

---

---

## **ALÜMİNYUM KAPALI HÜCRELİ KÖPÜKLERİN TOZ METALÜRJİSİ YÖNETİMİ İLE ÜRETİLMESİ**

### **POWDER METALLURGY PROCESSING OF ALUMINUM CLOSED-CELL FOAMS**

**Mustafa GÜDEN, Halit KAVI, Kaan TOKSOY**

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümü

#### **ÖZET**

Son şekle yakın Alüminyum kapalı hücreli yapılar, örneğin otomobil tampon ve kapıları, tabletlerin köpükleştirilmesi metodu olarak bilinen toz metalürjisi yöntemi ile hazırlanmaktadır. Metot tozların karıştırılması, sıcak preslenmesi ve elde edilen toz tabletlerin kullanılan alaşımın ergime sıcaklığının üstüne ısıtılması suretiyle köpükleştirilmesi süreçlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada, toz metalürjisi metodu ile kapalı hücreli alüminyum köpük metal üretim parametreleri ve üretim sonucu ortaya çıkan mikroyapılar, köpüğün yoğunluğuna bağlı mekanik özellikleri ile birlikte özetlenmektedir. Son olarak, alüminyum köpük metalin yuvarlak tüplerde dolgu malzemesi olarak kullanımına yönelik deneysel çalışmaların sonuçları otomobil ezilme kutularında kullanımına yönelik örnek olarak verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum köpük, üretim, mekanik özellikler, dolgu malzemesi

#### **ABSTRACT**

Closed cell aluminum foams are currently processed by powder metallurgical method, known as foaming from powder compacts, in order for obtaining near net-shape foam products such as automobile bumpers and side doors and etc. The process involve mixing and hot compaction of the powders and foaming the compacts above the melting temperature of the aluminum alloy used. This paper summarizes the processing parameters of the method and microstructure of the foams produced in connection with the mechanical response as function of the foam density. Finally, the results of experimental study on the use of aluminum foams as filler in circular tubes were given as an example for the application of aluminum foams in crash boxes.

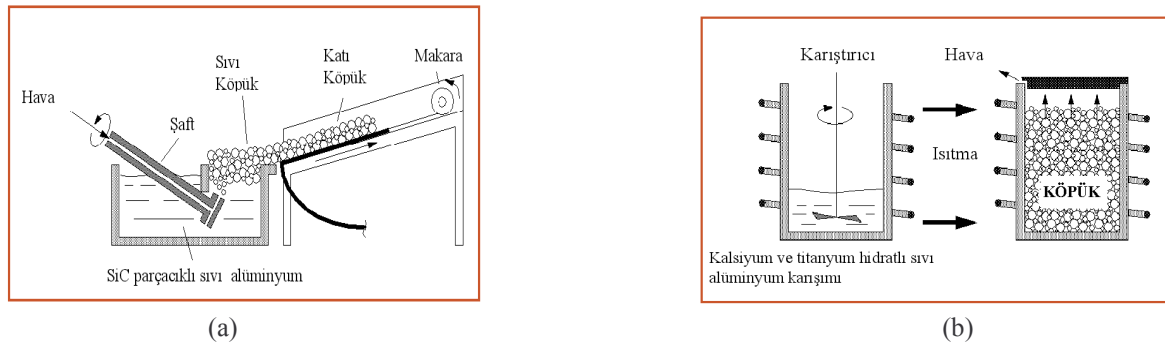
**Keywords:** Aluminum foam, processing, mechanical properties, filling material

### **1. GİRİŞ**

Hafifliğin ve mukavemetin önemli tasarım kriterleri olduğu otomobil, uçak, tren, asansör ve benzeri hareketli taşıt ve araçlarda potansiyel uygulama alanları bulunan kapalı hücreli Alüminyum (Al) köpüklere ilgi son yıllarda artmıştır. Yüksek birim şekil değişim miktarlarına kadar kırılmadan deforme olmaları ve yüksek miktarda enerji emme kapasitelerinden dolayı taşıtlarda çarpışma darbe enerjisini emebilen dolgu malzemeleri olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kapalı hücreli alüminyum köpüklerin ticari üretimi 3 farklı metot ile yapılmaktadır; ergimiş metale gaz enjektisi, ergimiş metale köpük yapıcı madde ilavesi ve toz metalürjisi ile hazırlanmış preslenmiş tabletlerin köpükleştirilmesidir. Ergimiş metale gaz enjektisi ile köpük metal üretim metodu Alcan N. Hydro (Norveç) ve Cymat Alüminyum Corporation (Kanada) tarafından halen kullanılmaktadır

