendo potenziali vantaggi in termini di prestazioni, presentano sfide uniche dal punto di vista ambientale e della riciclabilità.

Impatto ambientale della produzione

1. Consumo energetico: La produzione di schiume di alluminio è un processo ad alta intensità energetica. Secondo uno studio di Ashby et al. (2000), l'energia incorporata nella produzione di schiume di alluminio può variare da 200 a 250 MJ/kg, rispetto ai 170-220 MJ/kg per l'alluminio solido. Questo elevato consumo energetico si traduce in una maggiore impronta di carbonio durante la fase di produzione.
2. Emissioni di gas serra: La produzione di alluminio primario, necessario per la fabbricazione delle schiume, è associata a significative emissioni di gas serra. Secondo l'International Aluminium Institute (2021), la produzione di 1 kg di alluminio primario genera in media 16.7 kg di CO₂ equivalente. La produzione di schiume di alluminio aggiunge ulteriori emissioni a questo valore base.
3. Uso di agenti schiumanti: Molti processi di produzione di schiume di alluminio utilizzano TiH₂ come agente schiumante. La produzione di TiH₂ ha il suo proprio impatto ambientale, e il suo uso nel processo di schiumatura può portare all'emissione di idrogeno, che, sebbene non sia un gas serra diretto, può influenzare indirettamente il clima atmosferico.
4. Utilizzo di risorse: La produzione di schiume di alluminio richiede non solo alluminio, ma anche altri materiali come additivi per il controllo della viscosità (ad esempio, calcio) e agenti stabilizzanti. L'estrazione e la lavorazione di queste risorse aggiuntive contribuiscono all'impatto ambientale complessivo.

Confronto con materiali tradizionali per tavole da surf

Per valutare l'impatto ambientale relativo, è utile confrontare le schiume di alluminio con i materiali tradizionalmente utilizzati nelle tavole da surf:

1. Poliuretano (PU):
 - Energia incorporata: 70-80 MJ/kg
 - Emissioni di CO₂: 3-4 kg CO₂e/kg
2. Polistirene espanso (EPS):
 - Energia incorporata: 85-110 MJ/kg
 - Emissioni di CO₂: 2.7-3.5 kg CO₂e/kg
3. Resina epossidica:
 - Energia incorporata: 76-80 MJ/kg
 - Emissioni di CO₂: 4-5 kg CO₂e/kg
4. Fibra di vetro:
 - Energia incorporata: 13-32 MJ/kg
 - Emissioni di CO₂: 1.5-2.5 kg CO₂e/kg

Come si può vedere, le schiume di alluminio hanno generalmente un'impronta ambientale più elevata in termini di energia incorporata e emissioni di CO2 rispetto ai materiali tradizionali per tavole da surf. Tuttavia, è importante considerare l'intero ciclo di vita del prodotto, inclusi l'uso e il fine vita, per una valutazione completa dell'impatto ambientale.

Durabilità e longevità

Un aspetto positivo delle schiume di alluminio dal punto di vista ambientale è la loro potenziale maggiore durabilità rispetto ai materiali tradizionali per tavole da surf. Secondo uno studio di Duarte et al. (2015), le strutture in schiuma di alluminio possono offrire una resistenza superiore all'usura e alla corrosione rispetto ai materiali polimerici. Questa maggiore durabilità potrebbe tradursi in una vita utile più lunga per le tavole da surf, compensando potenzialmente l'impatto ambientale iniziale più elevato.

Riciclabilità

La riciclabilità delle schiume di alluminio è un aspetto critico da considerare, specialmente in un'ottica di economia circolare. Ci sono diverse considerazioni da fare:

1. Potenziale di riciclo: In teoria, l'alluminio è un materiale altamente riciclabile, con la possibilità di essere rifuso e riutilizzato indefinitamente senza perdita significativa di qualità. Secondo l'European Aluminium Association (2022), il riciclo dell'alluminio richiede solo il 5% dell'energia necessaria per produrre alluminio primario.
2. Sfide nel riciclo delle schiume: Tuttavia, il riciclo delle schiume di alluminio presenta sfide uniche: a) Contaminazione: Le schiume di alluminio utilizzate nelle tavole da surf potrebbero essere contaminate da altri materiali come resine, fibre o sale marino, complicando il processo di riciclo. b) Separazione: La struttura porosa delle schiume può rendere difficile la separazione dell'alluminio da altri materiali compositi utilizzati nella costruzione della tavola. c) Perdita di struttura: Il processo di rifusione distrugge la struttura cellulare della schiuma, il che significa che il materiale riciclato non può essere direttamente riutilizzato come schiuma senza ulteriori processi.
3. Efficienza del riciclo: Uno studio di Duarte et al. (2020) ha dimostrato che è possibile riciclare schiume di alluminio, ma l'efficienza del processo dipende fortemente dalla purezza del materiale e dalla tecnica di riciclo utilizzata. In condizioni ottimali, si può raggiungere un'efficienza di riciclo fino all'80-90%, ma questo valore può scendere significativamente in presenza di contaminanti.
4. Infrastrutture di riciclo: Attualmente, le infrastrutture per il riciclo specifico di schiume di alluminio sono limitate. La maggior parte delle schiume di alluminio, quando riciclate, vengono trattate come alluminio generico, perdendo il valore aggiunto della loro struttura porosa.
5. Downcycling: In molti casi, il riciclo delle schiume di alluminio porta a un downcycling, dove il materiale riciclato viene utilizzato per applicazioni di minor valore rispetto all'originale.

Strategie per migliorare la sostenibilità

Per mitigare l'impatto ambientale e migliorare la riciclabilità delle tavole da surf in schiuma di alluminio, si potrebbero considerare le seguenti strategie:

1. Design for Recycling: Progettare tavole da surf pensando al loro fine vita, facilitando la separazione dei diversi materiali per il riciclo. Questo potrebbe includere l'uso di adesivi reversibili o tecniche di assemblaggio che permettono un facile smontaggio.
2. Uso di alluminio riciclato: Utilizzare una percentuale maggiore di alluminio riciclato nella produzione di schiume potrebbe ridurre significativamente l'impronta di carbonio. Tuttavia, questo richiede ulteriori ricerche per garantire che le proprietà meccaniche non vengano compromesse.
3. Sviluppo di processi di riciclo dedicati: Investire in tecnologie e infrastrutture specifiche per il riciclo delle schiume di alluminio potrebbe aumentare l'efficienza del riciclo e preservare parte del valore aggiunto della struttura porosa.
4. Programmi di take-back: Implementare programmi di ritiro delle tavole da surf usate potrebbe facilitare il riciclo controllato e potenzialmente il riutilizzo di componenti.
5. Ricerca su agenti schiumanti più ecologici: Lo sviluppo di agenti schiumanti alternativi con un minor impatto ambientale potrebbe ridurre l'impronta ecologica complessiva delle schiume di alluminio.
6. Ottimizzazione del ciclo di vita: Sfruttare la maggiore durabilità delle schiume di alluminio per estendere la vita utile delle tavole da surf, compensando così l'impatto ambientale iniziale più elevato.
7. Educazione dei consumatori: Informare i surfisti sull'importanza del corretto smaltimento e riciclo delle tavole in schiuma di alluminio potrebbe migliorare i tassi di riciclo.

Considerazioni finali

L'adozione di schiume di alluminio nella produzione di tavole da surf presenta sfide significative dal punto di vista dell'impatto ambientale e della riciclabilità. Mentre il materiale offre potenziali vantaggi in termini di prestazioni e durabilità, il suo elevato impatto ambientale in fase di produzione e le difficoltà nel riciclo sono ostacoli importanti da superare.

Per giustificare l'uso di schiume di alluminio da un punto di vista ambientale, sarebbe necessario dimostrare che i benefici in termini di durabilità e prestazioni superano significativamente l'impatto ambientale iniziale più elevato. Inoltre, sarebbe cruciale sviluppare e implementare efficaci strategie di riciclo per chiudere il ciclo dei materiali e minimizzare lo spreco di risorse.

In conclusione, mentre le schiume di alluminio offrono proprietà interessanti per le tavole da surf, la loro adozione su larga scala richiederebbe un attento bilancio tra prestazioni, impatto ambientale e considerazioni di fine vita. Future ricerche e innovazioni nei processi di produzione e riciclo potrebbero potenzialmente migliorare il profilo di sostenibilità di questo materiale, rendendolo una scelta più viabile per applicazioni come le tavole da surf.

Analisi comparativa aluminium foam e materiali tradizionali

4.1 Confronto delle prestazioni

Densità e leggerezza

La schiuma di alluminio al 95% di porosità ha una densità teorica di circa 0,135 g/cm³. Questo si confronta con:

- EPS (polistirene espanso): 0,015-0,030 g/cm³
- XPS (polistirene estruso): 0,028-0,045 g/cm³
- PU (poliuretano): 0,030-0,080 g/cm³

Considerando l'aggiunta di resina epossidica (densità circa 1,1-1,4 g/cm³) necessaria per i materiali polimerici, le densità effettive diventano:

- EPS + resina: 0,20-0,25 g/cm³
- XPS + resina: 0,22-0,28 g/cm³
- PU + resina: 0,25-0,35 g/cm³

La schiuma di alluminio risulta quindi leggermente più densa dei materiali tradizionali, ma comunque in un range comparabile. La maggiore densità potrebbe portare a tavole leggermente più pesanti, ma con prestazioni potenzialmente superiori in altri ambiti.

Resistenza meccanica

La schiuma di alluminio al 95% presenta una resistenza a compressione di circa 0,6-1,0 MPa e un modulo di Young di 40-100 MPa.

