

KAPALI HÜCRELİ ALÜMİNYUM KÖPÜK METALLERİN ÜRETİM METODLARI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

PRODUCTION METHODS AND MECHANICAL PROPERTIES OF CLOSED-CELL ALUMINUM FOAMS

Araş.Gör.Semih ELBİR, Yrd. Doç. Dr. Selahattin YILMAZ ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜDEN
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi Gaziosmanpaşa Bulv. Nö: 16, Çankaya, İZMİR

Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜDEN

Mustafa Güden 1967 yılında Polatlı/Ankara'da doğdu. O.D.T.Ü. Metalurji Mühendisliği bölümünde 1989 yılında lisans ve 1992 yılında yüksek lisans programlarını tamamlamıştır. 1998 yılında, University of Delaware'deki Malzeme Bilimi bölümünde Doktora programını tamamlayan Mustafa Güden İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makina Mühendisliği bölümünde görev yapmaktadır.

Yrd. Doç. Dr. Selahattin YILMAZ

Selahattin Yılmaz 1964 yılında Ankara'da doğdu. O.D.T.Ü. Kimya Mühendisliği bölümünde 1987 yılında lisans programını tamamlamıştır. 1990 yılında yüksek lisans ve 1995 yılında Doktora programlarını, University of Sheffield Kimya Mühendisliği bölümünde tamamlayan Selahattin Yılmaz İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliği bölümünde görev yapmaktadır.

Özet

Kapalı hücreli alüminyum köpük metallerin üretim metodları, mikroyapısı, mekanik özellikleri ve uygulama alanları özetlenmiştir. Bu malzemelerin en önemli mekanik özelliklerinden birisi basma altında yüksek miktarda enerji emme kapasiteleridir. Fraunhofer Research Center tarafından toz metalurjisi ile üretilen değişik yoğunluktaki alüminyum köpük metallerine basma testleri yapılmıştır. Basma gerilmesi yoğunluğun artmasıyla yükselemiştir. Fakat enerji emme kapasiteleri yoğunluğun artması ile azalmıştır. Köpük metal hücre duvarlarının oksit tabakası ile kaplı olduğu gözlenmiştir.

Abstract

Closed-cell aluminum foam's production methods, microstructure, mechanical properties and application areas were summarized. One of the important mechanical properties of these materials is their high energy absorption capabilities under compression. Compression tests were applied to aluminum metal foams of different densities produced by Fraunhofer Research Center. It was found that increasing metal foam density increased compression strength while it decreased energy absorption capacities of metal foams. Foam cell's walls were observed to be covered by a thin oxide layer.

Giriş

Alüminyum köpük metaller çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanları bulabilecek malzemeler olarak son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir. Bu alanlar arasında, hafifliğin ve mukavemetin birlikteliğini gerektiren otomobil, uçak, tren, asansör ve benzeri hareketli araçlar bulunmaktadır. Yapılarında homojen sayılabilecek porosite dağılımı ve boyutu bulundurmaları nedeniyle köpük metaller çok düşük yoğunluklar gösterebilirler ($0.08-0.5 \text{ g/cm}^3$). Diğer önemli özellikleri ise, yüksek birim şekil değişim miktarlarına kadar kırılmadan deforme olmaları ve yüksek miktarda enerji emme kapasiteleridir. Bu özellikler, köpük metalleri hareketli taşıtlarda çarpışma esnasında darbe enerjisini emecek dolgu malzemesi olarak kullanılmaya aday yapmıştır. Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Otoyolu Trafik Emniyet Kurumu'na (National Highway Traffic Safety Administration) göre, kaza anında sürücülerin başlarının çarpmaları sonucunda, her yıl 2400 kişi ölmekte ve 60000 kişi yaralanmaktadır. [1]. Türkiye'de bu rakamların daha yüksek olduğunu tahmin etmek zor değildir. Köpük metallerin hareketli taşıtlarda kullanımları kaza esnasında can kaybını ve yaralanmaları azaltacağı öngörülmektedir.