(Jin, 1990). Köpükleşme öncesi sıvı metalin viskozitesini ayarlamak amacıyla SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve MgO benzeri seramik tozlar eklenmektedir. Dönen bir enjeksiyon şaftı yardımıyla gaz (hava veya azot) sıvı metal içerisinde homojen dağıtılmaktadır. Gaz baloncukları seramik tozlarla kararlı hale gelerek yüzeye çıkmakta ve oluşan sıvı köpük bir bant üzerinde taşınarak (Şekil 1(a)) ergime sıcaklığının altına soğutulmaktadır. İkinci metotta ise köpük yapıcı maddenin (örneğin TiH<sub>2</sub>) sıvı metale eklenmesi ile köpükleşme sağlanmaktadır. Bu metot Alporos firması (Japon) tarafından alüminyum köpük metal üretiminde kullanılmaktadır (Miyoshi, 2000). Köpükleştirme öncesinde Kalsiyum ilavesi ile viskozitesi istenen seviyeye getirilen ergimiş metale daha sonra TiH<sub>2</sub> (% 1.6) ilave edilmektedir. TiH<sub>2</sub> sıvı metal içerisinde bozunarak hidrojen gazı açığa çıkarmaktadır. Bunun sonucu sıvı metal sabit basınçta genişlemekte ve kalıbı sıvı köpük ile doldurmaktadır (Şekil 1(b)). Sıvı köpük, son olarak köpükleştirilen alaşımın erime sıcaklığının altına hızlıca soğutulmaktadır. Bahsedilen her iki metot sonucunda üretilen köpük metallere ikincil işlemlerle son şeklin verilmesi gerekmektedir. Fraunhofer Resource Center tarafından patentlenen preslenmiş tabletlerin köpükleştirilmesi metodunda ise köpük yapılar en son şekline yakın üretilmektedir (Baumeister, 1992).

Bu çalışmada, yazarların laboratuvarında tabletlerin köpükleştirilmesi metodu ile hazırlanan Al ve Al-SiC partikül takviyeli kompozit köpüklerin üretim özellikleri özetlenerek, mekanik özellikler daha önce test edilmiş 6061 Al alaşım (Güden, 2000) köpüğün mekanik özellikleri ile karşılaştırmak sureti ile irdelenmiştir. Kullanım alanlarına örnek olarak ezilme kutusunda tasarlanan tüplerde dolgu malzemesi olarak kullanımına yönelik testlerin sonuçlardan kısaca bahsedilmiştir.



Şekil 1 (a) Ergimiş metale gaz enjektörü ile alüminyum köpük metal üretimi (Alcan) (Jin, 1990) ve (b) ergimiş metale köpük yapıcı madde ilavesi alüminyum köpük metal üretimi (Alporos) (Miyoshi, 2000).

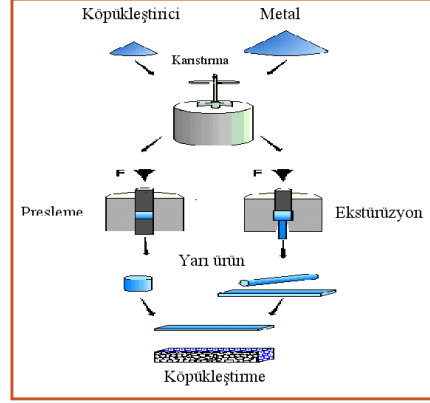
## 2. PRESLENMİŞ TABLETLERİN KÖPÜKLEŞTİRİLMESİ

Preslenmiş tabletlerin köpükleştirilmesi metodunda, toz metal ve köpük yapıcı madde karıştırıldıktan sonra sıcak presleme, ekstürzyon veya haddeleme benzeri metal şekillendirme yöntemleri ile köpükleşecek yoğun yapıya sahip yarı ürün haline getirilmektedir (Şekil 2). Köpükleşecek yarı ürün, daha sonra metalin erime sıcaklığının üstüne ısıtılmaktadır. Isıtma esnasında köpük yapıcı madde bozunmakta ve açığa çıkan gaz, erimiş metali genişleterek gözenekli bir yapı oluşturmaktadır.

Metal hidrürlerin yanında, örneğin titanyum hidrür, karbonatlar (kalsiyum karbonat, potasyum karbonat, sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat), hidratlar (alüminyum sülfat hidrat ve alüminyum hidroksit) ve buharlaşan maddeler (civa bileşikleri ve pulverize organikler) köpükleştirici madde olarak kullanılabilirler. Etkin bir köpükleşme için, gazın kaçmasına engel olabilecek yoğunluğa sahip bir yarı ürünün hazırlanması çok önemlidir; köpükleştirici maddenin metal içinde tamamen hapsedilmesi gerekmektedir. Bu yüzden sıcak şekillendirmede kullanılan sıcaklık ve basınç, toz metal parçacıklarını birbirine bağlayacak ve köpük yapıcı maddenin bozunumu ile oluşan hidrojen gazı kaçışını önleyecek şekilde ayarlanmalıdır. Haddeleme yöntemi ile yapılan sıkıştırılarda 350 ile 450 °C arası sıcaklıklar parçacıklar arasında özellikle yüzey tabakalarında difüzyonu sağlamak için yeterlidir (Baumberger, 2000).

