

Metallschaum – ein Werkstoff mit Perspektiven

J. Banhart, J. Baumeister und M. Weber, Bremen

Geschäumte Werkstoffe werden seit langer Zeit verwendet und sind mittlerweile unverzichtbar geworden. Eine besonders große Verbreitung haben hier die Polymere gefunden. Nachstehend wird ein Überblick über Herstellung, Eigenschaften und Anwendungen von Metallschäumen gegeben.

Die Bedeutung der geschäumten Metalle, die in der Patentliteratur seit den 50er Jahren bekannt sind, ist bisher verhältnismäßig gering geblieben, obwohl sie zahlreiche attraktive Eigenschaften besitzen: Ihre Dichte liegt bei einem Bruchteil derjenigen von massiven Metallen, während die Festigkeitswerte für viele Anwendungen immer noch ausreichen. Ähnlich wie geschäumte Kunststoffe wirken sie wärme- und schallisierend und können Stoßenergie absorbieren, übertreffen die Kunststoffe jedoch in ihrer Feuer- und Hitzebeständigkeit bei weitem. Zudem sind sie sehr gut recycelbar. Ein Grund für den momentan geringen Bekanntheitsgrad der Metallschäume ist sicherlich in der Art der bislang zur Verfügung stehenden Herstellungsverfahren zu sehen, die durchweg schwierig zu kontrollieren sind und somit zu nur mäßig reproduzierbaren Ergebnissen führten.

Herstellung

Ein vom IFAM*) entwickeltes und patentiertes¹⁾ pulvertechnologisches Verfahren hebt die bislang bestehenden Einschränkungen auf und erlaubt eine einfache Herstellung geschäumter Metallkörper. Das Verfahren ist in Bild 1 verdeutlicht: Der pulverförmige, metallische Ausgangswerkstoff wird intensiv mit einem Treibmittel (z.B. Titanhydrid) gemischt. Die so erhaltene Mischung wird unter kontrollierten Bedingungen zu einem Halbzeug verdichtet und gegebenenfalls durch eine Umformung weiterverarbeitet. Die Verdichtung geschieht typischerweise durch axiales Heißpressen oder durch Extrusion. Das resultierende

Material ist äußerlich nicht von konventionellem Metall zu unterscheiden, birgt aber das Treibmittel in seiner metallischen Matrix: es ist aufschäumbar. Durch Erwärmung des Halbzeugs bis knapp über seinen Schmelzpunkt wird das Metall geschmolzen und die Gasfreisetzung des Treibmittels und somit der eigentliche Aufschäumvorgang ausgelöst. Richtige Prozeßparameter vorausgesetzt, expandiert die Schmelze und entwickelt eine halbflüssige, schaumige Konsistenz. Nachdem die Expansion bis zum gewünschten Grad erfolgt ist, wird der Schäumvorgang durch Abkühlung unter den Schmelzpunkt beendet und die Schaumstruktur stabilisiert. Man erhält einen hochporösen Werkstoff mit gleichmäßiger Porenstruktur. Am IFAM wurde das Verfahren bis-

her für Aluminium, diverse Aluminiumlegierungen, Zink, Zinn, Bronze, Messing und Blei mit Erfolg erprobt und die Prozeßparameter für spezielle Anwendungen optimiert, wobei Aluminium und seine Legierungen jedoch aufgrund des breiteren Anwendungsspektrums bisher im Vordergrund des Interesses stehen.

Bild 2 zeigt Ausgangspulver, aufschäumbares Halbzeug in verschiedenen Abmessungen und einige Produkte aus Metallschaum. Wird das aufschäumbare Halbzeug in einer Hohlform aus Stahlblech aufgeschäumt, so füllt der expandierende Schaum den Hohlraum völlig aus. Auf diese Weise können leicht Formteile aus Metallschaum hergestellt werden wie der Schaumblock oder die ausgeschäumte Ente in Bild 2, oder die Formteile in Bild 5. Die Außenhaut der Schaumteile ist in diesen Fällen geschlossen. Aufgrund der geringen Dichten, die bei Aluminiumschäumen meist zwischen 0,3 und 0,8 g/cm³ liegen, schwimmen die Schaumkörper auf Wasser.

