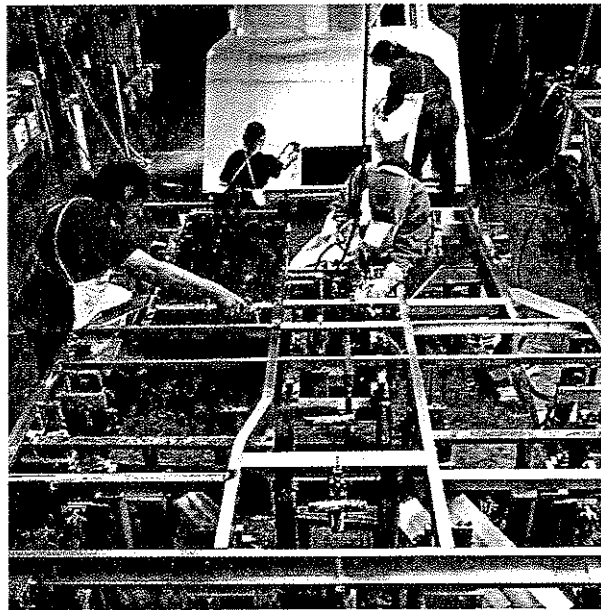


# ALUMINIUM

**Aluminium surface:  
Wear resistant aluminium surfaces  
by laser alloying**



**Technology:  
Extrusion of curved  
aluminium sections**

**Materials  
development:  
Weldable AlMgSc  
alloys for transportation  
technology**

3

Volume 76 March 2000

International Journal for Industry, Research and Application

# Technologische und fraktographische Untersuchungen an Leichtbaustrukturen mit Aluminiumschaum

## Technological and fractographic investigations of lightweight structures made with aluminium foam

J. Wolf, W. Kreuzer, Erding, J. Banhart, Bremen

Zur Bewertung von Leichtbaustrukturen aus Aluminiumschaum wurden Sandwich-Platten und ausgeschäumte Rechteck- und Rundprofile hergestellt und mechanisch-technologische, fraktographische sowie Korrosionsuntersuchungen durchgeführt.

Ein vom IFAM entwickeltes und patentiertes pulvertechnologisches Verfahren erlaubt die einfache Herstellung geschäumter Metallkörper [1]. Der pulverförmige metallische Ausgangsstoff wird intensiv mit einem Treibmittel (z.B. Titanhydrid) gemischt und unter kontrollierten Bedingungen durch axiales Heißpressen oder Extrusion zu einem Halbzeug verdichtet. Durch Erwärmung des Halbzeugs bis knapp über den Schmelzpunkt erfolgt die Freisetzung des Treibmittels und damit der Aufschäumvorgang. Beim Ausschäumen von Hohlformen zur Herstellung von Formteilen ist die Außenhaut der Form- bzw. Schaumteile geschlossen. Bei schmelzmetallurgischer Herstellung [2] werden Schäume dadurch hergestellt, daß eine Schmelze durch Zugabe von etwa 15% Siliziumkarbidpartikeln in ihrer Viskosität erhöht und dann durch Einblasen von Gas aufgeschäumt wird. Der sich an der Oberfläche ansammelnde Schaum wird mit einem liirzeheständigem Förderband abgezogen und dann abgekühlt.

In der vorliegenden Untersuchung wurden nach beiden Verfahren hergestellte Schäume zu Sandwichplatten mit Aluminium-Deckblechen oder ausgeschäumten Rohren bzw. Rechteckprofilen weiterverarbeitet. Diese wurden hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften und ihres Versagensverhaltens

miteinander verglichen. Ergänzend dazu wurden Korrosionsversuche und fraktographische Untersuchungen durchgeführt. Die Porenstruktur der pulvermetallurgisch hergestellten Schäume ist feinporig, aber unregelmäßig. Der schmelz-metallurgisch hergestellte Schaum war etwas grobporiger. Bei den aus den Sandwichplatten hergestellten Proben konnten teilweise entlang der Schnittkanten Bereiche mit mangelhafter Bindung zwischen Deckblech und Schaum erkannt werden [3,4].

### Mechanisch-technologische Prüfungen

Bei den Zug-, Schub- und Druckversuchen werden die Eigenschaften des Werkstoffverbundes im wesentlichen nur von einer Komponente bestimmt. Für die Eigenschaften bei Druckbelastung ist der Schaum, bei Zug- und Schubbeanspruchung ist das schwächste Glied der Kette "Schaum - Verbindungsschicht (Kleber oder metallische Bindung) - Deckblech" die bestimmende Komponente. Die Eigenschaften bei Biege- und Knickbeanspruchung hängen dagegen vom Zusammenspiel aller Komponenten des Werkstoffverbundes ab.

Bei den Druckversuchen wurden zusätzlich zum Punkt des ersten Versagens die Spannung bei 25% Stauchung und die Stauchung bei 20 MPa Druckspannung als Maß für die Komprimierbarkeit des Schaumes bestimmt. Die Druckeigenschaften hängen im wesentlichen von der Dichte des Aluminiumschaumes ab (Bild 1). Das bei Schäumen häufig ausgeprägte Plateau im Spannungs-Stauchungs-Diagramm, wurde ver-

To evaluate lightweight structures made with aluminium foam, sandwich plates and foam-filled rectangular and round sections were made and subjected to mechanical-technological, fractographic and corrosion investigations.

A powder-technological process developed and patented by IFAM allows foam-filled metallic articles to be produced quite simply [1]. The powdered metallic starting material is mixed intensively with a vapour-forming agent (e.g. titanium hydride) and compacted under controlled conditions by axial hot pressing to form a semifabricate. When the semifabricate is heated to just above the melting point, the vapour-forming agent is released so that the foam formation process takes place. To foam-fill hollow moulds in order to prepare shaped components, the outer skin of the moulded or foam component is closed. For the production of foams by the melt-metallurgical route [2], the viscosity of the melt is increased by adding about 15% of silicon carbide particles and the melt is then foamed by blowing a gas into it. The foam collecting at the surface is carried away by a heat-resistant conveyor and then cooled.