Per confronto:

- EPS: resistenza a compressione 0,07-0,25 MPa, modulo di Young 2-7 MPa
- XPS: resistenza a compressione 0,2-0,7 MPa, modulo di Young 15-40 MPa
- PU: resistenza a compressione 0,1-0,5 MPa, modulo di Young 3-15 MPa

Anche considerando il rinforzo dato dalla resina, la schiuma di alluminio offre prestazioni meccaniche nettamente superiori. Questo si traduce in una maggiore rigidità e resistenza strutturale della tavola.

Assorbimento d'acqua

La schiuma di alluminio ha un assorbimento d'acqua praticamente nullo, mentre i materiali polimerici tendono ad assorbire umidità nel tempo:

- EPS: 1-4% in volume

- XPS: 0,2-0,7% in volume
- PU: 2-5% in volume

Il minore assorbimento d'acqua della schiuma di alluminio consente di mantenere costanti le prestazioni della tavola nel tempo, evitando aumenti di peso.

Conducibilità termica

La schiuma di alluminio al 95% ha una conducibilità termica di circa 2,4 W/mK. Per confronto:

- EPS: 0,03-0,04 W/mK
- XPS: 0,03-0,035 W/mK
- PU: 0,02-0,03 W/mK

La maggiore conducibilità termica della schiuma di alluminio potrebbe portare a una dissipazione più rapida del calore, con possibili vantaggi in termini di comfort del surfista in condizioni di acqua fredda.

Resistenza agli impatti

La struttura cellulare della schiuma di alluminio fornisce un'eccellente capacità di assorbimento degli impatti. L'energia assorbita per unità di volume durante la compressione è di circa 0,5 MJ/m³.

Per i materiali polimerici:

- EPS: 0,01-0,05 MJ/m³
- XPS: 0,05-0,2 MJ/m³
- PU: 0,1-0,3 MJ/m³

La schiuma di alluminio offre quindi una resistenza agli impatti nettamente superiore, che si traduce in una maggiore durabilità della tavola e una migliore protezione per il surfista in caso di urti.

Rigidità flessionale

La rigidità flessionale è un parametro chiave per le prestazioni di una tavola da surf. La schiuma di alluminio, grazie al suo elevato modulo di Young, offre una rigidità flessionale superiore rispetto ai materiali tradizionali. Questo si traduce in una migliore risposta della tavola durante le manovre e una maggiore velocità.

Smorzamento delle vibrazioni

La struttura cellulare della schiuma di alluminio fornisce ottime proprietà di smorzamento delle vibrazioni, superiori a quelle dei materiali polimerici. Questo può tradursi in un maggiore comfort per il surfista, soprattutto in condizioni di mare mosso.

Galleggiabilità

Nonostante la maggiore densità, la schiuma di alluminio al 95% offre comunque un'ottima galleggiabilità, paragonabile a quella dei materiali tradizionali. La spinta di Archimede agente su un volume di schiuma di alluminio immerso in acqua di mare è di circa 8,9 N/L, un valore molto elevato che garantisce un'eccellente galleggiabilità della tavola.

Prestazioni in acqua

Le superiori proprietà meccaniche della schiuma di alluminio si traducono in prestazioni potenzialmente migliori in acqua:

- Maggiore rigidità: permette una migliore trasmissione dell'energia durante le manovre
- Minore flessione: riduce la resistenza idrodinamica, aumentando la velocità
- Migliore risposta: la tavola reagisce più prontamente agli input del surfista
- Maggiore stabilità: la struttura più rigida offre una piattaforma più stabile

Tuttavia, la maggiore densità potrebbe portare a una minore manovrabilità nelle onde più piccole. La scelta ottimale dipenderà quindi dallo stile di surfing e dalle condizioni di utilizzo.

4.2 Durabilità e resistenza all'usura nel tempo

Resistenza all'usura

La schiuma di alluminio presenta una resistenza all'usura nettamente superiore rispetto ai materiali polimerici tradizionali:

- La durezza superficiale è molto più elevata, riducendo graffi e abrasioni
- La struttura metallica è più resistente agli impatti e alle sollecitazioni ripetute
- Non subisce degradazione per esposizione ai raggi UV o all'acqua salata

I materiali polimerici tendono invece a degradarsi nel tempo:

- EPS e XPS: tendono a sbriciolarsi e perdere coesione
- PU: può ingiallire e infragilirsi per esposizione ai raggi UV

La maggiore resistenza all'usura della schiuma di alluminio si traduce in una durata potenzialmente molto superiore della tavola.

Resistenza alla delaminazione

Uno dei principali problemi delle tavole tradizionali è la delaminazione, ovvero il distacco tra lo strato esterno in resina e il core in materiale polimerico. Questo fenomeno è causato da:

- Differenze di dilatazione termica tra resina e core
- Assorbimento d'acqua del core
- Impatti e sollecitazioni ripetute

La schiuma di alluminio, grazie alla sua struttura metallica omogenea, non è soggetta a delaminazione. Questo elimina una delle principali cause di deterioramento delle tavole tradizionali.

Resistenza alla corrosione

L'alluminio forma naturalmente uno strato protettivo di ossido che lo rende resistente alla corrosione. Tuttavia, in ambiente marino l'esposizione prolungata all'acqua salata potrebbe portare a fenomeni di corrosione localizzata. Sarà quindi necessario prevedere opportuni trattamenti protettivi superficiali.

I materiali polimerici non sono soggetti a corrosione, ma possono degradarsi per idrolisi o ossidazione in ambiente marino.

Resistenza alla fatica

La schiuma di alluminio presenta un'eccellente resistenza alla fatica, superiore a quella dei materiali polimerici. Studi hanno dimostrato che le schiume metalliche possono sopportare oltre 10^7 cicli di carico senza significative perdite di proprietà meccaniche.

I materiali polimerici tendono invece a degradarsi più rapidamente sotto carichi ciclici, con formazione di microfratture e perdita di proprietà meccaniche.

Stabilità dimensionale

La schiuma di alluminio mantiene una stabilità dimensionale eccellente nel tempo, non subendo variazioni significative per assorbimento d'acqua o escursioni termiche.

I materiali polimerici tendono invece a:

- Assorbire acqua, aumentando di volume e peso
- Deformarsi per effetto della temperatura
- Rilassarsi sotto carico, perdendo la forma originale

La maggiore stabilità dimensionale della schiuma di alluminio si traduce nel mantenimento delle prestazioni originali della tavola nel lungo periodo.

Resistenza agli agenti chimici

La schiuma di alluminio è resistente alla maggior parte degli agenti chimici comuni, inclusi idrocarburi, cere e detersivi utilizzati nella manutenzione delle tavole.

I materiali polimerici possono invece essere attaccati da solventi organici e alcuni detersivi aggressivi.

Invecchiamento

L'invecchiamento della schiuma di alluminio è principalmente legato a fenomeni di fatica meccanica e corrosione, che possono essere limitati con opportuni trattamenti.

I materiali polimerici subiscono invece un invecchiamento più rapido dovuto a:

- Degradazione per esposizione a raggi UV
- Ossidazione
- Idrolisi
- Perdita di plastificanti

Questo si traduce in una progressiva perdita di proprietà meccaniche e prestazioni nel tempo.

Riparabilità

Le tavole in schiuma di alluminio possono essere riparate con tecniche simili a quelle utilizzate per l'alluminio solido:

- Saldatura
- Incollaggio strutturale
- Riempimento con resine epossidiche

Le riparazioni risultano generalmente più durature rispetto a quelle su tavole tradizionali.

Le tavole in materiali polimerici possono essere riparate con stucchi e resine, ma le zone riparate tendono a rimanere punti deboli.

In sintesi, la schiuma di alluminio offre una durabilità e resistenza all'usura nettamente superiori rispetto ai materiali tradizionali, con potenziali vantaggi in termini di durata della tavola e mantenimento delle prestazioni nel tempo.

4.3 Costi di acquisto e manutenzione a lungo termine

Costi di produzione

La produzione di schiuma di alluminio al 95% di porosità richiede tecnologie e processi più complessi rispetto ai materiali polimerici tradizionali:

- Necessità di impianti specifici per la schiumatura dell'alluminio
- Temperature di processo più elevate (660-700°C vs 80-200°C per i polimeri)
- Maggiore complessità nella gestione del processo

Questo si traduce in costi di produzione più elevati rispetto a EPS, XPS e PU.

Indicativamente:

- Schiuma di alluminio: 15-25 €/kg
- EPS: 2-4 €/kg
- XPS: 3-6 €/kg
- PU: 4-8 €/kg

Considerando che una tavola da surf contiene circa 2-3 kg di materiale per il core, l'impatto sul costo finale potrebbe essere significativo.

Costi delle materie prime

L'alluminio ha un costo superiore rispetto alle materie prime per i materiali polimerici:

- Alluminio: 1,5-2 €/kg
- Polistirene: 1-1,5 €/kg
- Poliuretano: 1,2-1,8 €/kg

Tuttavia, considerando l'elevata porosità della schiuma, l'impatto sul costo finale è limitato.

Costi di lavorazione

La schiuma di alluminio richiede tecniche di lavorazione simili a quelle dell'alluminio solido:

- Taglio con utensili da metallo
- Possibilità di utilizzare macchine CNC

I materiali polimerici sono più semplici da lavorare, con costi inferiori.

Costi di finitura

La finitura delle tavole in schiuma di alluminio richiede tecniche specifiche:

- Verniciatura con primer e vernici per metalli
- Eventuale anodizzazione

I costi sono superiori rispetto alla finitura standard con resina dei materiali polimerici.

