



**KOMPOZİT ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN HAZIRLANMASI VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ  
PREPARATION AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF  
ALUMINUM COMPOSITE FOAMS**

**Mustafa Güden\*, Semih Elbir\*\* , Selahattin Yılmaz\*\*\***

**\*Makina Mühendisliği Bölümü, \*\* Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı, \*\*\*Kimya  
Mühendisliği Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Urla, İzmir**

**ÖZET**

Preslenmiş tabletlerin ısıtılması yöntemi ile hazırlanan kapalı hücreli SiC-parçacık takviyeli alüminyum kompozit köpüğün köpüklenme ve basma mekanik testi özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu özellikler aynı yöntemle hazırlanan saf alüminyum köpüğün özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, SiC-parçacık takviyeli köpüklerde köpüklenmenin ve plato gerilmesinin daha yüksek olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler :** 1. Alüminyum köpük 2. Hazırlama 3. Mekanik özellikler

**ABSTRACT**

Foaming and compression mechanical properties of SiC-particulate composite closed-cell aluminum foams prepared by heating of powder compacts have been studied. These properties were compared with those of pure aluminum foams prepared by the same route. Results have shown that SiC-particulate addition increased foaming and plateau stress.

**Key Words :** 1. Aluminum foam 2. Preparation 3. Mechanical behavior

**1. GİRİŞ**

Kapalı hücreli alüminyum köpük (KHAK) metallere son yıllarda oldukça ilgi çeken bir malzeme grubudur. Önemli özellikleri arasında yüksek mukavemet-ağırlık oranları, düşük yüklerde yüksek miktarda enerji emme kapasiteleri ve iyi ısı ve ses yalıtımı bulunmaktadır [1, 2]. Otomobiller [3], zırhlı araçlar [4] (darbe enerjisini emen elemanlar), sandviç yapılar ve tüpler [5] (hafif dolgu malzemeleri) potansiyel uygulama alanlarının bir kaç örneğidir.

KHAK metal üretim metotları 1950'lerde geliştirilmesine rağmen günümüze kadar ticari üretimleri yüksek üretim maliyetlerden ve sınırlı sayıdaki uygulama alanlarından dolayı gerçekleşmemiştir. Son yıllarda geliştirilen sıvı metale gaz üfleme ve köpükleştirici madde kullanımına dayanan ekonomik ve etkin üretim metotları bu malzemelere ilgiyi yeniden canlandırmıştır. Günümüzde KHAK metal üretimi genellikle ticari isimleriyle anılan üç farklı metotla yapılmaktadır: 1) sıvı metale gaz üfleme (Cymat) [6] 2) sıvı metale köpükleştirici madde ilavesi (Alporas) [7] ve 3) preslenmiş tabletlerden köpükleştirme (Fraunhofer metodu veya Alulight) [8]. En ucuz köpük Cymat tarafından üretilmektedir. Ancak Cymat ve Alporas köpükleri uygulama öncesi ikincil işlemleri (örneğin kesme ve şekillendirme) gerektirmektedir. Fraunhofer Resource Center tarafından geliştirilen preslenmiş metal tabletlerden köpük üretiminde ise malzemeler nihai şekilde üretilmekte ve ayrıca dış yüzeyde koruyucu bir metal tabakası oluşturulmaktadır [8].

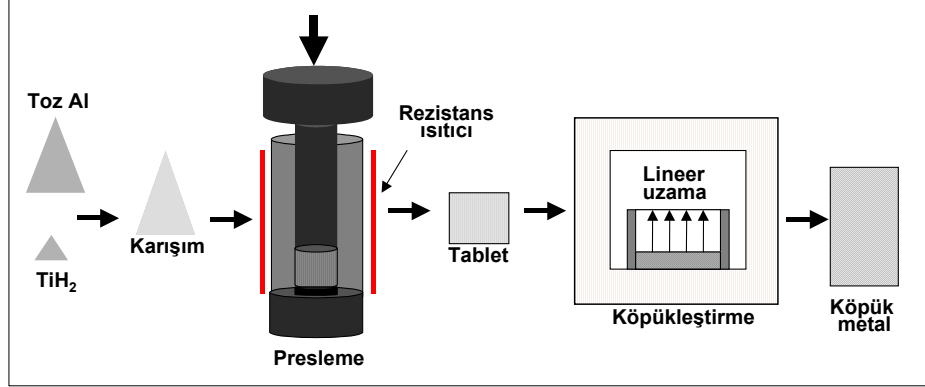
Cymat metodunda köpüklenme öncesinde sıvı metalin içine SiC veya benzeri seramik parçacıklar viskozite ayarlanması için eklenmektedir [6]. Dolayısıyla bu metotla üretilen köpükler metal matris kompozittir. Fraunhofer metoduyla bildiğimiz kadarıyla henüz metal matris kompozit yapılar çalışılmamıştır ve bu yapıların köpüklenme ve mekanik özellikleri bilinmemektedir. Bu çalışmanın amacı SiC-parçacık takviyeli kompozit köpük malzemelerin Fraunhofer metodu ile hazırlanmasını araştırmak ve parçacıkların mekanik özelliklere etkisini belirlemektir. Bu amaçla benzer hazırlama parametreleri kullanılarak kompozit ve saf alüminyum köpükler hazırlanmış, köpüklenme ve mekanik özellikler karşılaştırılmıştır.