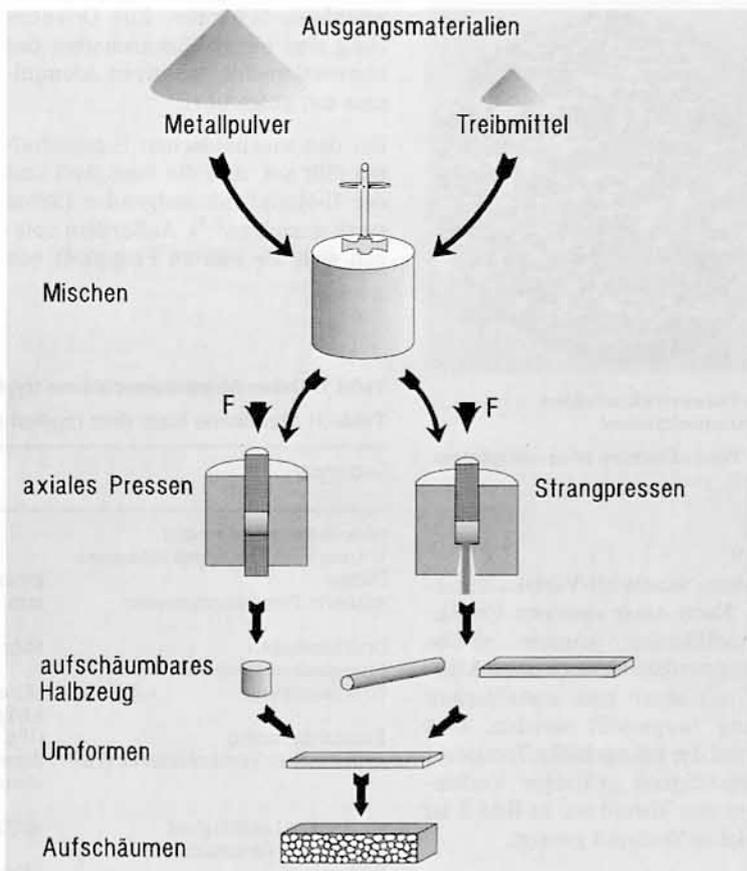


Bild 1: Prozeßschema zur Herstellung von Metallschaum nach dem IFAM-Verfahren

Fig. 1: Flow diagram for the production of foamed metal by the IFAM process

*) Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung (IFAM)

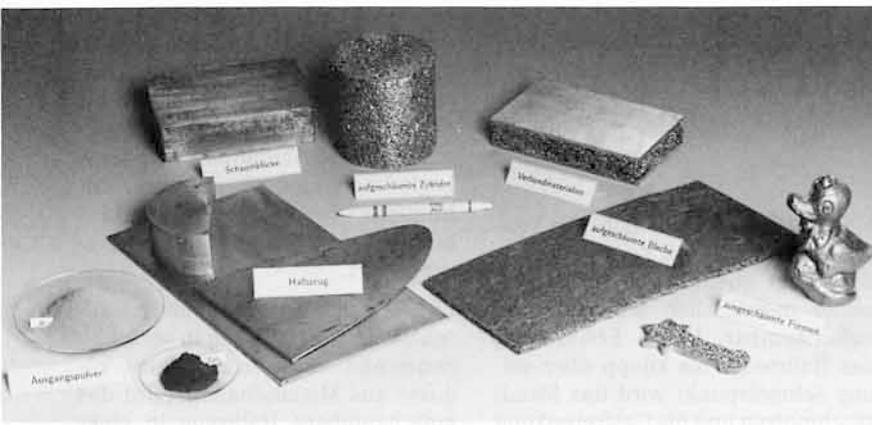


Bild 2: Ausgangspulver, aufschäumbares Halbzeug und einige Endprodukte beim IFAM-Verfahren