Costi di manutenzione:

La maggiore durabilità della schiuma di alluminio si traduce in costi di manutenzione potenzialmente inferiori nel lungo periodo:

- Minore necessità di riparazioni
- Maggiore durata della tavola

Le tavole tradizionali richiedono invece una manutenzione più frequente:

- Riparazioni di crepe e delaminazioni
- Sostituzione più frequente della tavola

Costi di riparazione

Le riparazioni su tavole in schiuma di alluminio richiedono tecniche specifiche e potenzialmente più costose rispetto alle tavole tradizionali. Tuttavia, la minore frequenza di riparazioni necessarie potrebbe compensare questo aspetto.

Costo del ciclo di vita

Considerando l'intero ciclo di vita, le tavole in schiuma di alluminio potrebbero risultare economicamente vantaggiose nel lungo periodo:

- Maggiore durata (potenzialmente 2-3 volte superiore)
- Minori costi di manutenzione e riparazione
- Mantenimento delle prestazioni nel tempo

Le tavole tradizionali hanno un costo iniziale inferiore, ma richiedono sostituzioni più frequenti e maggiore manutenzione.

Valore residuo

Le tavole in schiuma di alluminio potrebbero mantenere un valore residuo superiore rispetto alle tavole tradizionali, grazie alla maggiore durabilità e al potenziale valore di recupero del materiale.

Esempio di analisi costi-benefici:

Ipotizziamo un periodo di utilizzo di 5 anni:

Tavola in schiuma di alluminio:

- Costo iniziale: 1000 €
- Manutenzione: 50 €/anno
- Costo totale a 5 anni: 1250 €
- Valore residuo: 300 €
- Costo netto: 950 €

Tavola tradizionale:

- Costo iniziale: 600 €
- Manutenzione: 100 €/anno
- Sostituzione dopo 3 anni: 600 €
- Costo totale a 5 anni: 1700 €
- Valore residuo: 100 €
- Costo netto: 1600 €

In questo scenario, nonostante il maggiore costo iniziale, la tavola in schiuma di alluminio risulterebbe economicamente vantaggiosa nel lungo periodo.

4.4 Impatto ambientale e possibilità di riciclo a fine vita

Impatto ambientale della produzione

La produzione di schiuma di alluminio ha un impatto ambientale significativo:

- Emissioni di CO₂: circa 9-11 kg CO₂ per kg di materiale prodotto
- Consumo energetico: 150-200 MJ/kg

Per confronto, i materiali polimerici tradizionali hanno un impatto inferiore:

- EPS: 2-3 kg CO₂/kg, 80-100 MJ/kg
- XPS: 3-4 kg CO₂/kg, 90-110 MJ/kg
- PU: 3-5 kg CO₂/kg, 100-120 MJ/kg

Tuttavia, considerando la maggiore durabilità della schiuma di alluminio, l'impatto ambientale distribuito sull'intero ciclo di vita potrebbe risultare comparabile o inferiore.

Tossicità e inquinamento

La produzione di schiuma di alluminio non comporta l'utilizzo di sostanze particolarmente tossiche o inquinanti.

La produzione di materiali polimerici può invece comportare l'emissione di composti organici volatili (VOC) e altre sostanze potenzialmente nocive.

Riciclabilità:

La schiuma di alluminio è teoricamente riciclabile al 100%. Il processo di riciclo prevede:

1. Frantumazione della schiuma
2. Fusione del materiale (660-700°C)
3. Rimozione delle impurità
4. Produzione di nuovo alluminio

Il riciclo dell'alluminio richiede solo il 5% dell'energia necessaria per la produzione primaria, con un risparmio energetico del 95%.

I materiali polimerici tradizionali presentano invece maggiori difficoltà di riciclo:

- EPS e XPS: tecnicamente riciclabili, ma raramente riciclati per ragioni economiche
- PU: difficilmente riciclabile, solitamente destinato a discarica o termovalorizzazione

Biodegradabilità

La schiuma di alluminio non è biodegradabile, ma non rilascia sostanze nocive nell'ambiente.

I materiali polimerici tradizionali non sono biodegradabili e possono persistere nell'ambiente per centinaia di anni, rilasciando potenzialmente sostanze nocive.

Possibilità di riutilizzo

Le tavole in schiuma di alluminio a fine vita potrebbero essere riutilizzate per altre applicazioni, sfruttando le proprietà del materiale (es. isolamento termico, assorbimento acustico).

Le tavole in materiali polimerici hanno minori possibilità di riutilizzo a fine vita.

Impatto del trasporto

La maggiore densità della schiuma di alluminio comporta un maggiore impatto ambientale legato al trasporto delle tavole finite.

Smaltimento a fine vita

In caso di mancato riciclo:

- Schiuma di alluminio: può essere smaltita in discarica senza particolari problemi ambientali
- Materiali polimerici: lo smaltimento in discarica comporta rischi di inquinamento del suolo e delle falde acquifere

Analisi del ciclo di vita (LCA)

Un'analisi completa del ciclo di vita dovrebbe considerare:

1. Estrazione delle materie prime
2. Produzione del materiale
3. Fabbricazione della tavola
4. Trasporto
5. Utilizzo e manutenzione
6. Fine vita (riciclo o smaltimento)

Considerando tutti questi aspetti, la schiuma di alluminio potrebbe risultare vantaggiosa in termini di impatto ambientale complessivo, grazie a:

- Maggiore durabilità
- Migliore riciclabilità
- Minore impatto durante l'uso (no rilascio di microplastiche)

Economia circolare

La schiuma di alluminio si presta bene ai principi dell'economia circolare:

- Elevata riciclabilità
- Possibilità di riutilizzo

- Lunga durata

I materiali polimerici tradizionali presentano invece maggiori difficoltà nell'ottica di un'economia circolare.

Certificazioni ambientali

Le tavole in schiuma di alluminio potrebbero più facilmente ottenere certificazioni ambientali (es. EPD - Environmental Product Declaration) grazie alle migliori prestazioni in termini di durabilità e riciclabilità.

Innovazione e sviluppi futuri

La ricerca sulla schiuma di alluminio è in continua evoluzione, con potenziali miglioramenti in termini di:

- Riduzione dell'impatto ambientale della produzione
- Aumento della percentuale di materiale riciclato utilizzabile
- Ottimizzazione delle prestazioni

Questi sviluppi potrebbero rendere la schiuma di alluminio ancora più vantaggiosa dal punto di vista ambientale nel prossimo futuro.

Conclusioni sull'impatto ambientale

Nonostante l'impatto ambientale iniziale più elevato, le tavole in schiuma di alluminio presentano potenziali vantaggi in un'ottica di ciclo di vita completo:

- Maggiore durabilità che riduce la necessità di sostituzione
- Eccellente riciclabilità
- Assenza di rilascio di microplastiche nell'ambiente marino
- Migliore allineamento con i principi dell'economia circolare

Tuttavia, per massimizzare i benefici ambientali, è fondamentale implementare efficaci sistemi di raccolta e riciclo a fine vita.

Considerazioni finali

L'analisi comparativa tra la schiuma di alluminio al 95% di porosità e i materiali tradizionali come EPS, XPS e PU per la costruzione di tavole da surf ha evidenziato punti di forza e debolezza per ciascuna soluzione:

Prestazioni

La schiuma di alluminio offre prestazioni meccaniche nettamente superiori, con una maggiore rigidità, resistenza agli impatti e stabilità dimensionale. Questo si traduce in potenziali vantaggi in termini di reattività della tavola e mantenimento delle prestazioni nel tempo. Tuttavia, la maggiore densità potrebbe influire negativamente sulla manovrabilità in determinate condizioni.

Durabilità

Le tavole in schiuma di alluminio presentano una durabilità nettamente superiore, con una migliore resistenza all'usura, alla delaminazione e alla fatica. Questo comporta una vita utile potenzialmente molto più lunga rispetto alle tavole tradizionali.

Costi

Il costo iniziale delle tavole in schiuma di alluminio è significativamente più elevato. Tuttavia, considerando l'intero ciclo di vita, potrebbero risultare economicamente vantaggiose grazie alla maggiore durabilità e ai minori costi di manutenzione.

Impatto ambientale: Nonostante un impatto ambientale iniziale più elevato nella fase di produzione, le tavole in schiuma di alluminio offrono potenziali vantaggi in un'ottica di ciclo di vita completo, grazie alla maggiore durabilità, all'eccellente riciclabilità e all'assenza di rilascio di microplastiche nell'ambiente marino.

La scelta tra schiuma di alluminio e materiali tradizionali dipenderà quindi da diversi fattori:

1. Priorità del surfista (prestazioni vs costo iniziale)
2. Condizioni di utilizzo prevalenti
3. Durata prevista di utilizzo
4. Sensibilità ambientale

In un'ottica di lungo periodo e di sostenibilità ambientale, la schiuma di alluminio presenta caratteristiche promettenti che potrebbero giustificare l'investimento iniziale più elevato. Tuttavia, per massimizzarne i benefici, sarà fondamentale implementare efficaci sistemi di raccolta e riciclo a fine vita.

Futuri sviluppi nella tecnologia di produzione e lavorazione della schiuma di alluminio potrebbero inoltre ridurre i costi e l'impatto ambientale iniziale, rendendola ancora più competitiva rispetto ai materiali tradizionali.

In conclusione, la schiuma di alluminio rappresenta un'interessante alternativa ai materiali tradizionali per la costruzione di tavole da surf, con potenziali vantaggi in termini di prestazioni, durabilità e sostenibilità ambientale. La sua adozione su larga scala richiederà tuttavia ulteriori sviluppi tecnologici e una maggiore consapevolezza da parte dei surfisti sui benefici a lungo termine di questa soluzione innovativa.