Alüminyum tabletleri köpükleştirmek için gerekli köpük yapıcı madde miktarı oldukça azdır. Hesaplamalar, ağırlıkça % 0.6 TiH<sub>2</sub> içeren köpükleşecek alüminyum tabletin hacimsel genişlemesinin %17 olabileceğini göstermiştir. Bu değer deneysel çalışmalardan elde edilen genişlemeden yaklaşık 4 kat daha büyüktür (Baumberger, 2000). Açığa çıkan hidrojen gazının ancak % 25' i köpükleşme için kullanılmakta ve kalan kısmı ise köpükleştirme esnasında kaçmaktadır. Yarı ürünün köpükleşmesi için gereken zaman, uygulanan sıcaklığa

ve yarı ürünün büyüklüğüne bağlı olup, birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişmektedir. Bu metot sadece Al ve Al alaşımlarının köpükleştirilmesi ile sınırlı olmayıp, kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal ve alaşımlar da uygun köpük yapıcı madde ve proses parametrelerinin seçilmesi suretiyle köpükleştirilebilir.



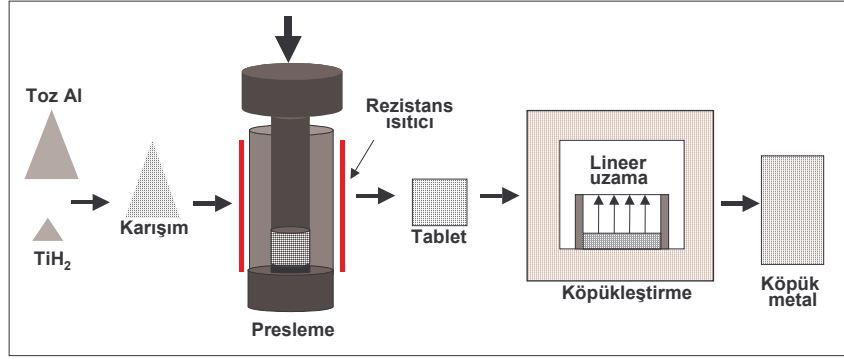
Şekil 2 Preslenmiş tabletlerin köpükleştirilmesi metodu (Baumeister, 1992).

Köpükleşecek yarı ürün bir kalıp içinde köpükleştirilmediğinde şekilsiz bir metal köpük parçası oluşur. Kalıp içerisinde ise yarı ürün köpükleşerek kalıbın şeklini almaktadır. Bu metot ile dış yüzeyi yoğun metal tabakası ile kapalı ve ancak içerisinde oldukça gözenekli son kullanım şekline yakın yapılar üretilmektedir. Plaka yüzeylerine metal köpüğün yapıştırılması ile sandviç paneller hazırlanabilir. Başka bir yöntem ise Al veya çelik plakalar arasına köpükleşecek yarı ürünün sıkıştırılması (clading) ve daha sonra yarı ürünün köpükleştirilmesidir. Bahsedilen yöntem ile, alüminyum köpük yapılar çelik, titanyum ve alüminyum plakalarıyla birleştirilebilir. Alüminyum plakalar kullanıldığında, plakanın ergime sıcaklığının köpükleştirme sıcaklığından daha yüksek olması gerekmektedir. Ayrıca, presleme aşamasında köpükleştirici maddenin miktarını bölgesel değiştirerek yoğunluğu farklı köpük bölgeleri aynı yapı içerisinde oluşturulabilir. Bu tür uygulamalar dış yüzeyinde yoğun bir metal tabakasını gerektiren yapıların (otomobil kapıları ve tamponları) üretilmesine olanak sağlar.

Preslenmiş tabletlerden köpükleştirme metodu,  $TiH_2$ 'nin sıvı Al metaline toz metalürjisi yöntemi yerine direkt eklenmesi şeklinde geliştirilmiştir. Erken hidrojen gazı çıkışını engellemek için  $TiH_2$ 'lü sıvı Al metalinin hızlıca soğutulması veya  $TiH_2$  parçacıklarının pasifleştirilmesi gerekmektedir. İlk metot Foamcast metodu olarak bilinir ve köpükleştirici madde ve sıvı Al döküm kalıbına aynı anda dökülerek hızlıca soğutulur (Banhart, 2000). Elde edilen döküm ısıtılarak köpükleştirilebilir. İkinci metotta ise  $TiH_2$  parçacıklarının yüzeyinde oksit tabakası oluşturularak bozunması geciktirilmektedir (Gergely, 2000)