Fig. 2: Initial powder, foamable semi-finished product, and a number of end products in the IFAM process

Trägt man die Außenhaut ab, so erkennt man die poröse Struktur des Aluminiumschaums. In Bild 3 ist zu sehen, daß es sich dabei um eine geschlossenporige Struktur handelt. Dünne Bleche aus aufschäumbarem Halbzeug können zu Flachmaterial aufgeschäumt werden. Werden diese mit konventionellen Aluminiumblechen beklebt,

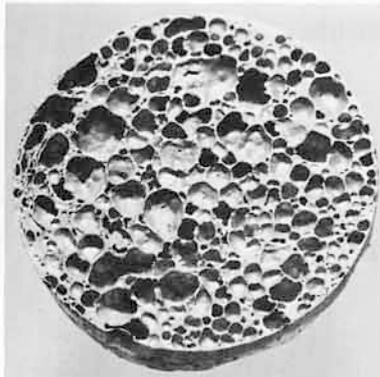


Bild 3: Porenstruktur eines Aluminiumschaumes

Fig. 3: Pore structure of an aluminium foam

entstehen Sandwich-Verbundstrukturen. Nach einer neueren Verfahrensmodifikation können solche Verbundstrukturen auch ohne Klebstoffe mit einer rein metallischen Bindung hergestellt werden, was aufgrund der mangelnden Temperaturbeständigkeit geklebter Verbindungen von Vorteil ist. In Bild 2 ist ein solcher Verbund gezeigt.

Eigenschaften

Durch die Vielfalt der möglichen Materialzusammensetzungen und die verschiedenen Schäumparameter wie Schäumdauer, Treibmittelart und -gehalt bedingt, lassen sich Schaumeigenschaften über einen sehr weiten Bereich hinweg einstellen. Tafel 1 zeigt anhand zweier Beispiele das Potential, das im Metallschaum steckt. Es handelt sich dabei um häufig untersuchte Aluminiumbasis-Schäume. Zur Orientierung sind einige Eigenschaften des konventionellen massiven Aluminiums mit aufgeführt.

Bei den mechanischen Eigenschaften fällt auf, daß die Festigkeit und der E-Modul mit steigender Dichte stark ansteigen^{2, 3}). Außerdem spiegelt sich die höhere Festigkeit von

AlCu4 gegenüber reinem Aluminium auch im Schaum wider. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit der Schäume ist gegenüber den massiven Materialien stark reduziert, während der thermische Ausdehnungskoeffizient unverändert bleibt⁵).

Schäume eignen sich im allgemeinen gut zur Energieabsorption unter Einhaltung einer vorgegebenen Höchstspannung⁴). Grund dafür ist, daß bei plastischer Verformung der Schaum über einen weiten Stauchungsbereich hinweg auf einem nahezu konstanten Spannungsniveau bleibt. Die absorbierte Energie für eine gegebene Stauchung ist gleich der Fläche unter der Spannungs-Stauchungskurve, wie sie in Bild 4 gezeigt ist. Sie kommt dem idealen rechteckigen Verlauf bis zu Stauchungen von fast 60% sehr nahe. Definiert man die durch einen idealen Absorber aufgenommenen Energien als 100%, so zeigt die gestrichelte Kurve in Bild 4, daß dieser Aluminiumschaum bis 57% Stauchung ca. 85% der idealen Energiemenge aufnehmen kann. Dies ist für technische Energieabsorber ein sehr günstiger Wert.

Anwendungen

Die möglichen Anwendungsgebiete für Metallschäume werden nach Anwendungsfeldern getrennt diskutiert. Dabei sind Überschneidungen nicht zu vermeiden, wie z.B. zwischen Automobilanwendungen und Anwendungen als Dämmstoff.