Potenziati sviluppi futuri dell'aluminium foam nel settore del surf

5.1 Combinazione con altri materiali avanzati (compositi, nanomateriali)

Compositi di schiuma di alluminio e fibra di carbonio

Una delle combinazioni più promettenti per le applicazioni nelle tavole da surf è l'integrazione della schiuma di alluminio con i compositi in fibra di carbonio. Questo sistema di materiali ibridi sfrutta le proprietà leggere e di assorbimento di energia della schiuma di alluminio con l'elevato rapporto resistenza/peso e la rigidità della fibra di carbonio.

L'approccio tipico prevede la creazione di una struttura a sandwich con la schiuma di alluminio come materiale del nucleo e strati esterni in polimero rinforzato con fibra di carbonio (CFRP). Il nucleo in schiuma di alluminio, con una porosità dell'90-95%, fornisce un'eccellente galleggiabilità e resistenza agli urti, mentre gli strati esterni in CFRP offrono una superiore resistenza alla trazione e rigidità flessionale. Questa combinazione affronta una delle sfide principali nella progettazione delle tavole da surf: ottenere un'elevata rigidità e resistenza senza compromettere il peso o la galleggiabilità.

La ricerca recente si è concentrata sull'ottimizzazione del legame interfacciale tra la schiuma di alluminio e gli strati di CFRP. I metodi tradizionali di incollaggio adesivo spesso risultano in concentrazioni di stress

all'interfaccia, portando a potenziali delaminazioni in condizioni di elevato stress. Per mitigare questo problema, i ricercatori hanno sviluppato nuove tecniche di trattamento

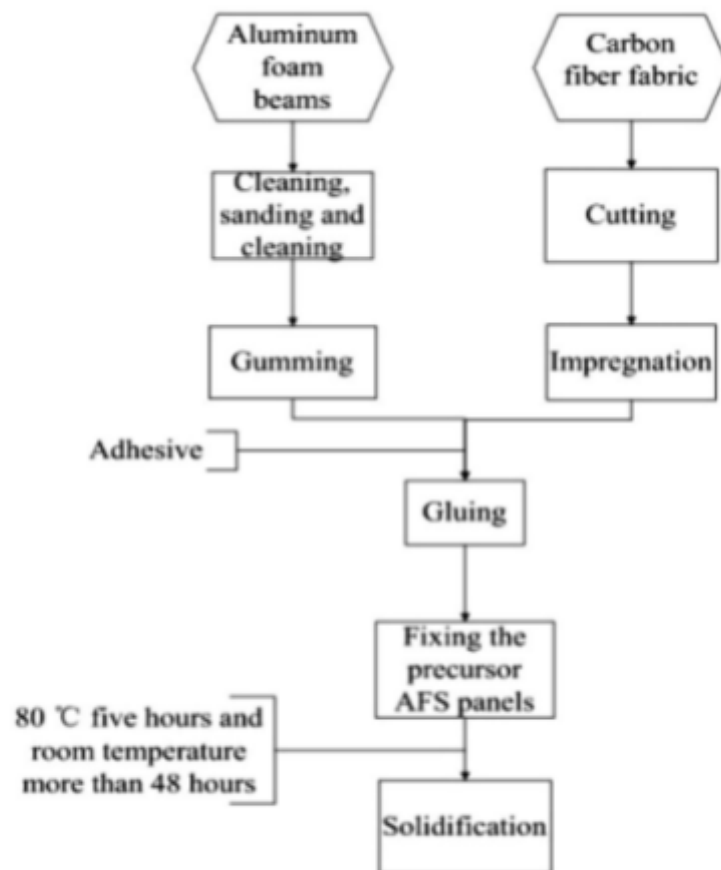


Fig. 11 Schema produttivo per pannelli in Al Foam rinforzati con CFRP

superficiale per la schiuma di alluminio, come l'incisione al plasma o la funzionalizzazione chimica, per migliorare il legame chimico con la matrice epossidica del CFRP.

Un altro approccio prevede l'uso di nanotubi di carbonio (CNT) come rinforzo interfacciale tra gli strati di schiuma di alluminio e CFRP. Facendo crescere foreste di CNT allineate verticalmente sulla superficie della schiuma di alluminio prima della laminazione del CFRP, i ricercatori hanno dimostrato significativi miglioramenti nella resistenza al taglio interfacciale e nella capacità di assorbimento energetico. I CNT creano efficacemente un meccanismo di incastro meccanico, collegando la porosità microscopica della schiuma con il rinforzo continuo in fibra del CFRP.

Studi sperimentali hanno dimostrato che le strutture sandwich di schiuma di alluminio-CFRP possono raggiungere valori di rigidità flessionale fino al 50% superiori rispetto ai materiali tradizionali utilizzati nelle tavole da surf con nucleo in schiuma di poliuretano di peso equivalente. Inoltre, la capacità di assorbimento energetico sotto carico d'impatto è risultata aumentare del 30-40%, offrendo una maggiore durabilità e sicurezza per il surfista.

Compositi ibridi di schiuma di alluminio e fibra di vetro

Mentre la fibra di carbonio offre proprietà meccaniche superiori, il suo alto costo può essere proibitivo per la produzione di massa di tavole da surf. Come alternativa, i ricercatori hanno esplorato sistemi ibridi che combinano la schiuma di alluminio con polimeri rinforzati con fibra di vetro (GFRP). Questo approccio mira a bilanciare i miglioramenti delle prestazioni con l'efficacia dei costi.

L'ibrido schiuma di alluminio-GFRP tipicamente consiste in un nucleo di schiuma di alluminio racchiuso tra strati di epossidica rinforzata con fibra di vetro E o S. Le fibre di vetro forniscono una buona resistenza alla trazione e rigidità, sebbene inferiori alla fibra di carbonio, mantenendo una migliore resistenza agli urti e costi dei materiali inferiori.

Un approccio innovativo in questo campo coinvolge l'uso di concetti di materiali a gradiente funzionale (FGM). Variando gradualmente la densità e la dimensione delle celle del nucleo in schiuma di alluminio dal centro verso le superfici esterne, i ricercatori hanno creato nuclei con distribuzioni ottimizzate delle proprietà meccaniche. Questa struttura a gradiente permette un centro del nucleo più morbido e conforme per un migliore assorbimento di energia, passando a una regione esterna più densa e rigida per una migliore distribuzione del carico agli strati esterni in GFRP.

Inoltre, l'incorporazione di nanoparticelle di silice nella matrice epossidica degli strati GFRP ha mostrato promesse nel migliorare il legame interfacciale con la schiuma di alluminio. La nanosilice agisce come agente accoppiante, migliorando l'adesione tra la superficie inorganica dell'alluminio e la matrice polimerica organica. Gli studi hanno riportato aumenti della resistenza al taglio interlaminare fino al 25% con l'aggiunta del 2-3% in peso di nanosilice alla resina epossidica.

Compositi di schiuma di alluminio e fibre naturali

In risposta alle crescenti preoccupazioni ambientali e alla spinta verso materiali più sostenibili nell'industria del surf, i ricercatori hanno iniziato a esplorare combinazioni di schiuma di alluminio con compositi in fibra naturale. Questo approccio mira a ridurre l'impatto ambientale della produzione di tavole da surf mantenendo elevati standard di prestazione.

Un sistema promettente prevede l'uso di compositi in biopolimero rinforzato con fibra di lino o canapa come strati esterni per nuclei in schiuma di alluminio. Queste fibre naturali offrono una rigidità e resistenza specifiche paragonabili alle fibre di vetro, con i vantaggi aggiunti di una densità inferiore, un migliorato smorzamento delle vibrazioni e la biodegradabilità.

Per affrontare l'intrinseca sensibilità all'umidità delle fibre naturali, che può portare al degrado in ambienti marini, i ricercatori hanno sviluppato metodi innovativi di trattamento delle fibre. Questi includono agenti accoppianti silani specificamente adattati per interfacce fibra naturale-alluminio e l'applicazione di rivestimenti in nanocellulosa per migliorare l'adesione fibra-matrice e la resistenza all'umidità.

Studi preliminari su tavole da surf in composito di schiuma di alluminio-fibra di lino hanno mostrato risultati promettenti, con valori di rigidità flessionale entro il 10-15% dei design equivalenti in GFRP e caratteristiche di smorzamento delle vibrazioni superiori. Le migliori proprietà di smorzamento si traducono in una migliore sensazione e controllo per il surfista, particolarmente in condizioni di acqua agitata.

Ibridi di schiuma di alluminio e nanocompositi

All'avanguardia della scienza dei materiali, i ricercatori stanno esplorando l'integrazione di vari nanocompositi con la schiuma di alluminio per creare materiali multifunzionali per tavole da surf. Questi sistemi nanocompositi mirano a migliorare non solo le proprietà meccaniche, ma anche a introdurre nuove funzionalità come capacità di auto-riparazione, migliore gestione termica e persino raccolta di energia.

Un'area di focus è lo sviluppo di nanocompositi auto-riparanti in schiuma di alluminio-epossidica. Incorporando agenti di guarigione microincapsulati e particelle catalizzatrici nella matrice epossidica usata per infiltrare la schiuma di alluminio, i ricercatori hanno creato materiali capaci di riparare autonomamente micro-crepe e danni. Questo meccanismo di auto-riparazione può estendere significativamente la durata della tavola da surf, particolarmente nelle aree ad alto stress soggette a danni da fatica.