## 2. MATERYAL VE METOT

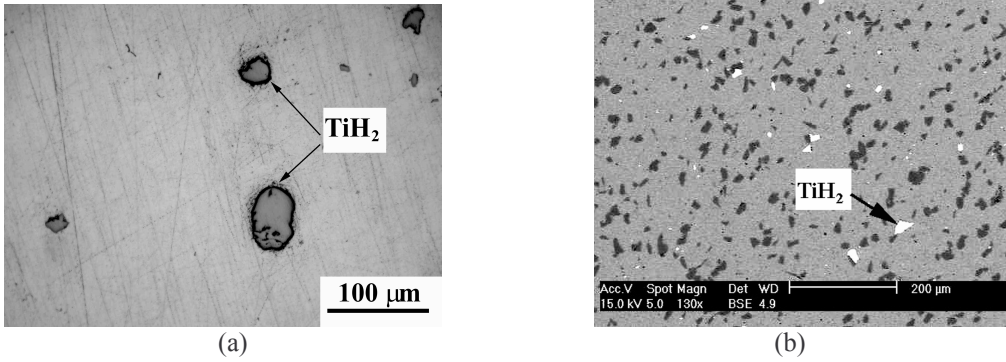
Şekil 3 köpük hazırlamada kullanılan metodun aşamalarını göstermektedir. İlk olarak, toz alüminyum (-74 mikron),  $TiH_2$  (%0.5 ağırlık, köpükleştirici katkı malzemesi) ve/veya SiC parçacıkları (-37 mikron) karıştırılmaktadır. Daha sonra, karışım yüksek sıcaklıkta çelik bir kalıp içerisinde preslenmektedir. Sıcak presleme sıcaklığı ve basıncı 420 °C ve 220 MPa seçilmiştir. Tek yönde (liner) köpükleşme sağlamak için tabletler çelik bir kalıp içerisinde fırına konulmuştur. Çelik kalıbın iç çapı tabletlerin çapıyla (27 mm) aynıdır ve kalıp alttan kapatılmıştır (Şekil 3). Çeşitli fırında bekleme sürelerinden sonra köpükler çelik kalıpla birlikte fırından alınarak havada ve/veya çelik kalıbın yüzeyine su dökülerek soğutulularak farklı yoğunlukta köpük metaller hazırlanmıştır. Hazırlanan Al ve Al-SiC köpüklerden işlenen silindir şeklinde numunelere (20 mm uzunluk, 20 mm çap) statik basma testleri (0,2 mm d<sup>-1</sup>) yapılmıştır. Kullanılan köpük hazırlama metodu ve köpük testleri hakkında detaylı bilgi kaynak (Elbir, 2003)'de verilmiştir.



Şekil 3 Köpük metal hazırlama aşamaları.

### 3. MİKRO VE MAKRO-YAPI

Şekil 4 (a) ve (b) hazırlanan Al ve Al-%8 SiC tabletlerin köpükleştirme öncesi mikroyapılarını göstermektedir. Hazırlanan tabletlerin nispi yoğunluğu %99'da yakındır. Köpükleştirme deneyleri %98 nispi yoğunluktaki tabletlerde gaz kaçışının önlendiğini göstermiştir.



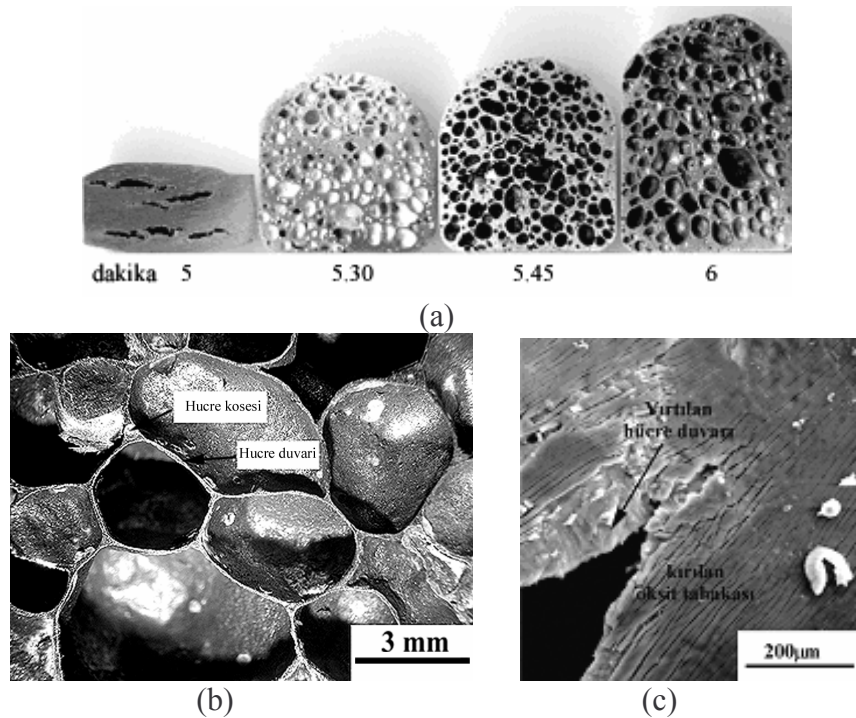
Şekil 4 Hazırlanan tabletlerin mikro-yapısı (a) Al ve (b) Al-%8SiC parçacık tabletleri.

Şekil 5(a) Al tabletlerde oluşan değişik zamanlardaki köpük yapısını göstermektedir. Köpüklenme yaklaşık bir dakika içinde oluşmakta olup zamanla hücreler büyümekte ve yoğunluk azalmaktadır. Metal köpükte her bir gaz kabarcığının oluşturduğu hacime hücre denmektedir (Şekil 5 (b)). Hücre, hücre duvarları ve hücre köşelerinden oluşur; hücre duvarı iki gaz kabarcığının oluşturduğu sınır, hücre köşesi ise üç gaz kabarcığının kesiştiği yerdir. Genellikle hücre köşesi hücre duvarından daha kalındır (Şekil 5(b)). Bu mekanik özellikleri etkileyen önemli bir parametredir. Üretim aşamasında yüksek sıcaklıklara maruz kalmaları sonucunda hücrelerin yüzeylerinde bir oksit tabakası oluşmaktadır. Oksit tabakası deformasyon esnasında kırılmasına karşın, hücre duvarlarına bağlı kalmaktadır (Elbir, 1999) (Şekil 5(c)). Al köpük metallere hücre duvarlarının alüminyum oksit tabakası ile kaplı olması bu metallere yanmama (ateşe dayanıklılık) özelliği sağlamaktadır .