## 2. METOT

Şekil 1 köpük hazırlamada kullanılan metodun aşamalarını göstermektedir. İlk olarak, toz alüminyum (-74 mikron), TiH<sub>2</sub> (%0.5 ağırlık, köpükleştirici katkı malzemesi ) ve SiC parçacıkları (-37 mikron) karıştırılmaktadır. Daha sonra, karışım yüksek sıcaklıkta çelik bir kalıp içerisinde preslenmektedir. Sıcak presleme sıcaklığı ve basıncı 420 °C ve 220 MPa seçilmiştir. Bu sıcaklık ve basınç alüminyum tabletlerin köpüklenmesi için optimum değerlerdir [9]. Son olarak, ısıtılmış kübik bir fırında tabletler erime sıcaklığının üstüne ısıtılmaktadır. Isıtma esnasında TiH<sub>2</sub> bozunarak hidrojen gazı salmakta ve sıvı metalde köpük yapısı oluşturmaktadır. Fırın sıcaklıkları 750 ve 850 °C seçilmiştir. Bu sıcaklıklar Al metalinin erime sıcaklığının (673 °C) üstündedir. Tek yönde (lineer) köpüklenme sağlamak için tabletler çelik bir kalıp içerisinde fırına konulmuştur. Çelik kalıbın iç çapı tabletlerin çapıyla (27 mm) aynıdır ve kalıp alttan kapatılmıştır (Şekil 1). Çeşitli fırında bekleme sürelerinden sonra köpükler çelik kalıpla birlikte fırından alınarak havada ve/veya çelik kalıbın yüzeyine su dökülerek soğutulmuş ve uzunlukları ölçülmüştür. Lineer uzama ise şu formülle hesaplanmıştır:

$$\text{Lineer uzama}(LU) = \frac{h_s - h_i}{h_i}$$

Bu formülde,  $h_s$  köpüğün ve  $h_i$  ise köpükleşme öncesi tabletin uzunluklarıdır. Bu metotla hazırlanan köpüklerden işlenen silindir şeklinde numunelere (20 mm uzunluk, 20 mm çap) statik basma testleri ( $0.2 \text{ mm s}^{-1}$ ) yapılmıştır.