Tafel 1: Daten Aluminiumschäume (typische Beispiele)

Table 1: Aluminium foam data (typical examples)

Legierung		Al99,5	AlCu4	Al99,5 massiv
verwendetes Treibmittel	-	TiH ₂	TiH ₂	-
Wärmebehandlung des Schaumes	-	keine	ausgehärtet	-
Dichte	g/cm ³	0,4	0,7	2,7
mittlerer Porendurchmesser	mm	4	3	-
Druckfestigkeit	MPa	3	21	-
Energieabsorption bei 30% Stauchung	MJ/m ³	0,72	5,2	-
	kJ/kg	1,8	7,4	-
Elastizitätsmodul	GPa	2,4	7	67
dynamischer Verlustfaktor (1 kHz)	dimensionslos	25 · 10 ⁻⁴	-	<5 · 10 ⁻⁴
elektrische Leitfähigkeit	m/(Ω · mm ²)	2,1	3,5	34
spezifischer elektrischer Widerstand	μΩ cm	48	29	2,9
thermische Leitfähigkeit	W/(m · K)	12	-	235
thermischer Ausdehnungskoeffizient	1/K	23 · 10 ⁻⁶	24 · 10 ⁻⁶	23,6 · 10 ⁻⁶

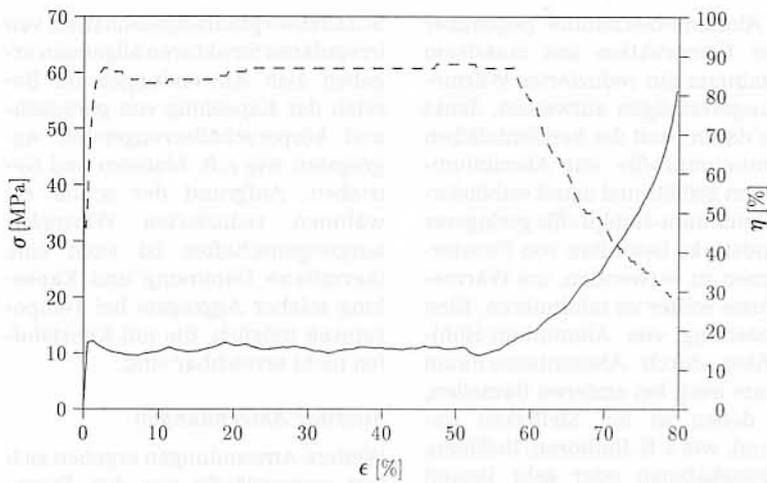


Bild 4: Spannungs-Stauchungs-Diagramm eines Aluminium-Basis-Schaumes der Dichte $0,44 \text{ g/cm}^3$

Fig. 4: Stress-compression diagram of an aluminium-based foam with density 0.44 g/cm^3

Automobilindustrie

Eine Eigenschaft von Aluminiumschaum ist das günstige Verhältnis von Masse zu Steifigkeit. Diese Eigenschaft legt einen Einsatz großflächiger Schaumbauteile nahe, bei denen die Anforderungen an die Steifigkeit hoch sind. Beispiele dafür sind die Bodengruppe im Kraftfahrzeug, Motorhauben, Kofferraumdeckel und Schiebedächer. Diese Teile sollen sich unter dem Einfluß etwa des Fahrtwindes nicht elastisch verformen oder gar anfangen zu schwingen. Letzteres wird durch die günstigen Dämpfungseigenschaften der Aluminiumschäume noch zusätzlich verhindert. Im Nutzfahrzeugsbereich sind aus dieser Gruppe der Anwendungen noch Aufbauten für Lastkraftwagen zu nennen, wobei bei Kühlfahrzeugen

auch die reduzierte Wärmeleitfähigkeit des Aluminiumschaums von Vorteil ist.