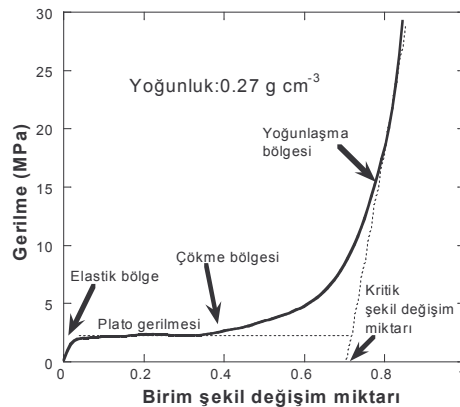
### 4. MEKANİK ÖZELLİKLER

Kapalı hücreli Al köpükler basma altında karakteristik gerilme-birim şekil değişim miktarı grafiği gösterirler. Basma grafiği, Şekil 6'da Al-SiC köpüğü için gösterildiği gibi üç farklı bölgeden oluşmaktadır: lineer elastik, çökme ve yoğunlaşma. Lineer elastik bölgede, deformasyon hücre duvarlarının bükülmesi veya genişlemesiyle kontrol edilmektedir. Çökme bölgesinde köpük hücreleri birkaç mekanizma ile (bükülme, gevrek kırılma veya deformasyonun yoğunlaşması) deforme olmaktadır. Şekil 7(a) ve (b)'de hazırlanan Al köpüklerdeki çökme bölgesinde oluşan hücre duvarı bükülmesi ve kırılması gösterilmektedir. Bu bölgede deformasyon bir alandaki hücrelerin çökmesiyle oluşan lokal deformasyonun, çökmeyen bölgelere doğru ilerlemesi ile devam etmektedir. Deformasyonun belirli bir bölgede yoğunlaşması ve deforme olmayan bölgelere doğru ilerlemesi sebebiyle bu bölgedeki gerilmelerde düşme ve yükselmeler gözlenmektedir. Çökme bölgesi, sabit veya birim şekil değişim miktarı ile artan bir plato gerilmesinde gerçekleşmektedir (Şekil 6). Kritik bir birim şekil değişim miktarından

( $\epsilon_d$ ) sonra hücre duvarlarının tamamen çökmesi ile yoğunlaşma bölgesi başlamaktadır (Şekil 6). Bu bölgede gerilme artarak yoğun Al metalinin gerilmesine ulaşmaktadır. Al köpüklerin basma altındaki davranışları yoğunluğa, hücre geometrisine ve yapıldıkları metalin akma gerilmesine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 8 (a) ve (b)'de hazırlanan Al ve Al-SiC köpüklerin farklı yoğunluklardaki gerilme-birim şekil değişim davranışları gösterilmektedir. Özellikleri bilinen bir alaşım metal köpüğünün aynı yoğunluktaki numunelerinin mekanik özelliklerinde farklılıklar da gözlenmektedir. Bunun sebebi ağırlık dağılımı, heterojen mikroyapı gibi aynı yoğunluktaki malzemelerde değişkenlik gösteren gizli parametrelerdir. Dolayısı ile gerçek mekanik özellikleri belirlemek için gizli parametrelerin etkisini ortaya çıkaracak sayıda numunenin test edilmesi gerekmektedir (Banhart, 2001)

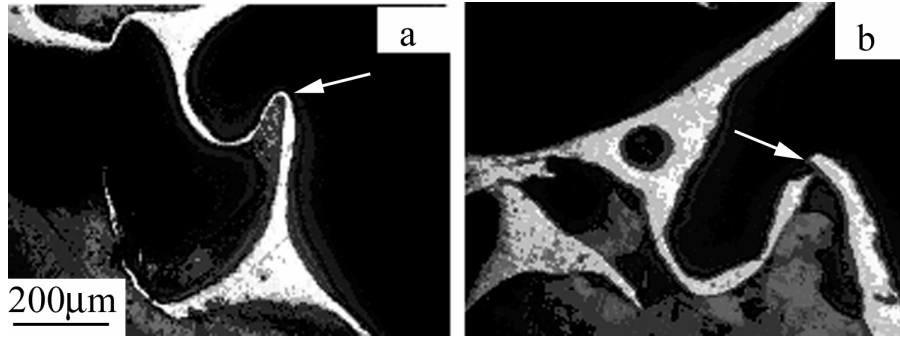


Şekil 5 (a) Deşik zamanlarda oluşan Al köpük yapısı, (b) hazırlanan Al köpük hücre yapısı, (b) Al metal köpükte hücre yapısı ve (c) basma testi sonucu yırtılan hücre duvarı ve duvar üzerinde kırılan oksit tabakası.