In the present investigation foams produced by both these methods were processed further to make sandwich plates with aluminium cover-sheets, or foam-filled tubes or rectangular sections. These were compared with one another in relation to their mechanical-technological properties and their failure behaviour. As a supplement, corrosion tests and fractographic investigations were carried out.

The pore structure of the powder-metallurgically prepared foams is

fine but not uniform. The foam produced by melt-metallurgy had rather coarser pores. In testpieces prepared from the sandwich plates, in some cases areas with defective adhesion between the cover-sheet and the foam were recognisable along the cut edges [3, 4].

### Mechanical-technological tests

In tensile, shear and compression tests the properties of the composite material are determined essentially by one component. For the properties under compression loading, the foam itself is the determining component, while under tensile and shear loading it is the weakest link in the chain "foam - bonding layer (adhesive or metallic bonding) - cover-sheet" that determines the result. In contrast, under bending and buckling loads the properties are governed by the interplay between all the composite's components.

In the compression tests, in addition to the point of first failure, the stress at 25% compression and the compression at a compressive stress of 20 MPa were determined as measures of compressibility of the foam. The compression properties depend essentially on the density of the aluminium foam (fig. 1). The well-marked plateau in the stress-compression diagram often found with foams was not observed in this case, probably because the thickness of the aluminium foam was too small (20 mm) and its density relatively high. There was no apparent influence of differences in the chemical composition of the foams upon their properties under compressive loading.

In tensile tests perpendicular to the cover-sheets the testpieces with lowest density had a tensile strength of around 0.3 MPa. The highest tensile strengths were given by the composite "melt-metallurgically prepared AlMg7 + 17% SiC foam adhesively bonded with epoxide resin", made with the adhesive of highest strength (around 3 MPa). The shear test results cor-

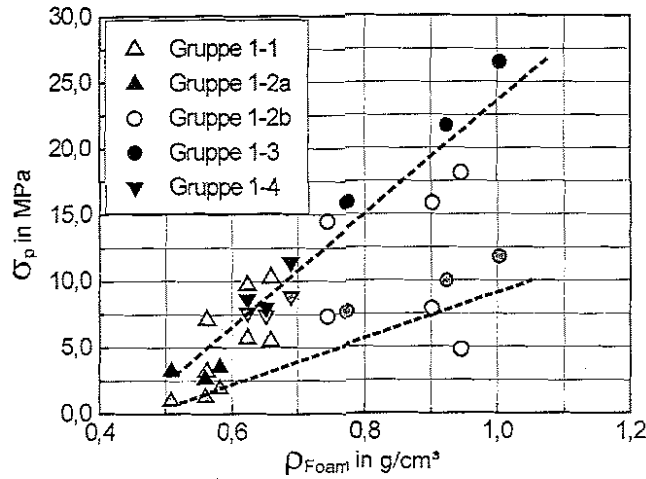


Bild 1: Ergebnisse der Druckversuche an Sandwichen; die grauen Zeichen geben die Spannung bei der ersten Schädigung, die schwarzen Zeichen die Spannung bei 25% Stauchung an.

Fig. 1: Results of compression tests on sandwiches; the grey numbers show the stress at which damage begins and the black numbers show the stress at 25% compression

#### Probengruppen:

- 1-1 AlSi12-Schaum, walzplattiert
- 1-2a AlSi12-Schaum niedriger Dichte, PU-Kleber
- 1-2b AlSi12-Schaum hoher Dichte, PU-Kleber
- 1-3 6061-Schaum, PU-Kleber
- 1-4 Hydro-Al-Schaum, Epoxidharzkleber

#### Specimen groups:

- 1-1 AlSi12 foam, roll clad
- 1-2a AlSi12 foam (low density), PU adhesive
- 1-2b AlSi12 foam (high density), PU adhesive
- 1-3 6061 foam, PU adhesive
- 1-4 Hydro-Al foam, epoxide resin adhesive

mutlich wegen zu geringer Aluminiumschaumdicke (20 mm) und/oder der relativ hohen Dichte der untersuchten Schäume nicht gefunden. Ein Einfluß der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung der Schäume auf die Eigenschaften unserer Druckbeanspruchung war nicht erkennbar.

Im Zugversuch senkrecht zur Deckschicht erreichten die Proben mit der geringsten Dichte eine Zugfestigkeit von etwa 0,3 MPa. Die höchsten Zugfestigkeiten erreichte der Verbund "schmelzmetallurgisch hergestellter AlMg7 + 17% SiC-Schaum mit Epoxidharz verklebt", der mit dem Kleber der höchsten Festigkeit hergestellt wurde (ca. 3 MPa). Die Ergebnisse der Schubversuche entsprechen im wesentlichen denen der Zugversuche. Die erreichten Schubfestigkeiten liegen etwa zwischen 0,6 MPa und 6 MPa.

Die Biegeversuche an Sandwichen wurden als Dreipunkt- und Vierpunkt-Biegeversuche durchgeführt. Sie ermöglichen eine vergleichende Abschätzung des Verhaltens des Werkstoffverbundes.

Die Auflagerrollen hatten einen Radius von 35 mm. Für die 3- und 4-Punkt-Biegung wurde ein äußerer Auflagerrollenabstand von 210 mm und bei 4-Punkt-Biegung ein innerer Auflagerrollenabstand von 75 mm gewählt. Die wesentlichen Kennwerte sind die Biegesteifigkeit (E-Modul) und die Biegefestigkeit. Finite-Elemente-Berechnungen ergeben, daß die Biegesteifigkeit des Verbundes mit steigendem Schub-Modul des Schaumes und Zunahme der Dicke der Deckbleche zunimmt. Der Einfluß der Blechdicke ist dabei größer als der Schub-Modul des Schaumes. Überagende Bedeutung kommt jedoch dem E-Modul der Verbindungsschicht zu. Variationen in dem für Klebstoffe üblichen Bereich des Schub-Moduls (< 5000 MPa) führen zu sehr starken Änderungen der Biegesteifigkeit des Verbundes. Eine weitere Erhöhung des Schub-Moduls der Verbindungsschicht führt nur noch zu relativ geringer Zunahme der Biegesteifigkeit des Verbundes. Diese theoretischen Überlegungen werden durch die Versuche bestätigt.