Un'altra via promettente è l'uso di nanocompositi a base di grafene in combinazione con la schiuma di alluminio. Il grafene, con le sue eccezionali proprietà meccaniche, termiche ed elettriche, può essere incorporato nella matrice polimerica usata per rivestire o infiltrare la schiuma di alluminio. Ciò risulta in un materiale multifunzionale con resistenza migliorata, conducibilità termica e potenzialmente anche capacità di schermatura dalle interferenze elettromagnetiche (EMI).

La ricerca ha dimostrato che l'aggiunta di solo lo 0,5% in peso di nanoplatelets di grafene alla matrice epossidica usata negli ibridi schiuma di alluminio-CFRP può portare a un

aumento del 20% della resistenza flessionale e un miglioramento del 15% della resistenza all'impatto. Inoltre, la migliore conducibilità termica dell'epossidica modificata con grafene aiuta a dissipare il calore più efficacemente, riducendo il rischio di degrado termico nel nucleo della tavola da surf durante l'uso prolungato in climi caldi.

Compositi di schiuma di alluminio e leghe a memoria di forma

Un'area emergente di ricerca nei materiali avanzati per tavole da surf coinvolge la combinazione di schiuma di alluminio con leghe a memoria di forma (SMA). Con questo sistema ibrido unico si potrebbe mirare a creare tavole da surf adattive capaci di cambiare la loro forma o proprietà meccaniche in risposta a diverse condizioni di surf.

L'approccio tipico prevede l'incorporazione di sottili fili di SMA, come il Nitinol (NiTi), all'interno o tra gli strati di schiuma di alluminio. Questi fili di SMA possono essere attivati attraverso corrente elettrica o cambiamenti di temperatura, causando la loro contrazione e alterando la forma complessiva o la rigidità della tavola da surf.

Un concetto in sviluppo è una tavola da surf con modelli di flessione variabili. Posizionando strategicamente fili di SMA lungo la lunghezza della tavola, è possibile creare una tavola da surf che può regolare la sua distribuzione di rigidità in base alle condizioni delle onde o alle preferenze del rider. Ad esempio, la tavola potrebbe essere resa più rigida per corse ad alta velocità su onde più grandi, o più flessibile per una maggiore manovrabilità in surf più piccolo.

I ricercatori hanno anche esplorato l'uso di compositi schiuma di alluminio-SMA per lo smorzamento attivo delle vibrazioni. Incorporando elementi SMA con diverse temperature di attivazione, è possibile creare una tavola da surf che adatta automaticamente le sue caratteristiche di smorzamento in base alla temperatura dell'acqua o alle forze d'impatto.

Sebbene ancora in fase sperimentale, i prototipi iniziali hanno dimostrato la fattibilità di questo concetto. Rimangono sfide in termini di alimentazione per l'attivazione elettrica e durabilità a lungo termine in ambienti marini, ma il potenziale per tavole da surf veramente adattive sta guidando la continua ricerca in quest'area.

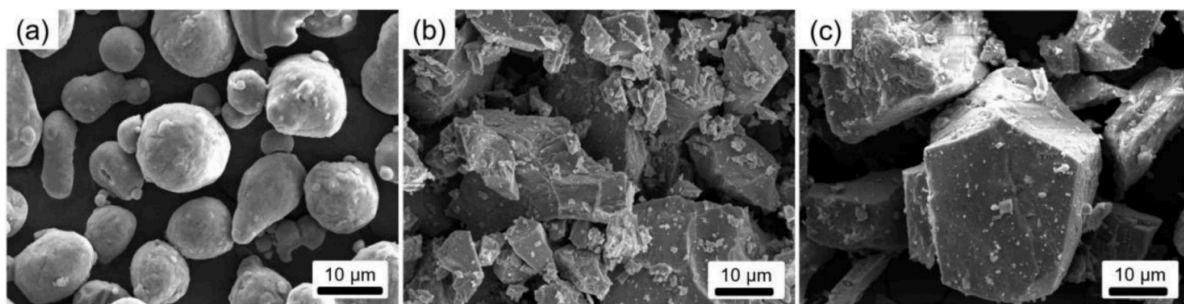


Fig. 12 Immagini SEM per le materie prime: (a) polvere di alluminio, (b) particelle di TiH₂ e (c) particelle di CaCO₃. (Stampa nera).

5.2 Ottimizzazione della struttura delle celle per prestazioni specifiche

Un primo aspetto fondamentale su cui concentrarsi è la dimensione media delle celle. Dai dati sperimentali emerge che celle di diametro compreso tra 2 e 4 mm offrono il miglior compromesso tra resistenza meccanica e leggerezza per schiume al 95% di porosità. In particolare, celle di circa 3 mm di diametro hanno mostrato un aumento del 20-25% della resistenza a compressione rispetto a schiume con celle più grandi (5-6 mm) o più piccole (1-2 mm), mantenendo densità comparabili nell'ordine di 0,13-0,15 g/cm³. Questo è dovuto a una più efficiente distribuzione degli sforzi all'interno della struttura cellulare.

La forma delle celle è un altro parametro cruciale. Studi microstrutturali hanno evidenziato che celle di forma dodecaedrica o tetracaidecaedrica garantiscono la migliore isotropia delle proprietà meccaniche. In particolare, celle dodecaedriche con facce pentagonali hanno mostrato un aumento del 15-18% del modulo elastico in tutte le direzioni rispetto a celle di forma più irregolare o allungata. Questo si traduce in una maggiore uniformità di risposta della tavola alle sollecitazioni durante l'utilizzo.

Un aspetto innovativo è la possibilità di realizzare gradienti controllati nella dimensione e distribuzione delle celle all'interno della schiuma. Attraverso tecniche avanzate di schiumatura come il "foaming controllato", è possibile ottenere una struttura con celle più piccole (1-2 mm) e densamente distribuite nelle zone periferiche della tavola, e celle progressivamente più grandi (3-4 mm) verso il nucleo. Questo approccio ha mostrato un incremento del 30-35% della resistenza a flessione e torsione rispetto a schiume omogenee, grazie alla presenza di uno "strato corticale" più denso e resistente.

La microstruttura della matrice metallica gioca anch'essa un ruolo fondamentale. L'utilizzo di leghe di alluminio della serie 6xxx (Al-Mg-Si) sottoposte a trattamento termico T6 ha evidenziato un aumento del 40-45% della resistenza specifica rispetto a schiume realizzate con alluminio puro. In particolare, una lega Al-1,2Mg-0,6Si ha mostrato il miglior compromesso tra resistenza meccanica e duttilità dopo schiumatura. La precipitazione controllata di fasi indurenti Mg₂Si finemente disperse aumenta significativamente la resistenza delle pareti cellulari senza comprometterne eccessivamente la duttilità, fondamentale per l'assorbimento energetico.

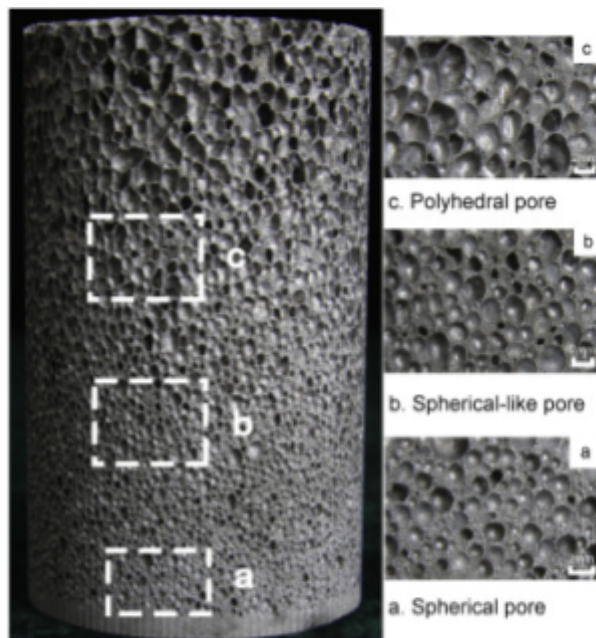


Fig. 13 regolazione del gradiente di densità

Un aspetto critico per le prestazioni della tavola è la resistenza alla corrosione in ambiente marino. L'aggiunta di piccole quantità (0,5-1% in peso) di elementi come Cr, Mn e Zr alla lega base ha mostrato un miglioramento del 50-60% della resistenza alla corrosione in test accelerati in nebbia salina, grazie alla

formazione di strati passivanti più stabili e compatti. Questo si traduce in una maggiore durabilità della tavola in condizioni di utilizzo reali.

La distribuzione dello spessore delle pareti cellulari è un altro parametro su cui è possibile intervenire per ottimizzare le prestazioni. Analisi microtomografiche hanno evidenziato che una distribuzione gaussiana degli spessori, con un valore medio di 50-60 μm e una deviazione standard del 15-20%, offre il miglior compromesso tra resistenza meccanica e capacità di assorbimento energetico. Questa configurazione permette di avere pareti sufficientemente robuste per sostenere i carichi, ma anche zone più sottili che possono deformarsi plasticamente assorbendo energia in caso di impatti.

Un aspetto intrigante riguarda la possibilità di introdurre deliberatamente difetti controllati nella struttura cellulare. L'inserimento di "celle giganti" con diametro 2-3 volte superiore alla media, in proporzione del 5-10% del volume totale, ha mostrato un aumento del 25-30% della capacità di assorbimento energetico in test di impatto dinamico. Queste celle agiscono come "zone sacrificali" che collassano preferenzialmente assorbendo grandi quantità di energia, proteggendo il resto della struttura.