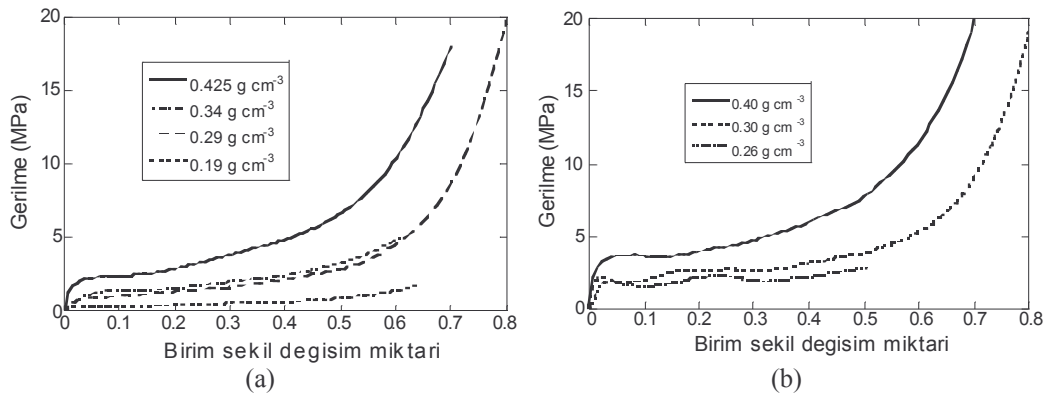


Şekil 6 Köpük metal gerilme birim şekil değişim miktarı grafiği





Şekil 7 Al köpükte oluşan (a) hücre duvarı bükülmesi ve (b) hücre duvarı kırılması.



Şekil 8 Hazırlana köpüklerin farklı yoğunluklardaki basma davranışları (a) Al ve (b) Al-SiC.

Gibson ve Ashby (Gibson, 1997), basit çubuk modelleri kullanarak, ideal kapalı ve açık hücreli köpüklerin mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Mükemmel kapalı hücreli köpük yapısında plastik deformasyonun hücrelere uygulanan basma kuvvetine dik bir yönde hücre duvarlarının genişmesi şeklinde oluşması beklenmektedir. Bu durumda plato gerilmesi aşağıdaki denklemle ifade edilebilir

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C\rho \quad (1)$$

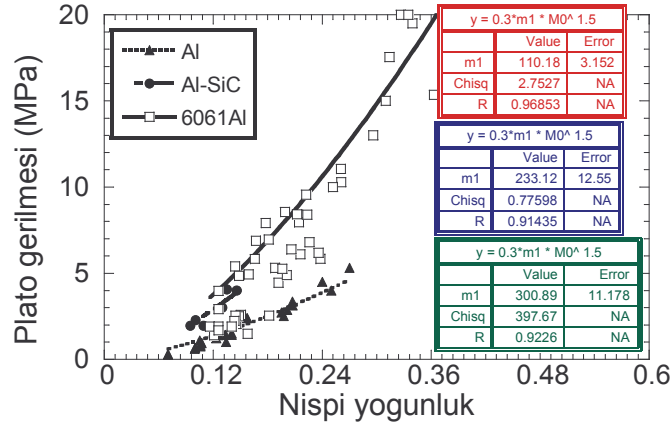
Burada C geometriye bağlı sabittir ve  $\rho$  nispi yoğunluktur ( $\rho = \rho^* / \rho_s$ : sırasıyla  $\rho^*$  ve  $\rho_s$  köpüğün ve hücre metalinin yoğunluğudur). Hücre genişlemesi, hücre duvarı bükülmesi ile eş zamanlı oluşması durumunda ise, aşağıdaki denklem plato gerilmesinin belirlenmesinde kullanılabilir (Gibson, 1997):

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_5 \left( \phi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C_6 (1 - \phi) \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2)$$

Burada,  $C_5$  ve  $C_6$  geometriye bağlı sabitlerdir. Eğer hücre duvarları, uygulanan yük yönünde bükülecek kadar ince ise plato gerilmesi hücre duvarı bükülmesi ile belirlenir ve bu durumda kapalı hücreli köpüğün plato gerilmesi açık hücreli köpüğün gerilmesine yaklaşıp. Ticari kapalı hücreli Al köpükler yüksek  $\phi$  değerine sahiptir ve dolayısıyla açık hücreli köpüklere benzer davranış gösterirler (Mc Cullough, 1999) Hazırlanan Al köpüklerin ve daha önce test edilen 6061 Al köpüğün plato gerilmesinin nispi yoğunlukla değişimi Şekil 9'da gösterilmektedir. Bu şekildeki gerilme verileri Denklem 2'ye,  $\phi$ 'nin değeri 1 ve  $C_5$ 'in değeri 0,3 (Gibson, 1997) alınarak uydurulmuş ve sonuçlar aynı şekilde gösterilmiştir. Denklem 2'den, Al köpükteki metalin akma gerilmesi 110 MPa çıkmaktadır. Bu akma gerilmesi Vicker Sertlik değerleri (33.715±2 HV) ile uyusmaktadır. Beklenildiği üzere SiC parçacık içeren ve 6061 Al alaşım köpüğün plato gerilmeleri Al köpükten daha yüksektir.