Alle Proben mit hohem E-Modul der Verbindungsschicht (Walzplattierung, Epoxidharz-Kleber), führten zu hoher Biegesteifigkeit des Verbundes (ca. 80 bis 110 MPa). Die mit dem PU-Kleber  $\gg$  erzielten Proben weisen signifikant niedrigere Biegesteifigkeiten auf (ca. 20 bis 38 MPa). Die Einflüsse der übrigen Parameter wie Dichte und chemische Zusammensetzung des Schaumes, Festigkeit und Dicke der Deckschicht sind vernachlässigbar.

Die Ergebnisse der Biegeschwingersuche korrelieren gut mit denen der statischen Biegeversuche. Alle untersuchten Sandwiche und ausgeschäumten Hohlprofile zeigten bei Belastungen bis etwa 50% der quasistatischen Biegefestigkeit bis 5 Millionen Lastspiele keine Schäden.

Die Knick- und Biegeversuche an ausgeschäumten Halbzeugen zeigten, daß der Schaum eine stabilisierende Wirkung gegenüber nicht ausgeschäumten Hohlprofilen hat. Im wesentlichen wird ein Einknicken oder Ausbeulen der Hohlprofile verhindert (Bild 2). Bei Biegebelastung wird das Ausknicken behindert und das Einreißen des Profils an der Stelle der höchsten Zugbeanspruchung, also die Zugfestigkeit des Profilwerkstoffes, bestimmend für das Versagen (Bild 4). Dieser Effekt nimmt erwartungsgemäß mit zunehmender Schaumdichte zu und hängt in

starkem Maße von der Form und Dicke des gewählten Hohlprofils ab. Ein nennenswerter Einfluß der Verbindung zwischen Schaum und Hohlprofil wurde nicht gefunden. So war der Unterschied in den Festigkeitswerten zwischen nicht ausgeschäumten und ausgeschäumten Aluminium Hohlprofilen bei "flach aufgelegten Rechteckprofilen etwas größer als bei "hochkant" aufgelegten, insgesamt jedoch gering (bis etwa 30%). Bei den dünnwandigeren Rundprofilen waren die Unterschiede erwartungsgemäß größer. Die niedrigsten Biegefestigkeitswerte hatten die reinen Aluminiumschaumproben (ca. 10 MPa). Eine etwa 5-fache höhere Biegefestigkeit zeigten die nicht ausgeschäumten Aluminiumrohre (ca. 50 MPa) und eine nochmalige Verdopplung die ausgeschäumten Aluminiumrohre (ca. 90 MPa). Letztere verformten sich nur wenig und versagten erst durch Einreißen. Die Festigkeit der ausgeschäumten CFK-Profilelagen etwa im Bereich der Aluminiumrohre. Zur Bestimmung des Energieaufnahmevermögens wurden Fallversuche an reinen Schaumproben und Sandwichproben durchgeführt. Die Proben wurden auf einem Falltisch mit einer Stahlplatte als Unterlage aufgelegt. Die Größe des Eindruckes der Kugel hängt erwartungsgemäß von der Aluminiumschaumdichte ab: Eine

responded essentially to those of the tensile tests, with shear strengths ranging approximately from 0.6 to 6 MPa.

Bend testing was carried out on sandwich panels as three-point and four-point bend tests. These enabled a comparative appraisal of the behaviour of the composite material. The contact rolls had radius 35 mm. In both the 3-point and 4-point tests the outer contact rolls were spaced 210 mm apart, and in the 4-point test the inner contact rolls were 75 mm apart. The essential characteristics are the bend rigidity ( $E$ -modulus) and the bend strength. Finite-element calculations show that the bend strength of the composite increases with increasing shear modulus of the foam and increasing thickness of the cover-sheets, the influence of cover-sheet thickness being greater than that of the foam's shear modulus. Overwhelmingly important, however, is the  $E$ -modulus of the bonding layer. Variations within the shear modulus range usual for adhesives ( $< 5000$  MPa) lead to very pronounced changes in the bend strength of the composite. A further increase in the shear-modulus of the bonding layer results in only a relatively small additional increase of the composite's bend rigidity. These theoretical considerations were confirmed by the tests. All the specimens with bonding layers having high  $E$ -modulus (roll-cladding, epoxide resin adhesive) corresponded to composites with higher bend strength (around 80 to 110 MPa). The specimens bonded with PU adhesive showed significantly lower bend strengths (20 to 38 MPa). The influence of the other parameters, such as the density and chemical composition of the foam and the strength and thickness of the cover-sheet, was negligible by comparison.

The results of the bending fatigue tests correlate well with those of the static bend tests. All the sandwiches and foam-filled hollow sections showed no damage after up to 5 million load cycles at loads up to about 50% of the quasi-static bend strength.