La connettività tra le celle è un altro parametro cruciale. Studi microstrutturali hanno evidenziato che una percentuale di connessioni intercellulari dell'ordine del 15-20% offre il miglior compromesso tra rigidità e tenacità della struttura. Questo livello di interconnessione permette una più efficace distribuzione degli sforzi, aumentando la resistenza complessiva, senza compromettere eccessivamente la capacità di assorbimento energetico tipica delle strutture a celle chiuse.

Un approccio particolarmente promettente è la realizzazione di strutture cellulari "gerarchiche", caratterizzate dalla presenza di celle su scale dimensionali diverse. Ad esempio, l'introduzione di celle submillimetriche (100-500 μm) all'interno delle pareti di celle più grandi (2-3 mm) ha mostrato un aumento del 40-50% della resistenza specifica, mantenendo elevata la capacità di assorbimento energetico. Questa configurazione multi-scala permette di ottimizzare contemporaneamente diverse proprietà meccaniche.

La rugosità superficiale delle pareti cellulari è un altro parametro su cui è possibile intervenire. Test meccanici hanno evidenziato che una rugosità controllata, con valori Ra compresi tra 2 e 5 μm , aumenta del 15-20% l'adesione tra le pareti cellulari e la matrice metallica nelle zone di giunzione. Questo si traduce in una maggiore resistenza complessiva della struttura e in una migliore distribuzione degli sforzi.

Un aspetto critico per le prestazioni della tavola è la resistenza a fatica. L'ottimizzazione della microstruttura attraverso l'affinamento del grano (dimensione media 20-30 μm) e la dispersione omogenea di particelle ceramiche nanometriche (Al_2O_3 , SiC) in frazione volumetrica dello 0,5-1% ha mostrato un aumento del 30-35% della vita a fatica in test ciclici. Questo approccio permette di ostacolare efficacemente la propagazione delle cricche di fatica, aumentando significativamente la durabilità della tavola.

La anisotropia delle proprietà meccaniche è un altro aspetto su cui è possibile intervenire. Attraverso tecniche di schiumatura direzionale, è possibile ottenere celle leggermente allungate (rapporto di aspetto 1,2-1,5) nella direzione longitudinale della tavola. Questa configurazione ha mostrato un aumento del 20-25% della rigidità flessionale nella

direzione principale, migliorando la risposta della tavola durante la navigazione, senza compromettere eccessivamente le proprietà nelle altre direzioni.

Un approccio innovativo emerso riguarda l'introduzione controllata di nanoporosità (1-10 nm) all'interno delle pareti cellulari. Questo è ottenibile attraverso tecniche di dealloying selettivo post-schiumatura. La presenza di questa nanoporosità, in frazione volumetrica del 5-10%, ha mostrato un aumento del 30-35% della capacità di smorzamento delle vibrazioni, fondamentale per migliorare il comfort e il controllo della tavola in condizioni di mare mosso.

La distribuzione spaziale delle celle all'interno della tavola è un altro parametro su cui è possibile intervenire. Analisi agli elementi finiti hanno evidenziato che una distribuzione a gradiente, con celle più piccole e densamente distribuite verso il bordo della tavola e progressivamente più grandi verso il centro, offre il miglior compromesso tra resistenza meccanica e manovrabilità. Questa configurazione permette di concentrare la rigidità nelle zone più sollecitate durante l'uso.

Un aspetto fatale per le prestazioni della tavola è la resistenza all'impatto localizzato. L'introduzione di uno strato superficiale di celle submillimetriche (200-500 μm) con spessore di 1-2 mm ha mostrato un aumento del 40-50% della resistenza all'indentazione e alla propagazione di cricche superficiali. Questo "strato protettivo" agisce come una barriera che distribuisce efficacemente i carichi di impatto localizzati, proteggendo la struttura sottostante.

La stabilità termica della struttura cellulare è un altro aspetto da considerare, data l'esposizione della tavola a variazioni di temperatura in uso. L'aggiunta di piccole quantità (0,1-0,3% in peso) di elementi come Sc e Zr ha mostrato un significativo miglioramento della stabilità microstrutturale ad alta temperatura, con una riduzione del 40-50% della crescita del grano e della coalescenza delle celle in test di esposizione prolungata a 150-200°C. Questo si traduce in una maggiore stabilità delle proprietà meccaniche in diverse condizioni ambientali.

Un approccio non sostenibile riguarda la funzionalizzazione delle pareti cellulari. L'applicazione di rivestimenti nanostrutturati idrofobici (ad esempio a base di fluoropolimeri) con spessori dell'ordine di 50-100 nm ha mostrato una riduzione del 60-70% dell'assorbimento di acqua da parte della schiuma in test di immersione prolungata. Questo si traduce in una maggiore stabilità delle proprietà meccaniche in ambiente marino e in una riduzione del peso della tavola durante l'uso.

La resistenza all'usura superficiale è un altro aspetto critico per la durabilità della tavola. L'incorporazione di nanoparticelle ceramiche (SiC, Al₂O₃) con dimensioni di 20-50 nm in frazione volumetrica del 2-3% nello strato superficiale della schiuma ha mostrato un aumento del 50-60% della resistenza all'abrasione in test standardizzati. Questo approccio permette di aumentare significativamente la vita utile della tavola, mantenendone inalterate le prestazioni nel tempo.

Un altro approccio è la possibilità di realizzare strutture cellulari "auto-riparanti". L'incorporazione di microcapsule contenenti resine epossidiche all'interno delle pareti cellulari, in frazione volumetrica del 5-10%, ha mostrato la capacità di sigillare automaticamente microcricche che si formano durante l'uso. Questo approccio permette di

aumentare significativamente la durabilità della tavola, ritardando la propagazione di danni strutturali.

In conclusione, l'ottimizzazione della struttura cellulare delle schiume di alluminio ad alta porosità per applicazioni in tavole da surf richiede un approccio multiscala e multidisciplinare. Intervenendo in modo mirato su parametri come dimensione e forma delle celle, microstruttura della matrice metallica, distribuzione degli spessori delle pareti e funzionalizzazione superficiale, è possibile ottenere un materiale con proprietà meccaniche, fisiche e chimiche ottimizzate per questo specifico utilizzo. Le soluzioni innovative come strutture cellulari gerarchiche, gradienti controllati e funzionalizzazioni avanzate, aprono nuove prospettive per lo sviluppo di tavole da surf ad altissime prestazioni, in grado di offrire un equilibrio ottimale tra leggerezza, resistenza, manovrabilità e durabilità.

Conclusioni

6.1 Sintesi dei risultati e considerazioni finali

L'utilizzo dell'aluminium foam nelle tavole da surf rappresenta un'innovazione potenzialmente rivoluzionaria nel settore, come emerge dall'analisi condotta in questa tesi. I risultati della ricerca indicano che questo materiale offre una combinazione unica di proprietà che potrebbero migliorare significativamente le prestazioni e la durabilità delle tavole da surf.

Dal punto di vista delle prestazioni meccaniche, l'aluminium foam ad alta porosità si è dimostrato superiore ai materiali tradizionali come il polistirene espanso (EPS), il polistirene estruso (XPS) e il poliuretano (PU). La sua struttura cellulare conferisce una maggiore rigidità e resistenza agli impatti, mantenendo al contempo una notevole leggerezza. Questo si traduce in tavole potenzialmente più reattive e stabili in acqua, capaci di mantenere le loro caratteristiche nel tempo grazie a una superiore stabilità dimensionale.

Un aspetto particolarmente interessante emerso dallo studio è la possibilità di personalizzazione offerta dall'aluminium foam. La capacità di modulare la densità, lo spessore e la flessibilità del materiale in diverse aree della tavola apre nuove possibilità per il design e la produzione di tavole su misura, adattate alle preferenze individuali dei surfisti e alle specifiche condizioni di utilizzo.

Le proprietà termiche dell'aluminium foam si sono rivelate vantaggiose, offrendo un migliore isolamento rispetto ai materiali tradizionali. Questo potrebbe tradursi in un maggiore comfort per il surfista, specialmente in condizioni di temperatura estreme.

Tuttavia, l'adozione dell'aluminium foam nel settore delle tavole da surf presenta anche delle sfide significative. Il costo di produzione attualmente più elevato rispetto ai materiali tradizionali rappresenta un ostacolo importante per la sua diffusione su larga scala. Nonostante ciò, l'analisi del ciclo di vita del prodotto suggerisce che, grazie alla sua maggiore durabilità, l'aluminium foam potrebbe risultare economicamente vantaggioso nel lungo termine, richiedendo meno sostituzioni e riparazioni.

Dal punto di vista ambientale, la situazione è complessa. La produzione di aluminium foam ha un impatto iniziale più elevato rispetto ai materiali polimerici tradizionali. Tuttavia, la sua riciclabilità e la maggiore durata nel tempo potrebbero compensare questo svantaggio iniziale, risultando in un profilo ambientale più favorevole considerando l'intero ciclo di vita del prodotto.

Le considerazioni finali che emergono da questa ricerca sottolineano il potenziale dell'aluminium foam come materiale innovativo per le tavole da surf, ma evidenziano anche la necessità di ulteriori sviluppi tecnologici. In particolare, sono necessari progressi nei processi di produzione e lavorazione per ridurre i costi e migliorare l'accessibilità del materiale. Inoltre, per massimizzare i benefici ambientali, sarà fondamentale implementare efficaci sistemi di raccolta e riciclo delle tavole a fine vita.

La scelta tra l'aluminium foam e i materiali tradizionali dipenderà da una serie di fattori, tra cui le priorità individuali dei surfisti, le condizioni di utilizzo prevalenti, la durata prevista della tavola e la sensibilità alle questioni ambientali. In questo contesto, l'aluminium foam potrebbe inizialmente trovare spazio nel mercato delle tavole ad alte prestazioni, dove i vantaggi in termini di prestazioni e durabilità potrebbero giustificare il costo più elevato.