Eine interessante Eigenschaft von Aluminiumschaum ist, das Knick- und Stauchverhalten von Metallhohlprofilen oder -teilen nachhaltig zu beeinflussen, wenn diese mit einem Kern aus diesem Schaum gefüllt werden. Das bietet einen Einsatz zur Versteifung von Stoßstangen, Unterfahrschutzelementen von Lastwagen, Kfz-Konstruktionselementen wie der B-Säule oder anderen knick- oder stauchgefährdeten Hohlteilen an. Bild 5 zeigt Formteile aus Aluminiumschaum der Dichte $0,5 \text{ g/cm}^3$, die in Stahlblech-Hohlkonstruktionen im Kraftfahrzeug eingebracht werden können, um die Knickgefährdung im Crashfall zu vermindern. In Bild 6 sind mit Aluminiumschaum ausgeschäumte Aluminiumrohre zu sehen. Die Dichte des Schaumkernes beträgt hier zwischen $0,5$ und $0,8 \text{ g/cm}^3$, die des ganzen Bauteils $0,9$ bis $1,3 \text{ g/cm}^3$.

Die guten Energieabsorptionseigenschaften von Aluminiumschaum könnten beim Einsatz als Front- oder Seitenaufprallschutz ausgenutzt werden. Beim Seitenaufprall besteht die Notwendigkeit, Energie effizient in ein leichtes, möglichst in die Tür integrierbares Bauteil einzuleiten. Das ist auf zweierlei Art möglich: Die vorteilhafte Spannungs-Stauchungs-Kurve von Aluminium gestattet eine gute Energieaufnahme durch irreversible plastische Verformung des Schaums, die oben erwähnte Ausschäumung von Hohl-

profilen gestattet eine Verbesserung konventioneller energie- und stoß-absorbierender Bauteile.

Eine Erweiterung der Schäumtechnik auf Schäume mit offener Porosität sowie auf Schäume aus höherschmelzenden Metallen (etwa Stahl) wird eine zusätzliche Palette von Anwendungen im Automobilbereich eröffnen. Offenporige Metallschäume könnten als Dieselmotorteilfilter, Wärmetauscher oder Luftfilter dienen, falls es gelingt, die offene Porosität entsprechend einzustellen. Schäume aus Stahl kämen für Hochtemperaturanwendungen wie für die Isolation des Auspuffkrümmers oder als Katalysatorträger in Frage, für die der Schmelzpunkt von Aluminium zu niedrig liegt.

Luft- und Raumfahrt

In der Luftfahrt und in noch stärkerem Maße in der Raumfahrt ist das niedrige spezifische Gewicht von Aluminiumschaum im Zusammenspiel mit seinen günstigen Eigenschaften der Grund für die Nachfrage aus diesen Gebieten. Biegesteife großflächige Strukturen könnten als Bodenplatten, Trennwände oder auch für spezielle Konstruktionen, wie z. B. Bordküchen, verwendet werden. Herkömmlich verwendete Materialien in diesem Bereich sind beispielsweise Honigwabenstrukturen, deren Nachteile (Nichtresistenz der Klebung gegen hohe Temperaturen, hoher Preis, anisotrope Eigenschaften) mit entsprechenden Konstruktionen aus Aluminiumschaum vermieden werden könnten. In Bild 2 ist ein Verbundteil



Bild 5: Formteile aus Aluminiumschaum der Dichte $0,5 \text{ g/cm}^3$; Länge der Teile ca. 350 mm (Foto: Volkswagen)

Fig. 5: Shaped components made from aluminium foam of density 0.5 g/cm^3 ; component length 350 mm



Bild 6: Mit Aluminiumschaum ausgeschäumte Aluminiumrohre verschiedener Durchmesser und Wanddicken

Fig. 6: Aluminium tubes of various diameters and wall thicknesses filled with aluminium foam

aus Aluminiumschaum und massivem Aluminiumblech zu sehen, das diesen Anforderungen sehr nahekommt.

Meßtechnik

Die Tatsache, daß der nach dem pulvermetallurgischen Verfahren hergestellte Schaum geschlossporig ist, führt dazu, daß er in Wasser schwimmt. Dies war Ausgangspunkt für die Überlegung, Aluminiumschaum als Schwimmermaterial für Füllstandsmesser in druck- und temperaturbelasteten flüssigen Medien zu verwenden und in Konkurrenz zu herkömmlichen aus Titanblech und Stützringen zusammengesetzten Konstruktionen zu treten.