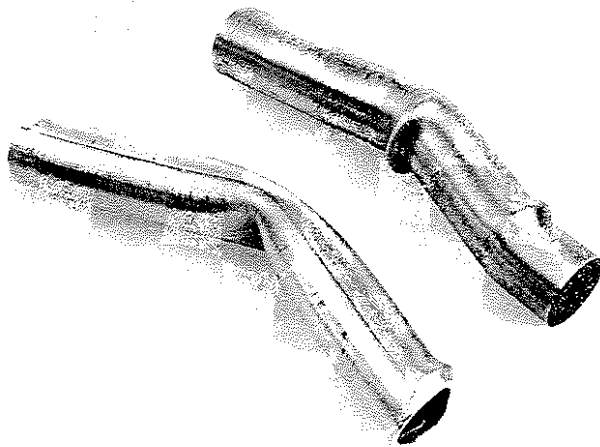


Bild 2: Nichtausgeschäumtes Aluminiumrundprofil (links) und ausgeschäumtes Aluminiumrundprofil (rechts) nach dem Knickversuch; starke Ausknickung des linken Profils ist deutlich erkennbar

Fig. 2: Non foam-filled aluminium round section (left) and foam-filled aluminium round section (right) after the buckling test: marked buckling is apparent in the left-hand section

The buckling and bend tests on foam-filled semis showed that compared with non foam-filled hollow sections, the foam has a stabilising effect, in essence impeding the buckling or bowing of the hollow section (fig. 2). Under bend loading, buckling is prevented as also is cracking of the section at the point of maximum tensile stress. i.e. the tensile strength of the section is increased, which is a determinant factor for its failure, is increased (fig. 4). As expected, this effect becomes more pronounced with increasing foam density and depends to a large extent on the shape and thickness of the hollow section considered. No appreciable influence of the bonding between foam and hollow section was observed. Thus, the strength difference between non foam-filled and foam-filled aluminium hollow sections was rather larger with rectangular sections laid "flat" than with ones laid "on edge", but was on the whole fairly small (up to about 30%). As expected, the differences were larger with thinner-walled round sections. The lowest bend strength values were given by pure aluminium foam specimens [around 10 MPa]. The bend strength of non foam-filled aluminium tubes was about 5 times higher (around 50 MPa), and this was nearly doubled again in the foam-filled tubes (about 90 MPa). The latter deformed only slightly and failed by cracking in the first instance. The strength of foam-filled carbon fibre reinforced sections was approximately the same as that of the aluminium tubes.

To determine the energy absorption capacity, drop tests were carried out on plain foam specimens and sandwich specimens. The specimens were laid on a drop table with a steel plate backing. As expected, the size of the indentation made by the dropped ball depends on the density of the aluminium foam: doubling the density reduces the penetration depth to about half. No essential influences of chemical composition differences in the aluminium foam or of the type of bonding between the foam

Verdopplung der Schammdichte reduziert die Eindrucktiefe auf etwa die Hälfte. Wesentliche Einflüsse, die auf die unterschiedliche chemische Zusammensetzung des Aluminiumschaumes oder der Art der Verbindung der Aluminium-Deckbleche mit dem Schaum zurückzuführen wären, wurden nicht festgestellt.

#### Wasseraufnahme- und Korrosionsverhalten

Das Wasseraufnahmevermögen wurde nach DIN 51 056 "Tränkung durch Kochen" an bearbeiteten Aluminiumschaumblocken ohne Aluminiumdeckbleche bestimmt. Die Wasseraufnahme lag bei den pulvermetallurgisch hergestellten Schäumen etwa zwischen 60% und 90% und bei dem schmelzmetallurgisch hergestelltem Schaum bei etwa 40% bis 70%. Das hohe Wasseraufnahmevermögen weist daraufhin, daß die Schäume nicht geschlossenporig sind, sondern in den Zellwänden Mikrorisse und/oder Poren aufweisen müssen. Das Korrosionsverhalten der Schäume wurde mittels Wechseltauchversuch (in Anlehnung an die ASTM G44) und Salzsprühtest (DIN 50 021) geprüft. Beim Wechseltauchversuch betrug die Versuchsdauer 6 Wochen (entspricht 1000 Belastungszyklen). Pro Belastungszyklus wurden die Proben ohne Zugbelastung 10 Minuten in eine 3,5%-ige NaCl-Lösung mit einem pH-Wert von etwa 7 einge-

hängt, anschließend 50 Minuten an Luft mit  $27 \pm 10$  °C bei  $45 \pm 6\%$  rel. Feuchte getrocknet. Alle Aluminium-Deckbleche zeigten eine geringe flächige, im Bereich der Ränder muldenförmige Korrosion. Bei den am stärksten korrodierten Aluminiumblechen betrug die Muldentiefe etwa 0,1 mm. An den Innenseiten der Proben konnten bis zu 0,13 mm tiefe Korrosionsstellen nachgewiesen werden. Die Aluminiumschäume werden generell etwas stärker angegriffen als die Aluminium-Deckbleche. Bei den AlSi12-Schäumen erfolgte der Korrosionsangriff interkristallin mit Kornzerfall, bei dem schmelzmetallurgisch hergestellten Schaum wurden Bereiche mit SiC-Partikeln primär transkristallin angegriffen. Der Schaum aus der Legierung AlMgSi1 wurde am wenigsten korrosiv geschädigt. Im Salzsprühtest wurden die Proben schrägliegend 6 Wochen besprüht. Die Deckbleche aller Proben wurden sehr wenig korrosiv angegriffen. Der Angriff erfolgte flächig und muldenförmig. Die Korrosionsmulden erreichten eine maximale Tiefe von 0,05 mm. Die Aluminiumschäume wurden etwas stärker angegriffen als die Aluminiumdeckbleche.