Al köpüklerin mekanik özelliklerini azaltan diğer faktörler ise şöyle sıralanabilir: eğri ve kayıp hücre duvarları, hücre duvarı ve köşesinde oluşan boşluklar ve heterojen yoğunluk dağılımıdır (Simone, 1998, Beals, 1997,

Sugimura, 1997). Hücrelerin elips şeklinde olması köpükte anizotropik özelliklere neden olabilir. Basma yükleri altında hücre duvarlarının yırtılması ve bunun sonucunda gazın hücreleri terk etmesi nedeniyle basma esnasında gaz sıkışmasının mekanik özelliklere etkileri ihmal edilmektedir.



Şekil 9. Plato gerilmesinin nispi yoğunlukla değişimi.

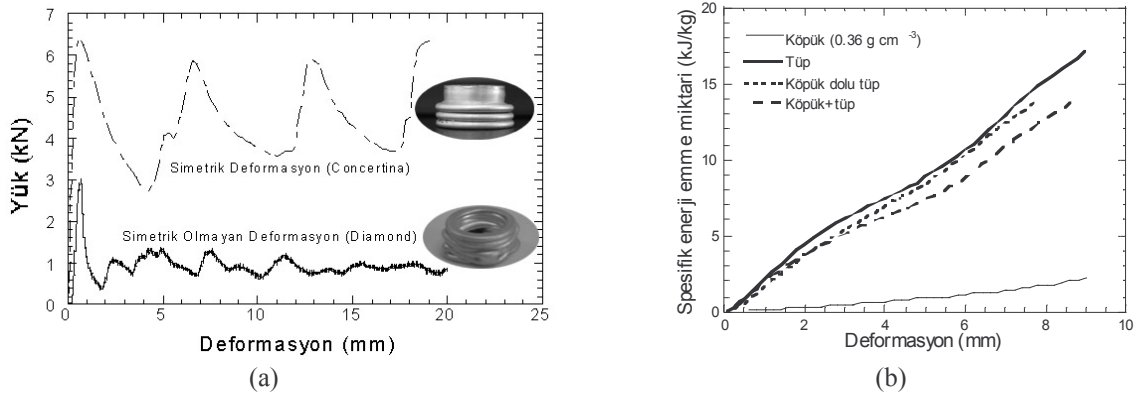
Burada metal ve polimer köpüklerin basma ve enerji-emme özelliklerini karşılaştırmak yararlı olacaktır, çünkü bu iki malzemenin yapısal uygulama alanları kesişmektedir. Benzer yoğunluğa sahip polietilen ve alüminyum köpük malzemelere yapılan basma deneyleri, metal köpüğün basma gerilmesinin üç kat daha yüksek olduğunu göstermiştir (Banhart, 1998). Metal köpükler deformasyon enerjisini plastik deformasyona dönüştürürler. Polimer köpükler ise depo ettikleri deformasyon enerjisini yükün kalkmasıyla salarlar. Bu özellik hareketli taşıtların çarpışmasında ikincil kazaların ortaya çıkmasına sebep olabilir. Yapılan yüksek hız basma deneyleri sonucunda (~3000/s 'e kadar) alüminyum köpüğün gerilme miktarlarının deformasyon hızıyla değişmediği bulunmuştur (Güden, 1998). Kapalı hücreli polimerik köpüklerde ise gerilmenin deformasyon hızıyla arttığı bulunmuştur. Basma testi esnasında hücrelere sıkışan gazların buna kısmen sebep olduğu ileri sürülmektedir. Fakat, alüminyum köpüklerde hücre duvarlarının bükülme veya yırtılma ile çökmesi gazların hücrelerde sıkışmasını engellemektedir.

Alüminyum metal köpüklerin mekanik özelliklerinin karşılaştırabileceği bir başka hafif malzeme ise metal balpeteğidir. Balpeteğinin, altıgen hücrelerin yöneldiği eksendeki basma direnci köpük metallerekinden daha yüksektir. Fakat hücrelerin yöneldiği eksene dik olan yönde balpeteği metal köpükten daha zayıf bir direnç gösterir. Ancak metal köpüklerin mekanik özellikleri homojen olup, test yönüne bağlı olarak fazla değişmez.

## 5. UYGULAMA ALANLARI (EZİLME KUTULARI)

Enerji söndürülmesinin önemli olduğu uygulamalarda örneğin hareketli araçlarda enerji emme ekipmanı olarak tüp yapıların kullanılması öngörülmektedir. Eksenel yük altında silindirik geometriye sahip tüp sabit bir ortalama kuvvette ezilmektedir ve bundan dolayı bu yapılarda enerji-emme verimliliği oldukça yüksektir (Alighamdi, 2000). Tüpler eksenel yük altında iki şekilde ezilmektedir: simetrik deformasyon (concertina) ve simetrik olmayan (diamond veya elmas) ezilmedir (Şekil 10(a)). Eksenel yük altında meydana gelen deformasyon şekilleri, tüp malzemesinin mekanik özelliklerine, silindirik geometrinin çap-kalınlık oranına göre belirlenmektedir.