Metallschäume haben interessante akustische Eigenschaften. Man denkt daran, Impedanzwandler für Ultraschallmeßköpfe aus feinporigem Aluminiumschaum zu fertigen und damit die Anpassung von der Schallgeschwindigkeit im Meßkopf zu der in Luft vorzunehmen.

Aluminiumschaum kann in der Meßtechnik auch als Strukturmaterial eingesetzt werden, so z.B. für biegesteife Meßplattformen im Bereich der Biomechanik oder der Zerspanungstechnik.

Bauindustrie

In der Bauindustrie gibt es ein breites Spektrum von potentiellen Anwendungen für Produkte aus Aluminiumschaum. So besteht die Nachfrage nach leichten, steifen und nichtbrennbaren Fassadenelementen. Honigwabenstrukturen scheiden schon wegen ihres hohen Preises aus, so daß Platten aus Aluminiumschaum gute Chancen haben, sich diesen Bereich zu erobern.

Da Aluminiumschäume gegenüber einer Konstruktion aus massivem Aluminium ein reduziertes Wärmeleitungsvermögen aufweisen, denkt man daran, statt der herkömmlichen Aluminiumprofile mit Aluminiumschaum gefüllte und damit stabilisierte Aluminium-Hohlprofile geringerer Wandstärke beim Bau von Fensterrahmen zu verwenden, um Wärmeverluste weiter zu minimieren. Eine Aussteifung von Aluminium-Hohlprofilen durch Aluminiumschaum könnte auch bei anderen Bauteilen, bei denen es auf Steifigkeit ankommt, wie z. B. Rolltoren, Rolläden, Aufzugskabinen oder sehr langen Industrieleitern, wichtig werden.

Eine interessante Anwendungsmöglichkeit des IFAM-Verfahrens nützt den Aufschäumprozeß des aufschäumbaren Materials aus: Zur Befestigung von Stahllankern in Betonwänden wird über den Anker eine Hülse aus schäumbarem Aluminium gezogen und mit in das Bohrloch eingebracht. Durch lokale Erwärmung wird das Aluminium zur Expansion gebracht, wobei es das Bohrloch vollständig ausfüllt und nach dem Abkühlen für eine sehr feste Verankerung sorgt. Eine weitere mögliche Anwendung liegt im Bereich der Brandschutzverglasung. Beim Brand wird Glas weich und tendiert dazu, aus den Scheibhalterungen herauszufließen. Ist das Glas jedoch in seiner Halterung von aufschäumbarem Aluminium umgeben, so führt das im Brandfalle dazu, daß das expandierende Material einen Haltedruck auf die Scheibe ausübt und deren Herausfallen verzögert.

Dämmstoffe

Aus den günstigen mechanischen Dämpfungseigenschaften der Aluminiumschäume und den guten

Schallabsorptionseigenschaften von irregulären Strukturen allgemein ergeben sich Anwendungen im Bereich der Kapselung von geräusch- und körperschallerzeugenden Aggregaten wie z. B. Motoren und Getrieben. Aufgrund der schon erwähnten reduzierten Wärmeleitungseigenschaften ist auch eine thermische Dämmung und Kapselung solcher Aggregate bei Temperaturen möglich, die mit Kunststoffen nicht erreichbar sind.

Sonstige Anwendungen

Weitere Anwendungen ergeben sich fast zwangsläufig aus den Eigenschaften der Aluminiumschäume. Beispielsweise wurde ein Einsatz als Grundmaterial für Kochtöpfe vorgeschlagen. Weiterhin ist es denkbar, sehr leichte Walzen für die Druck- oder Papierindustrie durch Ausschäumen einer dünnen Blechhülse mit Aluminium herzustellen.