#### Versagensverhalten und fraktographische Untersuchungen

Ein wesentlicher Punkt zur Beurteilung der Schaumhalbezeuge ist neben den technologischen Kenn-

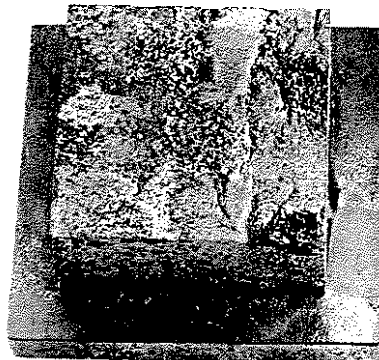


Bild 3: Walzplattierte Zugprobe nach dem Zugversuch; lokal Bruchflächenbereiche ohne Bindung zwischen Aluminiumschaum und Aluminiumdeckblech

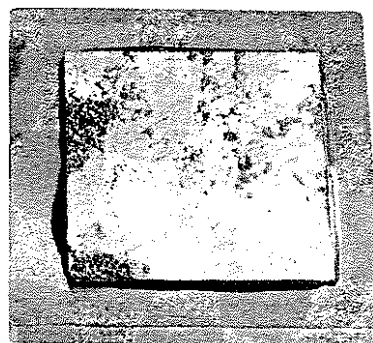


Fig. 3: Roll-clad tensile specimen after the tensile test; local fracture surface areas without connection between the aluminium foam and the aluminium cover-sheet

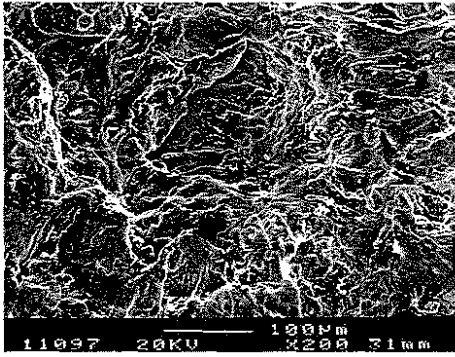


Bild 4: REM-Aufnahme von der Bruchfläche einer im Aluminiumschaum gebrochenen geklebten Zugprobe; deutlich sind die Bruchstrukturen [Waben] zu erkennen

Fig. 4: SEM micrographs of the fracture surface of an adhesively bonded tensile specimen that has broken within the aluminium foam: the fracture structures (honeycombs) are clearly recognisable

werten das Versagensverhalten. Beim Zugversuch quer zur Dicke erfolgte der Bruch bei fast allen Zugproben teilweise im Kleber; nur die Proben mit der geringsten Schaumdichte brachen ausschließlich im Schaum. Der Bruch an walzplattierten Zugproben erfolgte größtenteils entlang der Grenzfläche Aluminiumschaum zu Aluminiumdeckblech. Die Trennflächen waren über große Bereiche ohne Bruchstrukturen, was auf eine schlechte Haftung zwischen Aluminiumdeckblech und Aluminiumschaum schließen läßt (Bilder 3 und 4). Die Probe mit der geringsten Zugfestigkeit zeigte die schlechteste Bindung. Das grundsätzlich hohe Potential der metallischen Bindung der walz-

plattierten Proben konnte nicht ausgeschöpft werden.

Die Rückschlüsse aus den Ergebnissen der Schubversuche entsprechen im wesentlichen denen aus den Zugversuchen. Die mit PU-Klebern geklebten Proben versagten meist im Kleber, während die walzplattierten bzw. mit Epoxidharz geklebten Proben weitgehend im Aluminiumschaum versagten (Bild 5).

Im Biegeversuch zeigten die walzplattierten Proben ein kritisches Versagensverhalten, da bei ihnen die Aluminiumdeckbleche plötzlich und ohne erkennbare Vor-Schädigung abplatzten. Dies führte zum schlagartigen Versagen der Gesamtstruktur. Bei allen anderen Proben bildeten sich zuerst unter den inneren Auflagerrollen senkrechte Anrisse im Aluminiumschaum, ohne daß die Gesamtstruktur versagte (Bild 6). Erst bei weiterer Belastung kam es zur Ablösung der Aluminiumdeckbleche. Der Werkstoffverbund versagte in allen Fällen durch Ablösen der Verbindungsschicht. Schubversagen im Aluminiumschaum wurde bei keiner Probe festgestellt.

Im Biegeschwingversuch versagten bei einer Erhöhung der Last über 50% der quasistatischen Biegefestigkeit die walzplattierten Sandwichplatten bereits nach wenigen Lastwechseln schlagartig durch Abplatzen der Aluminiumdeckbleche. Bei den geklebten Sandwichen entstanden zunächst wie im quasistatischen Versuch Anrisse im Schaum, die sich lang-

and the aluminium cover-sheet were observed.

Water uptake and corrosion behaviour

The water uptake capacity was determined in accordance with DIN 51 056 "Saturation by boiling", using machined aluminium foam blocks with no cover-sheets. Water uptake by foams prepared by powder metallurgy was around 60% to 90%, and that of melt-metallurgically prepared foams 40% to 70%. The high water uptake indicates that the foams do not have closed pores, but rather, their cell walls must have micro-cracks and/or perforations.

The corrosion behaviour of the foams was investigated by means of alternating immersion tests (similar to the procedure of ASTM G44) and salt-spray tests (DIN 50 021). In the alternating immersion tests, the test duration was 6 weeks (corresponding to 1000 exposure cycles) and for each cycle the specimens were suspended without tensile load for 10 min in 3.5% NaCl solution with a pH of approximately 7, and then dried in air at  $27 \pm 1^\circ\text{C}$  and  $45 \pm 6\%$  relative humidity for 50 min. All the aluminium cover-sheets showed slight laminar corrosion which became trough-shaped towards the edges. In the most severely corroded aluminium sheets, the trough depth was around 0.1 mm. On the inside of the specimens corrosion sites up to 0.13 mm in depth were found. The aluminium foams were generally rather more severely attacked than the cover-sheets. In AlSi12 foams the corrosion attack was intercrystalline with grain disintegration, while in melt-metallurgically prepared foams areas containing SiC particles suffered mainly transcrystalline attack. The AlMgSi1 foam was the one least damaged by corrosion.

In the salt-spray test the specimens were positioned obliquely and sprayed for 6 weeks. The cover-sheets of all the specimens suffered very little corrosion attack.