Son yıllarda enerji emme elamanı olarak kullanılan tüp yapıların çeşitli malzemeler ile doldurularak spesifik enerji emme kapasiteleri artırılmaya çalışılmaktadır. Araştırmalar sonucunda eksenel yük uygulanan dolu tüplerin, tüp ve dolgu malzemesinin teorik olarak birlikte taşıyabildikleri yükten daha yüksek yük değerlerine ulaştıkları görülmüştür. Bunun sebebi tüp ile dolgu malzemesinin eksenel yük esnasında birbirleri ile olan etkileşimleridir, bu etkileşim spesifik enerji-deformasyon eğrisinde açıkça gözükmemektedir (Şekil 10(b)). Etkileşim nedeniyle eksenel yük uygulanması esnasında daha fazla deformasyon bölgesi oluşmakta ve buda dolu tüpün ortalama kuvvet değerinin artmasına sebep olmaktadır. Hazırlanan köpük metal dolu tüplerin mekanik özellikleri detaylı olarak bu konferansta bir başka çalışmada irdelenmiştir (Kavi, 2004).



Şekil 10 (a) Tüplerin yük-deformasyon davranışı ve (b) dolu ve boş tüpün spesifik enerji emme deformasyon davranışları.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada tabletlerin köpükleştirilmesi metodu olarak bilinen toz metalürjisi yöntemi ile köpük metal üretimi irdelenmiştir. Metodun en önemli avantajı nihai şekle yakın köpük metal yapıların üretilmesidir. Parçacık takviyesi ve Al-alaşım tozu kullanılarak köpük metallerin mukavemeti artırılabilirken, mikroyapısal bozukluklar kapalı hücrelerden beklenen mukavemetini azaltmaktadır. Kullanım alanları arasında ise otomobillerde kullanılan ezilme kutuları göze çarpmaktadır.

## 7. TEŞEKKÜR

Araştırmacılar, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) MİSAG 135 ve 227 projelerine verdiği destekten dolayı teşekkür eder.

## 8. KAYNAKLAR

- [1]. ALIGHAMDI, A.A.A., 2000, Collapsible impact energy absorbers: an overview, Thin-walled structures, sayı 39,S 189 – 213
- [2]. BANHART, J., 2001, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, Progress in Materials Science, Cilt 46, sayı 6, S 559-632
- [3]. BANHART, J., 2000, Manufacturing routes for metallic foams, JOM, sayı 52 (12), S 22-27
- [4]. BANHART J., BAUMEISTER J., 1998, Deformation characteristics of metal foams, J. Mater. Scie.sayı 33, S 1431-1440
- [5]. BAUMBERGER, F., DUARTE, I., BANHART J., 2000, Industrialization of powder compact foaming process, Advanced Eng. Mater., sayı 2, S 168 – 174
- [6]. BAUMEISTER, J., SCHRADER, H., 1992, US Patent No. 5151246
- [7]. BEALS, J. T., THOMPSON, M. S., 1997, Density gradient effects on aluminum foam compression behavior, J. Matter Scie., sayı 32, S 3595-3600
- [8]. ELBİR, S., YILMAZ, S., TOKSOY, A. K., GÜDEN, M., HALL, I. W., 2003, SiC-particulate alimumum composite foams produced by powder compacts:Foaming and compression behavior, J. Mater. Sci., sayı 38, S 4745-4755



- 
- [9]. ELBİR, S., YILMAZ, S., GÜDEN, M., 1999, Kapalı hücreli Alüminyum köpük metallerin üretim metodları ve mekanik özellikleri , Metalurji dergisi, sayı 120, S 35-42
- [10]. GERGELY, V., CLEYNE, B., 2000, The formgrip process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors, Adv. Eng. Mater. , sayı 4, S 175-178.
- [11]. GIBSON, L. J., ASHBY, M. F., 1997, Cellular solids : structures and properties, Cambridge University Press
- [12]. GÜDEN, M., HALL, I. W., YU, C. J., 2000, Crushing of aluminum closed-cell foams: density and strain effects, Scripta mater., sayı 43, S 515-521.
- [13]. GÜDEN, M., HALL, I. W., YU, C. J., 1998, Quasistatic and dynamic crushing of an aluminum closed-cell foam, TMS meeting
- [14]. JIN, I., KENNY, D. L., SANG, H., 1990, US Patent No. 4973358
- [15]. KAVİ, H., GÜDEN, M., Alüminyum köpük dolu alüminyum tüplerin ezilme davranışları, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu, 14-15-16 Nisan 2004, Denizli
- [16]. MCCULLOUGH, K. Y. G., FLECK, N. A., ASHBY, M. F., 1999, Uniaxial stress-strain behavior of aluminum alloy foams, Acta Mater., sayı 47, S 2323 – 2330
- [17]. MIYOSHI, T., HOH, M., AKIYAMA, S., KITAHARA, A., 2000, Alporas aluminum foam: production process, properties and applications, Adv. Eng. Mater., sayı 4, S 179-183
- [18]. SIMONE, A. E., GIBSON, L. J., 1998, The effect of cell face curvature and corrugations on the stiffness and strength of metallic foams, Acta Mater., sayı 46, S 3929-3935
- [19]. SUGIMURA, Y., MAYER, J., HE, M.Y., BART-SMITH, H., GRENESTEDT, J., EVANS, A.G., 1997, On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams, Acta Mater., sayı 12, S 5245-5259