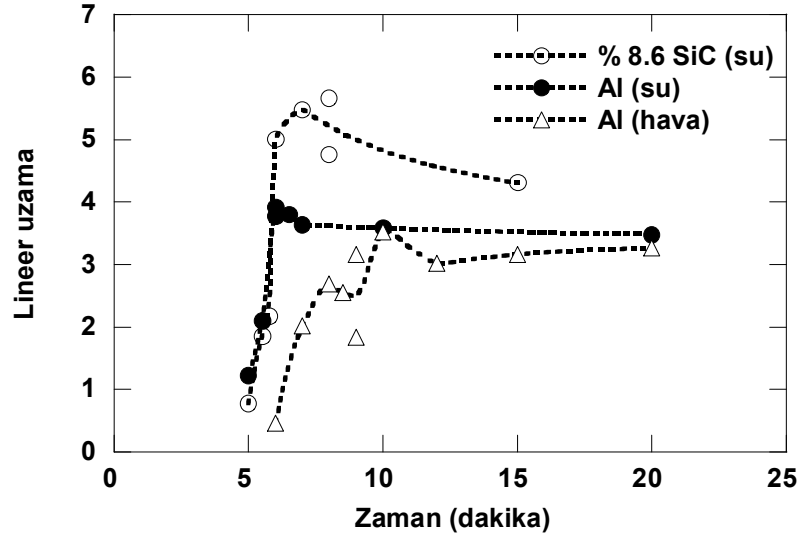


Şekil 1. Köpük hazırlama metodunun şematik gösterimi.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekil 2 hazırlanan %99 yoğun %8.6 SiC hacim yüzdeli kompozit tabletin mikroyapısıdır. Yapılan ilk çalışmalar, köpükleşmenin ancak %99'a yakın yoğunluktaki tabletlerde etkin bir şekilde oluştuğunu göstermiştir. Aynı presleme parametrelerini kullanarak granule alüminyumdan (-1680,+250 micron) hazırlanan tabletlerde etkin köpükleşme sağlanamamıştır. Bu numunelerde TiH<sub>2</sub> bozunmasıyla ortaya çıkan hidrojen gazının erime öncesi tabletlerden kaçtığı varsayılmaktadır. Granule Al ile hazırlanan tabletlerin mikro yapıları incelenmektedir.

Şekil 2. Hazırlanan kompozit tabletin mikro-yapısı (koyu parçacıklar SiC).

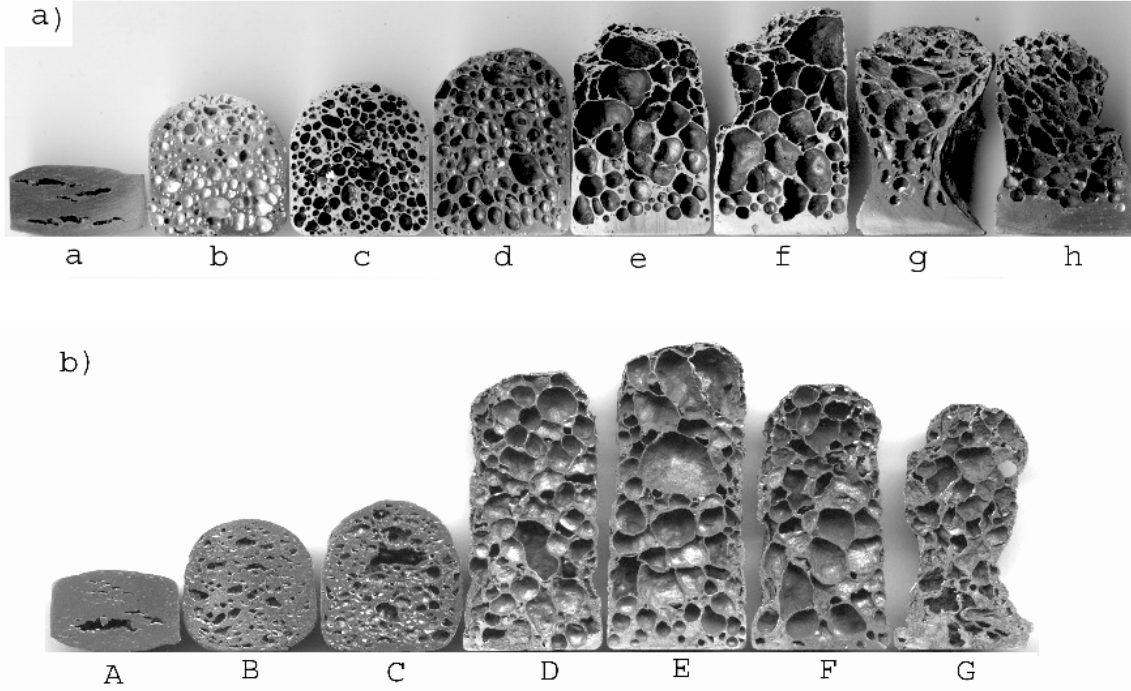


Şekil 3. Lineer uzamaya karşılık fırında kalma zamanı (750 °C).