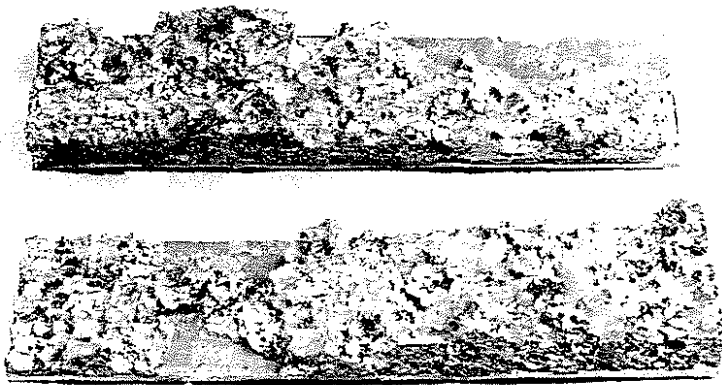


Bild 5: Geklebte Schubprobe nach dem Versuch: der Bruch verläuft teils durch den Aluminiumschaum, teils im Bereich der Klebung

Fig. 5: Adhesively bonded shear specimen after the test; the fracture runs partly through the aluminium foam and partly in the area of the bonding

The attack was both laminar and trough-like, with a maximum corrosion trough depth of 0.05 mm. The aluminium foams were attacked somewhat more severely than the aluminium cover-sheets.

#### Failure behaviour and fractographic investigations

An essential point in the evaluation of foam semifabricates besides their technological characteristics is their failure mode. In tensile tests transverse to their thickness, fracture takes place in almost all the tensile specimens partly in the adhesive, and only specimens with the lowest foam densities break exclusively within the foam. In roll-clad tensile specimens, fracture takes place for the most part along the interface between the aluminium foam and the cover-sheet. Over large areas the separated surfaces show no fracture structures, and this indicates poor adhesion between the aluminium cover-sheet and the foam (figs. 3 and 4). The specimen with the lowest tensile strength showed the poorest bonding. The fundamentally high potential of metallic bonding in roll-clad specimens could not be utilised to the full.

The conclusions emerging from the results of the shear tests correspond essentially to those from the tensile tests. The specimens bonded with PU adhesive mostly failed within the adhesive, while roll-clad or epoxide resin bonded specimens failed largely within the aluminium foam (fig. 5).

In the bend tests, roll-clad specimens showed a critical failure behaviour because in them the aluminium cover-sheet spalled suddenly and with no perceptible prior damage, causing abrupt failure of the entire structure. In all the other types of specimens cracks first formed beneath the inside contact rolls perpendicularly into the aluminium foam, without failure of the structure as a whole (fig. 6). Only after further loading was the cover-sheet detached. In all cases the composite material failed by detachment of the bonding layer.

Sam über die gesamte Plattendicke ausbreiteten. Die Gesamtstruktur versagte jedoch nicht. Erst bei noch höheren Lastspielzahlen, entstanden Risse in der Kleberschicht, die so lange weiterwuchsen, bis es zur Ablösung der Deckbleche und damit zum Versagen der Gesamtstruktur kam (Bilder 7 und 8). Das gutmütigste Verhalten zeigten die mit PU verklebten Proben. Die ausgeschäumten Rundprofile versagten durch Schwingrisse, die sich an der Außenoberfläche des Aluminium Rundprofils bildeten. Der Bruch der Profile erfolgte ohne nennenswerte makroskopische Verformung.

Besonders interessant für potentielle Anwendungen ist das Versagensverhalten im Knickversuch. Das Ausschäumen der Aluminiumrundprofile verhinderte das Ausknicken bis zu hohen Belastungen nahezu vollständig. Die Proben mit Integralschaum knickten nicht aus, sondern scherten nach lokalem Versagen ab. Bei den CFK-Proben versagten die einzelnen Wicklungen im Bereich der Auflagestellen ohne Ausknicken und sichtbare Schädigungen im restlichen Profil. Dies zeigt, daß durch Kombination von Schaum und Außenprofil das Knickverhalten in weiten Bereichen gezielt einstellbar ist.

Nach Abschluß der obengenannten Prüfungen wurden die Prüfkörper visuell und mittels REM auf fraktographische Merkmale unter-

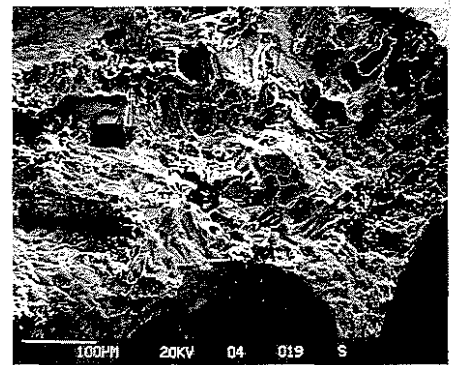


Bild 6: REM-Aufnahme von der Bruchfläche einer Biegeprobe entlang der senkrechten Anrisse

Fig. 6: SEM micrograph of the fracture surface of a bend specimen along the perpendicular crack

sucht. Grundsätzlich zeichnen sich bruch- und beanspruchungsspezifische mikrofraktographische Charakteristika bei Aluminiumschaumverbunden in der Bruchfläche zwischen der Verbindungsschicht (z.B. Deckblech-Kleberschaum) und im Schaum ab. Ähnlich wie bei der mikrofraktographischen Auswertung von Brüchen an massiven metallischen Werkstoffen, stellte sich bei den REM-Untersuchungen heraus, daß die Bruchflächen im Aluminiumschaum sichere Kennzeichen aufweisen, aus denen auf bestimmte Bruchmechanismen zu schließen ist. Der Vorgang der gewaltsamen Trennungen beim Zug-, Schub-, Biege- und Knickversuch zeichnete sich mikrofraktographisch durch Wabenstrukturen ab (Bilder