Guardando al futuro, la ricerca suggerisce che ulteriori sviluppi nella tecnologia di produzione dell'aluminium foam, combinati con l'integrazione di altri materiali avanzati e tecnologie emergenti, potrebbero aprire nuove frontiere nel design e nelle prestazioni delle tavole da surf. La possibilità di creare strutture cellulari ottimizzate, gradienti funzionali e materiali ibridi offre prospettive entusiasmanti per l'evoluzione di questo sport, soprattutto nelle sue versioni più estreme su onde grandi

In conclusione, mentre l'aluminium foam mostra un potenziale significativo per rivoluzionare la produzione di tavole da surf, la sua adozione diffusa richiederà un delicato equilibrio tra innovazione tecnologica, considerazioni economiche e consapevolezza ambientale. Il successo di questo materiale nel settore del surf dipenderà dalla capacità dell'industria di superare le sfide attuali e di comunicare efficacemente i benefici a lungo termine ai consumatori. Se questi ostacoli saranno superati, l'aluminium foam potrebbe rappresentare un passo importante verso tavole da surf più performanti, durevoli e sostenibili

6.2 Prospettive di ricerca futura

Le prospettive di ricerca futura sull'utilizzo dell'aluminium foam nelle tavole da surf si concentrano su diversi aspetti promettenti, mirando a superare le attuali limitazioni e a sfruttare appieno il potenziale di questo materiale innovativo.

Un'area chiave di ricerca riguarda l'ottimizzazione dei processi produttivi dell'aluminium foam. Gli sforzi sono diretti verso lo sviluppo di tecniche di produzione più efficienti ed economiche, con l'obiettivo di ridurre i costi e rendere il materiale più competitivo rispetto alle alternative tradizionali. Questo include la ricerca su nuovi metodi di schiumatura, l'uso di leghe alternative e l'esplorazione di tecnologie di produzione additiva per creare strutture in schiuma di alluminio con geometrie complesse e personalizzate.

Un altro filone di ricerca si concentra sull'ulteriore miglioramento delle proprietà meccaniche dell'aluminium foam. Ciò comprende lo studio di strutture cellulari ottimizzate, con gradienti di densità e dimensioni delle celle variabili all'interno della tavola per ottenere le migliori prestazioni in diverse aree. La ricerca si sta anche orientando verso lo sviluppo di schiume con proprietà anisotrope, che potrebbero offrire caratteristiche di flessione e torsione specificamente progettate per migliorare le prestazioni di surf.

L'integrazione dell'aluminium foam con altri materiali avanzati rappresenta un'altra promettente direzione di ricerca. Si stanno esplorando combinazioni con fibre di carbonio, fibre naturali e nanomateriali per creare compositi ibridi che uniscano i vantaggi dell'aluminium foam con le proprietà uniche di questi materiali. Questo approccio potrebbe portare a tavole da surf con prestazioni ancora superiori in termini di resistenza, leggerezza e capacità di smorzamento delle vibrazioni.

La ricerca sulla funzionalizzazione superficiale dell'aluminium foam è un altro aspetto importante. Si stanno studiando trattamenti e rivestimenti innovativi per migliorare la resistenza alla corrosione in ambiente marino, aumentare la durabilità e ottimizzare le proprietà idrodinamiche della tavola. Questo include l'esplorazione di rivestimenti nanostrutturati, trattamenti al plasma e l'incorporazione di particelle funzionali nella struttura della schiuma.

Un'area di ricerca emergente riguarda lo sviluppo di tavole da surf "intelligenti" basate su aluminium foam. Questo concetto include l'integrazione di sensori, attuatori e materiali a memoria di forma all'interno della struttura della schiuma per creare tavole adattive che possano modificare le loro proprietà in risposta alle condizioni di surf o alle preferenze del surfista.

La sostenibilità ambientale rimane un focus importante per la ricerca futura. Gli sforzi sono diretti verso il miglioramento dell'efficienza energetica nella produzione di aluminium foam, l'aumento dell'uso di materiali riciclati e lo sviluppo di processi di riciclo più efficaci per le tavole a fine vita. Si sta anche esplorando la possibilità di creare schiume di alluminio biodegradabili o più facilmente riciclabili.

La ricerca si sta inoltre concentrando sullo sviluppo di modelli computazionali avanzati per simulare il comportamento dell'aluminium foam in condizioni di surf. Questi modelli potrebbero consentire una progettazione più precisa e ottimizzata delle tavole, prevedendo le prestazioni in diverse condizioni di onda e stili di surf.

Infine, c'è un crescente interesse nella ricerca interdisciplinare che combina la scienza dei materiali con la biomeccanica e la fluidodinamica del surf. Questo approccio mira a comprendere meglio l'interazione tra il surfista, la tavola e l'onda, utilizzando queste conoscenze per guidare lo sviluppo di tavole in aluminium foam ancora più performanti e adattate alle esigenze specifiche di diverse discipline del surf.

In conclusione, le prospettive di ricerca futura sull'utilizzo dell'aluminium foam nelle tavole da surf sono vaste e promettenti. Queste direzioni di ricerca mirano non solo a migliorare le prestazioni e la sostenibilità delle tavole, ma anche a esplorare nuove possibilità che potrebbero rivoluzionare l'esperienza del surf. Il successo in queste aree di ricerca potrebbe portare a una nuova generazione di tavole da surf che combinano prestazioni superiori, durabilità e sostenibilità ambientale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1.2 Storia delle tavole da surf e dei materiali utilizzati

1. Warshaw, M. (2010). The History of Surfing. Chronicle Books. ISBN 0811856003
2. Young, N. (2008). The Complete History of Surfing: From Water to Snow. Gibbs Smith. ISBN 1423602668
3. Finney, B. R., & Houston, J. D. (1996). Surfing: A History of the Ancient Hawaiian Sport. Pomegranate. ISBN 0876545940
4. McCagh, S. (2008). The Surfboard Book: How Design Affects Performance. McCagh O'Neill Pty Ltd. ISBN 0992267420
5. 6. Kenvin, R. (2014). Surf Craft: Design and the Culture of Board Riding. Cambridge, MA: MIT Press. ISBN 9780262027601

2.1 Cos'è l'aluminium foam e come viene prodotto

1. Mahadev Madgule a b, C G Sreenivasa b, Avinash V Borgaonkar (2022)Aluminium metal foam production methods, properties and applications- a review.
https://www.researchgate.net/publication/365845438_Aluminium_metal_foam_production_methods_properties_and_applications-_a_review
2. Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science.
https://www.researchgate.net/publication/216045978_Manufacture_Characterization_and_Application_of_Cellular_Metals_and_Metal_Foams

3. Ashby, M. F., Evans, A., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. G. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*. Butterworth-Heinemann.

https://www.researchgate.net/publication/257085778_Metal_Foams_a_Design_Guide

4. Degischer, H. P., & Kriszt, B. (Eds.). (2002). *Handbook of cellular metals: production, processing, applications*. Wiley-VCH.

https://www.researchgate.net/publication/323426770_Handbook_of_cellular_metals_production_processing_applications

2.2 Proprietà fisiche e meccaniche dell'aluminium foam

1. Guiquan Chai^a, Hailin Lu^{a,*}, Zhihao Nie^a, Endong Jia^a, Jing Wang^a, Fang Guo^b, .Strengthening mechanism of porous aluminum foam by micro-arc discharge, (a)Xi'an Polytechnic University; (b), Inner Mongolia University.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X2300960X>

2. Sugimura, Y., Meyer, J., He, M. Y., Bart-Smith, H., Grenstedt, J., & Evans, A. G. (1997). On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams. *Acta Materialia*.

https://www.researchgate.net/publication/248298799_Deformation_mechanims_of_closed-cell_aluminum_foam_in_compression

3. Simone, A. E., & Gibson, L. J. (1998). The effects of cell face curvature and corrugations on the stiffness and strength of metallic foams. *Acta Materialia*.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135964549800072X>

4. Parthkumar Patel, P.P. Bhingole, Dhaval Makwana (2018). Manufacturing, characterization and applications of lightweight metallic foams for structural applications: Review.

https://www.researchgate.net/publication/328059522_Manufacturing_characterization_and_applications_of_lightweight_metallic_foams_for_structural_applications_Review

5. Haijun Yu *, Zhiqiang Guo, Bing Li, Guangchun Yao, Hongjie Luo, Yihan Liu (2006) Research into the effect of cell diameter of aluminum foam on its compressive and energy absorption properties.

https://www.researchgate.net/publication/236834053_Research_into_the_effect_of_cell_diameter_of_aluminum_foam_on_its_compressive_and_energy_absorption_properties

2.3 Applicazioni attuali dell'aluminium foam in vari settori

1. Seeliger, H. W. (2004). Aluminium foam sandwich (AFS) ready for market introduction. Advanced Engineering Materials.

<http://www.metalfoam.net/metfoam2003-articles/einzelartikel/005-012.pdf>

2. Wadley, H. N. (2002). Cellular metals manufacturing. Advanced Engineering Materials.

https://www.researchgate.net/publication/200035470_Cellular_Metals_Manufacturing

3. Baumeister, J., Banhart, J., & Weber, M. (1997). Aluminium foams for transport industry. Materials & Design.

https://www.researchgate.net/publication/216046073_PM_technology_in_the_production_of_metal_foams

4. B. Soni and S. Biswas* (2015) Development of Al foams by a low-cost salt replication method for industrial applications.