Şekil 3'de 750 °C'de hazırlanan, havada ve suda soğutulan alüminyum ve SiC kompozit köpüklerin lineer uzamalarının fırında kalma süresiyle değişimi gösterilmiştir. Köpükleşme ancak 5 dakikadan sonra başlamaktadır. Bu süre içinde tabletin sıcaklığı, alüminyumun erime sıcaklığının üstüne çıktığı varsayılmaktadır.  $TiH_2$  tozunun bozunması 380 °C' de başlayarak 570 °C'e kadar devam ettiği diğer çalışmalarda bulunmuştur [8, 9]. 500 °C'nin üstünde sıcak preslenmiş tabletlerde, hidrojenin presleme esnasında kaçmasından dolayı köpükleşmenin olmadığı belirlenmiştir [9]. Köpükleşme başladıktan bir iki dakika sonra lineer uzama maksimum bir değere çıkmakta ve daha sonra çok az azalarak sabit kalmaktadır. Maksimum lineer uzama, tabletlerde zayıf bağlanmış hidrojen gazının köpükleşmenin ilk aşamalarında hızla erimiş metali şişirmesi ve daha sonra ise bazı hücreleri patlatarak kaçması sonucunda oluştuğu varsayılmaktadır [9]. 850 °C'de yapılan köpükleşme çalışmalarında da benzer sonuçlar bulunmuştur. Bu sıcaklıkta köpükleşme ancak 2 dakikadan sonra başlamaktadır. Benzer özellikler suda soğutulan %8.6 SiC parçacıklı köpüklerde de gözlenmiştir, ancak lineer uzama bu köpüklerde nispi olarak daha fazladır. Çeşitli zamanlarda fırından alınan hava ile soğutulan alüminyum ve su ile soğutulan kompozit köpük (%8.6) yapılar Şekil 4'de gösterilmiştir. Havada soğutulan Al köpük malzemelerin üst kısımlarında oluşan çökmeler bu şekilde görülmektedir. Havada soğutulan saf Al köpüklerde, katılaşma öncesindeki çökmeler sonucunda lineer uzama azalmaktadır.

SiC kompozit ve saf alüminyum köpükler arasındaki önemli farklardan birisi silindirik şeklindeki köpüğün tabanında biriken metal kalınlığının kompozit yapıda oldukça azalmasıdır. Tabanda metal birikmesi, köpükleşme esnasında hücre duvarlarından sıvı metalin yerçekimi kuvveti etkisiyle aşağıya doğru akmasının sonucudur. Sıvı köpüklerde hücreleri kararlı hale getirmek için iki yöntem kullanılmaktadır: gaz-sıvı metal arasındaki yüzey enerjisinin azaltacak surfaktanlar kullanmak ve sıvı viskozitesini artırmak. SiC parçacıklarının gaz-sıvı ara yüzeyindeki yüzey gerilmesini azaltarak sıvı

metal köpüğü kararlı yaptığı öngörülmüştür [10]. Ayrıca hücre duvarlarındaki SiC parçacıklarının sıvı metal viskozitesini artırdığı da önerilmektedir [10]. SiC parçacıklarının hazırlanan kompozit köpüklerin hücre duvarlarındaki dağılımı ve hücre mikroyapısına etkisi sonraki bir çalışmada detaylı incelenecektir.

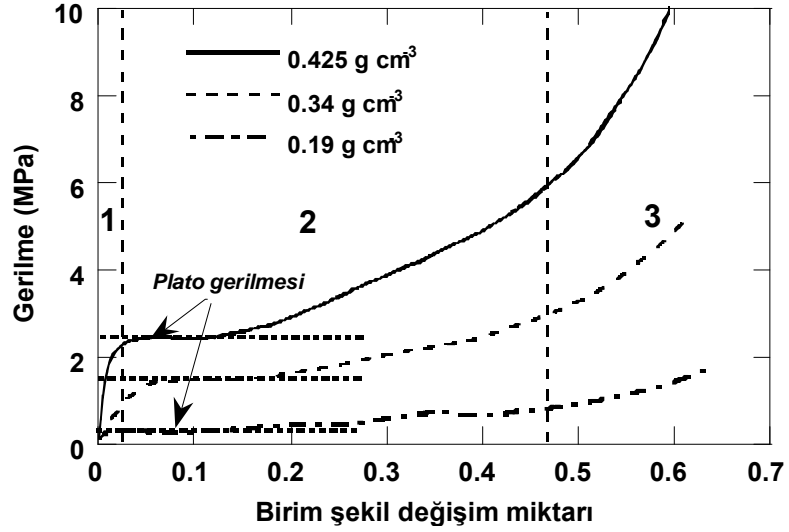


Şekil 4. Çeşitli zamanlarda fırından alınan köpüklerin yapısı a) alüminyum köpük (a=6, b=6,45, c=7, d=8, e=9, f=10, g=15, h=20 dakika) b) kompozit köpük (A=5, B=5,30, C=5,45, D=6, E=7, F=8, G=15 dakika).