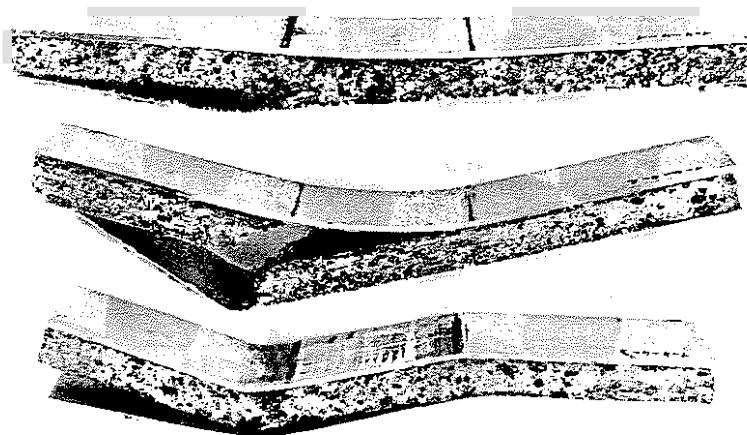


Bild 7: Geklebte Biegeprobe (hohe Dichte) nach dem Schwingversuch mit abgelösten Aluminiumdeckblechen

Fig. 7: Adhesively bonded bend specimen [high density] after the bending fatigue test, showing detached aluminium cover-sheets

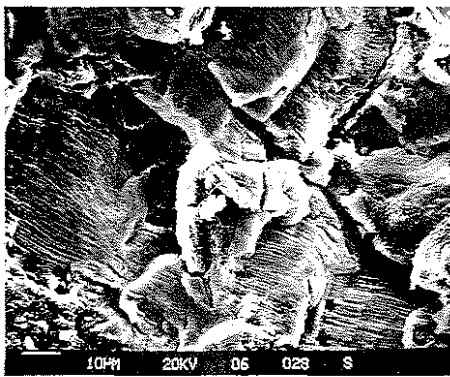


Bild 8: REM-Aufnahme von einer geklebten Schwingprobe mit deutlich ausgeprägten Schwingbruchstrukturen im Aluminiumschaum

Fig. 8: SEM micrograph of an adhesive-bonded fatigue specimen with clearly marked fatigue fracture structures in the aluminium foam

4 und 6). Zwischen Zug- und Scherbeanspruchung kann deutlich unterschieden werden. Das Verformungsverhalten der sehr gut plastisch verformbaren Aluminiumschäume unterschiedlicher Dichte, mit herstellungsbedingten, gewollten zahlreichen Hohlräumen, wird durch die Höhe der Wabenränder charakterisiert. Aufgrund der versuchs- und probenbedingten ungleichmäßigen Zugspannungsverteilung, wurden lokal auch Reißwaben im Reißgrund beobachtet. Bei den im Biegeschwingversuch geprüften Proben hinterließ die schwingende Beanspruchung beim Fortschreiten des Risses deutlich erkennbare Schwingstreifen in der Aluminiumschaumstruktur (Bild 8). Der Abstand der Schwingstreifen nimmt mit steigender örtlicher Spannung zu, was mit einem zunehmenden Reißfortschritt einhergeht.

An allen im Biegeschwingversuch geprüften Proben sind deutlich ausgeprägte Schwingstreifen im Aluminiumschaum nachzuweisen. Auffallend sind dabei die unterschiedlich ausgebildeten Schwingbruchstrukturen in Abhängigkeit von der lokalen Beanspruchung/Spannung und den werkstoffoedigten geometrischen Verhältnissen innerhalb des Aluminiumschaumes.

No shear failures in the aluminium foam were found in any of the specimens.

In the bending fatigue tests, when the load was increased to over 50% of the quasi-static bend strength, the roll-cast sandwich plates failed suddenly after only a few load cycles by spalling of the aluminium cover-sheet. In the adhesively bonded sandwich plates, as in the quasi-static test, cracks first appeared in the foam and these spread slowly through the whole thickness of the plate. However, there was no failure of the structure as a whole. Only after still more load cycles did cracks appear in the adhesive layer, which then grew until the cover-sheet became detached, when the structure as a whole failed (figs. 7 and 8). The best behaviour was that of the specimens bonded with PU. The foam-filled round sections failed due to fatigue cracks formed at the outer surface of the aluminium round section. The sections broke without any appreciable macroscopic deformation.

Particularly interesting from the standpoint of potential applications is the failure mode in buckling tests. Foam filling of the aluminium round sections prevented buckling almost completely up to high loads. Specimens with integral foam did not buckle, but rather, sheared after failing locally. In the carbon fibre reinforced specimens, individual windings failed in the area of the contact points without buckling or perceptible damage elsewhere in the specimen. This shows that by virtue of the foam/outer section combination, buckling behaviour can be controlled within a wide range.

After completion of the aforesaid tests, the specimens were examined visually and by SEM for their fractographic features. Essentially, aluminium/foam composites show fracture- and load-specific micro-fractographic characteristics at the fracture surface between the bonding layer (e.g. cover-sheet/adhesive/foam) and within the foam itself. As with the micro-fractographic evaluation of fractures in solid metallic materials, so

too in this case the SEM examinations indicated that the fracture surfaces in the aluminium foam show features from which particular fracture mechanisms can be deduced with certainty. The process of forcible parting in tensile, shear, bend and buckling tests is indicated micro-fractographically by honeycomb structures (figs. 4 and 6). It is possible to distinguish clearly between tensile and shear loading. The deformation behaviour of the very easily plastically deformable aluminium foams of various densities, with their desired numerous hollow spaces produced by the preparation method, is characterised by the height of the honeycomb edges. Because of the non-uniform tensile stress distribution resulting from the nature of the tests and specimens, tear honeycombs were also observed locally at the base of cracks. In specimens exposed to bending fatigue tests the fluctuating load produced clearly recognisable fatigue striations as the crack advanced through the aluminium foam structure (fig. 8). The spacing of the fatigue striations increases with increasing local stress, which is produced as the crack continues to advance.

All the specimens tested by bending fatigue show clear fatigue striations in the aluminium foam. In this, a striking feature is the different formation of fatigue fracture structures depending on the local loading or stress and on the material-dependent geometrical situation within the aluminium foam.