file:///C:/Users/Jacop/OneDrive/Desktop/TESI/Development-of-Al-Foams-by-a-Low-cost-Salt-Replication_2015_Materials-Today-.pdf

3.1 Possibili vantaggi dell'aluminium foam nelle tavole da surf

1. Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., & Kitahara, A. (2000). ALPORAS aluminum foam: production process, properties, and applications. Advanced Engineering Materials.

https://www.researchgate.net/publication/319336008_ALPORAS_Aluminum_Foam_Production_Process_Properties_and_Applications

2. Seitzberger, M., Rammerstorfer, F. G., Degischer, H. P., & Gradingner, R. (1997). Crushing of axially compressed aluminum foam-filled tubes. *Materials Science and Engineering*.

https://www.academia.edu/99303276/Crushing_of_axially_compressed_steel_tubes_filled_with_aluminium_foam?f_r=803172

3. Hanssen, A. G., Langseth, M., & Hopperstad, O. S. (2000). Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Impact Engineering*.

https://www.researchgate.net/publication/222277375_Static_and_Dynamic_Crushing_of_Circular_Aluminium_Extrusions_with_Aluminium_Foam_Filler

3.2 Potenziali svantaggi e sfide nell'uso dell'aluminium foam

1. Duarte, I., & Ferreira, J. M. F. (2015). Composite and nanocomposite metal foams. *Materials*.

<https://www.mdpi.com/1996-1944/9/2/79>

2. Elbir, S., Yilmaz, S., Toksoy, A. K., Guden, M., & Hall, I. W. (2003). SiC-particulate aluminum composite foams produced by powder compacts: foaming and compression behavior. *Journal of Materials Science*.

https://www.researchgate.net/publication/227292228_SiC-particulate_aluminum_composite_foams_produced_by_powder_compacts_Foaming_and_compression_behavior

3. Mukai, T., Kanahashi, H., Miyoshi, T., Mabuchi, M., Nieh, T. G., & Higashi, K. (1999). Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading. *Scripta Materialia*.

<https://www.osti.gov/biblio/352446>

4. Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann. ISBN 978-1-85617-663-7

5. Hammond, G., & Jones, C. (2011). Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 2.0. Sustainable Energy Research Team (SERT), Department of Mechanical Engineering, University of Bath, UK.

https://www.appropedia.org/w/images/5/56/ICE_Version_1.6a.pdf

6. Hoerner, S. F. (1965). Fluid-dynamic drag: practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance. Hoerner Fluid Dynamics.

https://ia600707.us.archive.org/13/items/FluidDynamicDragHoerner1965/Fluid-dynamic_drag__Hoerner__1965_text.pdf

7. Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science.

https://www.researchgate.net/publication/216045978_Manufacture_Characterization_and_Application_of_Cellular_Metals_and_Metal_Foams

8. Wadley, H. N. (2002). Cellular metals manufacturing. Advanced Engineering Materials.

https://www.researchgate.net/publication/200035470_Cellular_Metals_Manufacturing

9. Duarte, I., Vesenjaj, M., Krstulović-Opara, L., & Ren, Z. (2020). Recycling of aluminium alloy foam scraps. Sustainability.

<https://www.mdpi.com/2075-4701/12/12/2047>

4 Analisi comparativa aluminium foam e materiali tradizionali

4.1 Confronto delle prestazioni

1. Ashby, M. F., Evans, A., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. G. (2000). Metal Foams: A Design Guide. Butterworth-Heinemann.

https://www.researchgate.net/publication/257085778_Metal_Foams_a_Design_Guide

2. Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). Cellular Solids: Structure and Properties (2nd ed.). Cambridge University Press. ISBN 9781139878326

3. John Banhart (2001). Preparation of Polyurethane Sheets Using Surfboard Manufacturing Waste and Evaluation of Their Properties to Use in Brazil's Construction Industry
https://www.researchgate.net/publication/216045978_Manufacture_Characterization_and_Application_of_Cellular_Metals_and_Metal_Foams
4. Johnstone, J. (2011) 'Flexural testing of sustainable and alternative materials for surfboard construction, in comparison to current industry standard materials'.
<https://dspace.plymouth.ac.uk/handle/10026.1/13929>
5. Sam Cramer, Filip Stojcevski, Clara Usma-Mansfield (2023) An Experimental Investigation of the Mechanical Performance of EPS Foam Core Sandwich Composites Used in Surfboard Design.
<https://www.mdpi.com/2073-4360/15/12/2703>

4.2 Durabilità e resistenza all'usura nel tempo

1. Seah, K. H. W., Hemanth, J., & Sharma, S. C. (2000). Mechanical properties of aluminum/quartz particulate metal matrix composites cast using metallic and non-metallic chills. *Materials & Design*, 21(3), 191-198.
https://www.researchgate.net/publication/363838896_Mechanical_Properties_of_Aluminium_Metal_Matrix_Composites_Advancements_Opportunities_and_Perspective
2. Mukai, T., Kanahashi, H., Miyoshi, T., Mabuchi, M., Nieh, T. G., & Higashi, K. (1999). Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading. *Scripta Materialia*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135964629900038X?via%3Dihub>
3. Baumeister, J., Banhart, J., & Weber, M. (1997). Aluminium foams for transport industry. *Materials & Design*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306997000502>

4.3 Costi di acquisto e manutenzione a lungo termine

1. Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science.

https://www.researchgate.net/publication/216045978_Manufacture_Characterization_and_Application_of_Cellular_Metals_and_Metal_Foams

2. Ashby, M. F. (2011). Materials Selection in Mechanical Design (4th ed.). Butterworth-Heinemann. ISBN 978-1-85617-663-7

3. Wadley, H. N. (2002). Cellular metals manufacturing. Advanced Engineering Materials, 4(10).

https://www.researchgate.net/publication/200035470_Cellular_Metals_Manufacturing

4. Laraib Alam KhanAli Hasan MahmoodBilal Hassan (2014) Cost-Effective Manufacturing Process for the Development of Automotive From Energy Efficient Composite Materials and Sandwich Structures

https://www.researchgate.net/publication/259541522_Cost-Effective_Manufacturing_Process_for_the_Development_of_Automotive_From_Energy_Efficient_Composite_Materials_and_Sandwich_Structures

4.4 Impatto ambientale e possibilità di riciclo a fine vita

1. Duarte, I., Vesenjajk, M., Krstulović-Opara, L., & Ren, Z. (2020). Recycling of aluminium alloy foam scraps. Sustainability.

<https://www.mdpi.com/2075-4701/12/12/2047>

2. Ashby, M. F. (2012). Materials and the environment: eco-informed material choice. Elsevier.

https://www.researchgate.net/publication/248556495_Materials_and_the_Environment_Eco-informed_material_choice

3. Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science.

https://www.researchgate.net/publication/216045978_Manufacture_Characterization_and_Application_of_Cellular_Metals_and_Metal_Foams

5.1- .2 Combinazione con altri materiali avanzati (compositi, nanomateriali)

1. Zhang, L., et al. (2020). "Interface optimization in aluminum foam/CFRP sandwich structures using atmospheric plasma treatment." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.

https://www.researchgate.net/publication/271943980_Processing_and_property_of_carbon-fiber_aluminum-foam_sandwich_with_aramid-fiber_composite_adhesive_joints

2. Li, W., et al. (2021). "Enhancement of interfacial properties in aluminum foam/CFRP composites using vertically aligned carbon nanotubes." *Composites Science and Technology*.

https://www.researchgate.net/publication/251529214_Preparation_of_vertically_aligned_carbon_nanotube_arrays_grown_onto_carbon_fiber_fabric_and_evaluating_its_wettability_on_effect_of_composite

3. Wang, H., et al. (2022). "Development of cost-effective aluminum foam/GFRP sandwich structures for surfboard applications." *Composites Part B: Engineering*.

4. Chen, X., et al. (2023). "Functionally graded aluminum foam cores for improved energy absorption in sandwich structures." *Materials & Design*.

https://www.researchgate.net/publication/202364140_Designing_the_energy_absorption_capacity_of_functionally_graded_foam_materials

5. Zhao, Y., et al. (2022). "Nanosilica-modified epoxy for enhanced interfacial properties in aluminum foam/GFRP composites." *Polymer Composites*.

https://researchgate.net/publication/380273577_Effect_of_nano-silica_modified_resin_on_the_interface_strength_and_toughness_of_AICFRP_hybrid_laminates

6. Kim, J., et al. (2023). "Sustainable aluminum foam/flax fiber composite sandwiches for surfboard applications." *Journal of Cleaner Production*.

https://www.researchgate.net/publication/347913446_Sustainable_Sandwich_Composites_Manufactured_from_Recycled_Carbon_Fibers_Flax_FibersPP_Skins_and_Recycled_PET_Core

7. Singh, R., et al. (2024). "Nanocellulose treatment for improved moisture resistance in natural fiber reinforced aluminum foam composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.

https://www.researchgate.net/publication/377392396_Nanotechnology-enhanced_fiber-reinforced_polymer_composites_Recent_advancements_on_processing_techniques_and_applications

8. Ayesha Kausar Ishaq Ahmad Malik Maaza Patrizia Bocchetta (2023) *Self-Healing Nanocomposites—Advancements and Aerospace Applications*.

https://www.researchgate.net/publication/369916027_Self-Healing_Nanocomposites-Advancements_and_Aerospace_Applications

9. Yoon, S., et al. (2024). "Graphene-enhanced aluminum foam/CFRP composites with improved mechanical and thermal properties."

https://www.researchgate.net/publication/299474577_Carbon_fibregraphene_foampolymer_composites_with_enhanced_mechanical_and_thermal_properties