Şekil 5'de kompozit köpük numunesi ve bu numuneden işlenen basma testi numunesi gösterilmektedir. Şekil 6'da ise saf alüminyum köpüğün değişik yoğunluklardaki basma gerilme-birim şekil değişim grafikleri verilmiştir. Basma gerilme-birim şekil değişim grafikleri üç bölümde incelenebilir (Şekil 6 da 1, 2 ve 3 numaralı bölgeler): (1) lineer elastik, (2) çökme ve (3) yoğunlaşma bölgeleri. Lineer elastik bölgede, gerilme birim şekil değişim miktarı ile artmaktadır. Lineer elastik bölge, deformasyonun, lokal bir bölgede yoğunlaşması sonucunda sona ermekte ve çökme bölgesi başlamaktadır. Yoğunlaşma bir bölgedeki hücre duvarlarının çökmesi ile oluşmaktadır [11]. Lokal yoğunlaşma, tüm numuneye Luders bantlarına benzer şekilde yayılmaktadır. Bu yayılım esnasında gerilme, sabit bir gerilmenin (Plato Gerilmesi) etrafında artmakta veya azalmaktadır. Tüm köpük yoğunlaştıktan sonra gerilme yoğun Al metalinin gerilmesine erişmektedir (yoğunlaşma bölgesi).

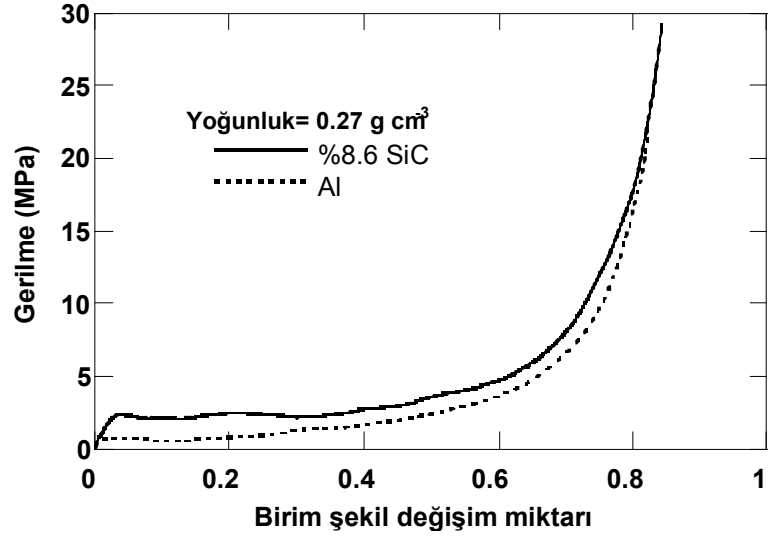


Şekil 5. Hazırlanan köpük numunesi (sağ) ve bu numuneden işlenen basma testinde kullanılan 20 mm çapındaki silindirik test numunesi (sol).

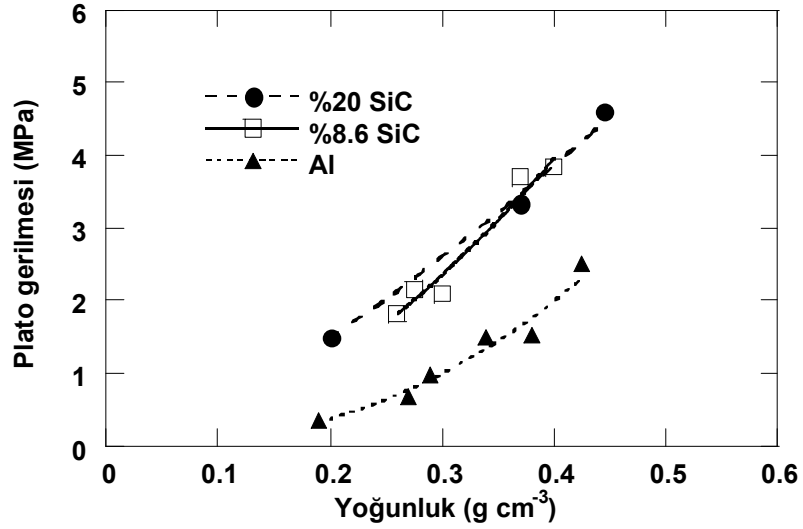


Şekil 6. Değişik yoğunluktaki saf alüminyum köpüğün basma davranışı.