#### Authors

K. Wolf (1948) graduated in mechanical engineering from Kaiserslautern and has since 1973 been engaged in fractographical and damage analysis at WIWEB.

W. Kreuzer (1955) studied materials science at Erlangen, where he joined in 1995. Since 1984 he has worked at WIWEB in the field of the technology of metallic and ceramic materials.

J. Banhart (1958) studied physics in Munich and Vienna, joining the staff of the latter in 1989. Since 1991 he has worked at IFAM in the field of cellular metals.



## Literatur/References

- [1] Banhart, J.; Baumeister, J.; Weher, M.: Geschäumte Metalle als neue Leichtbauwerkstoffe, VDI Berichte Nr. 1021, 1993
- [2] Ruch, W.; Kirkevåg, B.: Int. Patent Application WO 91/01387 (1991)
- [3] Banhart, J.; Baumeister, J.; Weher, M.: Metallschaum, ein Werkstoff mit Perspektiven. ALUMINIUM 70 (1994) 3/4
- [4] Banhart, J.; Baumeister, J.: Das Verformungsverhalten geschäumter Metalle, Metali, 51 Jahrgang, Nr. 1-2/97
- [5] Kreuzer, W.; Wolf, K.; Banhart, J.: Leichtbaustrukturen mit Aluminiumschaum. F&T-Vorhaben, 1997 [unveröffentlicht]
- [6] Seeliger, W.: Metall Foams, S. 79, Fraunhofer Symposium USA. 7.10. bis 8.10.1997, MIT-Verlag Bremen

## Autoren

K. Wolf, geb. 1948, Maschinenbaustudium, Kaiserslautern; seit 1973 beim WIWEB; Fraktographie/Schadensanalyse.

W. Kreuzer, geb. 1955, Studium Werkstoffwissenschaften, Erlangen, Promotion 1995; seit 1984 bei WIWEB; Technologie metallischer u. keramischer Werkstoffe.

J. Banhart, geb. 1958, Physikstudium. München/Wien, Promotion 1989; seit 1991 beim IFAM, Zellulare Metalle.

## Seco/Warwick liefert Wärmebehandlungsanlage für Grenville Castings

Die Grenville Castings Ltd., Penh, Ontario erhält eine komplette Lösungsglühanlage von Seco/Warwick, USA. Diese soll zur Lösungsglühung und Aushärtungsbehandlung von Aluminiumgussstücken eingesetzt werden. Die Linie wird im kontinuierlichen Betrieb arbeiten und über eine Kapazität von 1050 kg/h verfügen. Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Anlage sind für die Mitte des Jahres 2000 geplant.

### Seco/Warwick produces heat treat system Grenville Castings

*Grenville Castings Ltd, Perth, Ontario, Canada, has recently ordered a complete solution heat treat system from Seco/Warwick, USA. The system will be designed to solution heat treat and age aluminium castings. The line will be continuous in operation, and will be capable of producing 2300 pounds per hour. The installation and start-up of this system is scheduled for completion in mid-2000.*

## Strahlkabine als "Zweitakter"

Ein neue Injektor-Strahlkabine der Firma USF Schlick, Metelen, verfügt über einen Taktdrehtischautomat mit acht Satelliten und ist

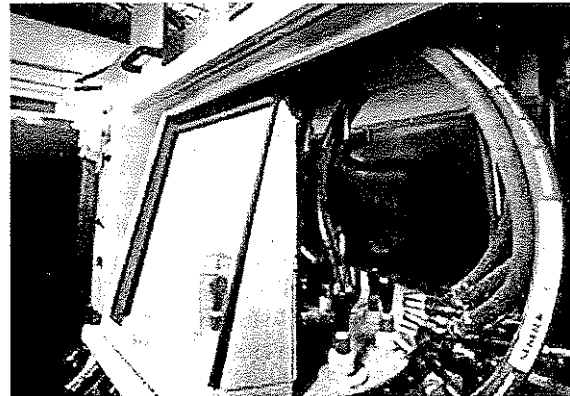
Bild: Neuentwickelte Injektor-Strahlkabine (Foto: USF Schlick, Metelen)

Newly developed injector-type blasting cabin (Photo: USF Schlick, Metelen)

für 2 bis 4 Automaten-Strahlköpfe und zwei Strahlstationen ausgelegt. Dies bietet nach Angaben der Entwicklungsfirma mehrere Vorteile. Ermöglicht wird ein Zweitaktbetrieb, der den Werkstückdurchsatz steigern. Zudem können Werkstücke gemäß ihrer spezifischen Anforderungen von verschiedenen Seiten gestrahlt werden. Eine Vertikaldüsenoszillationsvorrichtung mit variabler Hubeinstellung gewährleistet die optimale Anpassung an unterschiedliche Werkstücke.

### "Two-stroke" blasting cabin

*A new injector-type blasting cabin manufactured by USF Schlick in*



*Metelen has a cyclic turntable automatic machine with eight satellites, designed for between two and four automatic blasting nozzles and two blasting stations. According to information from the developer, this offers several advantages. Two-stroke operation is possible, and this increases workpiece throughput. Besides, workpieces can be blasted from various sides according to their specific needs. A vertical nozzle oscillating mechanism with variable stroke setting ensures optimum adaptation to the shapes and sizes of different workpieces.*

### We purchase and supply:

- Rolling mills cold/hot
- Slitting lines
- Tube welding machines
- Roll grinding machines
- Cut-to-length lines
- Extrusion presses
- Continuous casters
- Coilers
- Joining presses
- Levellers / straighteners
- Coil carriages
- Packing lines for strips
- Drawing machines
- Rollformers

Please ask for our sales list



Postfach 1348 · 57253 Freudenberg  
Tel.: (02734) 2711 90 · Fax: (02734) 2711 95  
<http://www.coiltec.de>  
e-mail: [coiltec@t-online.de](mailto:coiltec@t-online.de)