Schrifttum / References

- ¹⁾ Baumeister, J.: Deutsche Patente DE 40 18 360 und 41 01 630, 1990, 1991
- ²⁾ Baumeister, J.; Banhart, J.; Weber, M.: Proc. Int. Symp. »Advanced materials for lightweight structures«, ESTEC, NL, 25.-27. 3. 1992, S. 351
- ³⁾ Banhart, J.; Baumeister, J.; Weber, M.: VDI-Berichte 1021, 277 (1993)
- ⁴⁾ Baumeister, J.; Banhart, J.; Weber, M.: Proc. Int. Conf. »Materials by Powder Technology«, Dresden, 22.-26. 2. 1993, S. 501
- ⁵⁾ Kunze, H.-D.; Baumeister, J.; Banhart, J.; Weber, M.: in »Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis«, Bd. 9, S. 330, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993

Autoren / Authors

Dr.rer.nat. John Banhart (1958) studierte Physik an der Universität München und an der TU Wien. Die Promotion erfolgte in Physikalischer Chemie in München. Seit 1991 ist er am IFAM, Fraunhofer-Institut, Bremen, beschäftigt.
Dipl.-Phys. Joachim Baumeister (1959) studierte Physik in Bonn. Seit 1985 ist er am IFAM, Fraunhofer-Institut, Bremen, beschäftigt. Er erfand 1990 das Verfahren zum Aufschäumen von Metallen.
Dipl.-Ing. Markus Weber (1966) studierte Metallurgie und Werkstofftechnik an der RWTH Aachen. Seit 1991 ist er am IFAM, Fraunhofer-Institut, Bremen, beschäftigt.

Foamed metal – a material with prospects

Foamed metals can be produced by a powder metallurgical method invented and patented by the Fraunhofer-Institute in Bremen. For the production of foamed aluminium, commercial powders of aluminium or aluminium-based alloys are mixed with a foaming agent and subsequently compacted. As a result a semi-finished product is obtained in

which the foaming agent is homogeneously distributed within a dense, virtually non porous metallic matrix. This foamable material can be processed into sheets, rods, profiles etc. by conventional techniques like rolling, swaging or extrusion. Finally foamed metal parts are obtained by merely heating the material to temperatures above the melting point of

the matrix metal. The density of metal foams can be controlled by adjusting the content of foaming agent and several other foaming parameters. If metal hydrides are used as foaming agents a content of less than 1% is sufficient in most cases. The method is not restricted to aluminium: tin, zinc, brass, bronze and lead can also be foamed by choosing appropriate foaming agents and process parameters.

The most prominent property of foamed metal is its low density. The

densities of aluminium foams usually range between 0.5 and 1 g/cm³ although even lower values down to 0.2 g/cm³ can be achieved. The mechanical properties greatly depend on the apparent density of the foamed metal. Strength and Young's modulus increase rapidly with increasing density. The electrical and thermal conductivities of foamed metals are reduced in comparison to the corresponding solid materials, whereas the thermal expansion coefficient remains unchanged. Due to the special form of the compressive stress-strain curve foamed materials have a high capability to absorb great amounts of energy at a relatively low strength level. With aluminium foams an energy absorption of 85% in comparison to an ideal absorber for compression levels up to 60% can be achieved.

Possible applications for metal and specially aluminium foams can be found in the automobile industry, the aviation and space industry, the building and constructing industry, etc. Obviously an important application range for metallic foams will be energy absorption. Using suitable elements of aluminium foam it will be possible to induce a controlled, programmed deformation of the crashed zone in cars or trains with maximum energy consumption. The increasing demands for safety in automobiles lead to a high vehicle weight in many cases. This is in conflict with the further demands for low fuel consumption. Light, stiff structures made of aluminium foam could help to reduce the weight. In aerospace applications the replacement of expensive honeycomb structures by foamed aluminium sheets could lead to reduced costs. A further potential is to be seen in fire protection as well as in insulation of thermal or vibrational energy.

By modifying the preparation technology it should be possible to obtain open-pored aluminium foams. In this case there are several additional applications in the range of heat exchangers, filters and catalyst carriers, etc. For this reason, investigations of foamed metals will also be extended in this direction. An extension of the technology to the foaming of metals such as steel or titanium will introduce a wide scope of applications which make use of the high temperature resistance and extreme strength of these materials.