SiC parçacıklarının gerilmeye olan etkisi ise Şekil 7'de  $0.27 \text{ g cm}^{-3}$  yoğunlukta gösterilmiştir. Kompozit köpük aynı yoğunluktaki Al köpükten daha yüksek plato gerilmesine ve basma gerilmesine sahiptir. Plato gerilmesi köpük malzeme ile korunacak bir yapıya uygulanması gereken dış kuvveti belirlemektedir. Plato gerilmesinin üstüne veya altına tekabül eden dış kuvvetlerde enerji emme verimliliği azalmaktadır. Plato gerilmesi yoğunlukla ve dolayısıyla ağırlıkla birlikte artmaktadır. Hazırlanan kompozit köpük yapısı ise ağırlığı artırmadan, plato gerilmesini artırmaktadır (Şekil 8).



Şekil 7. Aynı yoğunluktaki kompozit ve saf alüminyum köpüğün basma davranışları.



Şekil 8. Plato gerilmesine karşılık köpük yoğunluğu.

Plato gerilmesi köpük malzemesinin akma gerilmesi ve köpüğün yoğunluğu ile değişmektedir. Bu çalışmada ölçülen plato gerilmeleri AKHK metaller için geliştirilen denkleme uydurulmaya çalışılacaktır [12];

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_y} = C \left( \frac{\rho^*}{\rho} \right)^{3/2}$$

burada  $\sigma_p$  ve  $\sigma_y$  plato gerilmesi ve köpüğün yapıldığı alüminyum metalinin akma gerilmesi, C bir sabit ve  $\rho^*$  ve  $\rho$  ise köpük ve alüminyumun yoğunluklarıdır. Köpük malzemesinin akma gerilmesi mikro sertlik cihazıyla ölçülecek ve plato gerilmeleri yukarıdaki denkleme uydurulacaktır.

#### 4. SONUÇ

Kapalı hücreli alüminyum SiC kompozit köpükler, preslenmiş tabletlerin erime sıcaklığının üstüne ısıtılmasıyla hazırlanmıştır. Benzer parametrelerle hazırlanan kompozit ve saf alüminyum tabletlerin köpükleşme özellikleri karşılaştırılmıştır. SiC parçacıklarının köpükleştirmeyi artırarak, köpükleşme esnasında sıvı metalin tabana akmasını azalttığı gözlenmiştir. Su ile soğutulan köpüklerde köpükleşme, havayla soğutulanlardan daha fazladır. Bu sıvı kopuk yapısının korunabilmesi için, köpüğün hızlı bir şekilde katılaştırmasının önemini göstermektedir. Yapılan basma testleri sonucunda, SiC parçacıklarının benzer yoğunluktaki alüminyum köpük metalinin plato gerilmesini artırdığı bulunmuştur.

#### KAYNAKÇA

- [1] A. G. Evans, J. W. Hutchinson, M. F. Ashby, 'Multifunctionality of cellular metal systems', Prog. Mater. Sci., 43(1999) 171-121.
- [2] A. G. Evans, J. W. Hutchinson, N. A. Fleck, M. F. Ashby, H. N. G. Wadley 'The topological design of multifunctional cellular metals', Prog. Mater. Sci., 46(2001) 309-327.
- [3] A. Fuganti, L. Lorenzi, A. G. Hanssen and M. Langseth, 'Aluminum foam for automobile applications', Advan. Eng. Mater., 2(2000)200-204.
- [4] ARO Research Project, 'Feasibility study on deformation energy absorption of metal foams at high strain rates', Fraunhofer USA Resource Center Delaware, 1998.
- [5] W. Chen, T. Wierzbicki, 'Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin walled structures in energy absorption', Thin-Walled Structures, 39(2001) 287-306.
- [6] J. T. Wood, 'Production and applications of continuously cast, foamed aluminum', Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, J. Banhart and H. Eifert Edn. Stanton, Delaware, 7-8 Oct. 1997.
- [7] T. Miyoshi, M. Itah, S. Akiyama, A. Kitahara, 'Alporas aluminum foam: production process, properties and applications', Advanc. Eng. Mater., 2(2000) 179-183.
- [8] F. Baumgartner, I. Duarte, J. Banhart, 'Industrialization of powder compact foaming process', Advanc. Eng. Mater., 2(2000) 168-174.
- [9] I. Duarte, J. Banhart, 'A study of aluminum foam formation kinetics and microstructure', Acta Mater., 48(2000) 2349-2362.



- [10]** A. E. Simone, L. J. Gibson, 'Aluminum foams produced by liquid-state processes', *Acta Mater.*, 26(1998) 3109-3123.
- [11]** M. Güden, I. W. Hall 'Quasi-static and Dynamic behavior of a Al closed cell foam', TMS Meeting, 1998.
- [12]** L. J. Gibson and M. F. Ashby, 'Cellular Solids-structures and properties', Cambridge University Press, 1997.