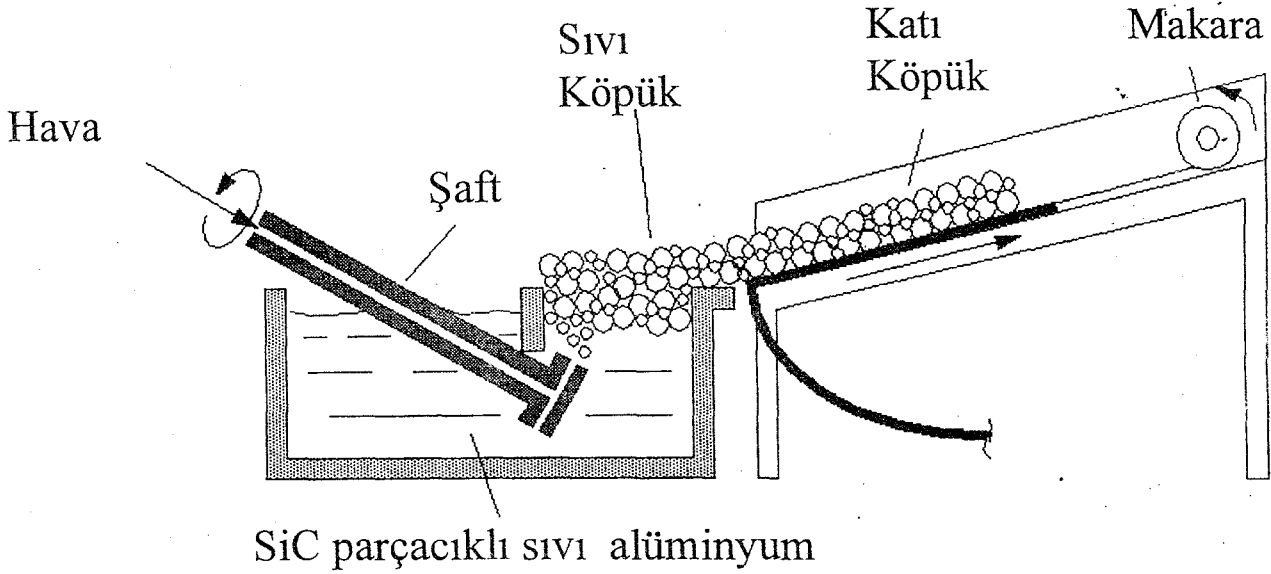
Köpük metallerin otomobil endüstrisinde emniyeti artırıcı standart malzemeler olarak kullanımları, bu malzemelerin büyük ölçekte üretilmelerini gerektirecektir.

Şu anda dünya çapında köpük metaller bir kaç firma tarafından az miktarda üretilmektedir. Bu malzemelerin çeşitli mühendislik uygulama alanlarını bulmaya yönelik deneysel çalışmalar halen sürmektedir. Elimizdeki kaynaklara göre ülkemizde henüz köpük metaller üretilmemektedir ve bu malzemelere yönelik bilimsel çalışmalarda bildiğimiz kadarıyla başlatılmamıştır. Bu çalışmada köpük metallerin tanıtılması amaçlanmıştır. Çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda köpük metallerin üretimi, mikroyapısı, mekanik ve diğer önemli özellikleri özetlenmiş, ikinci kısımda ise Fraunhofer Resource Center tarafından üretilen bir alüminyum köpük metal üzerine yapılan basma testleri sonuçlarıyla açıklanmıştır.

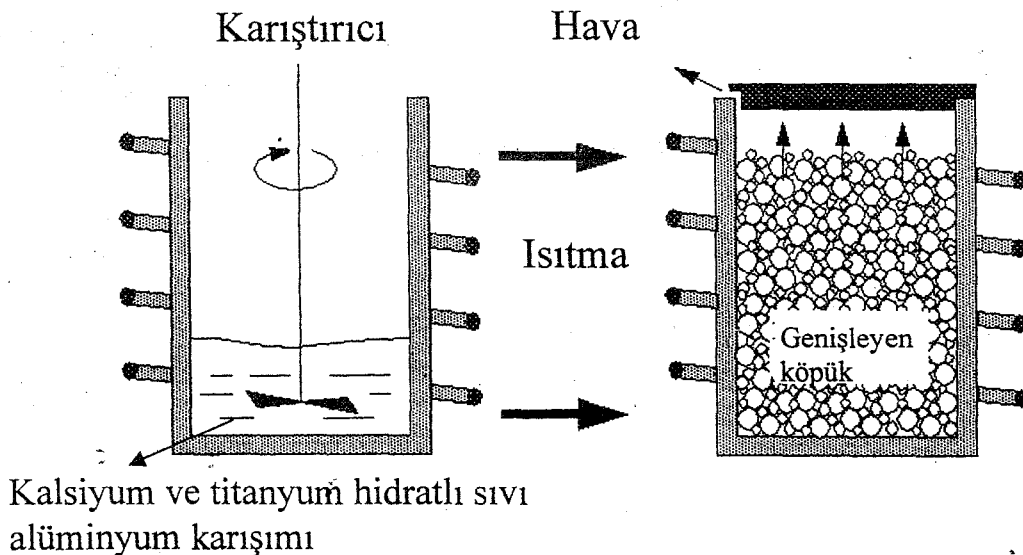
Köpük Metal Üretim Metotları

Köpük malzemeler 1970'li yıllardan itibaren değişik metodlar kullanılarak üretilmektedir. Köpük metaller ise sıvı metalin direk köpükleştirilmesi, katı-gaz ötektik katılaşması, hassas döküm, dolgu malzemeleri kullanılarak sentetik köpük üretimi ve toz metalurjisi metodları ile üretilirler [2,3]. Üretim metodlarından sıvı metalin direk köpükleştirilmesi ve toz metalurjisi ile köpük metal üretimi en yaygın kullanılanlardır.

Sıvı metalden direk köpük üretiminde ilk metod Cymat (önceleri Alcan olarak bilinir) tarafından geliştirilen sıvı metale gaz (hava, azot veya argon) üflenerek köpük metal oluşturulmasıdır (Şekil 1) [4, 5]. Başlangıç



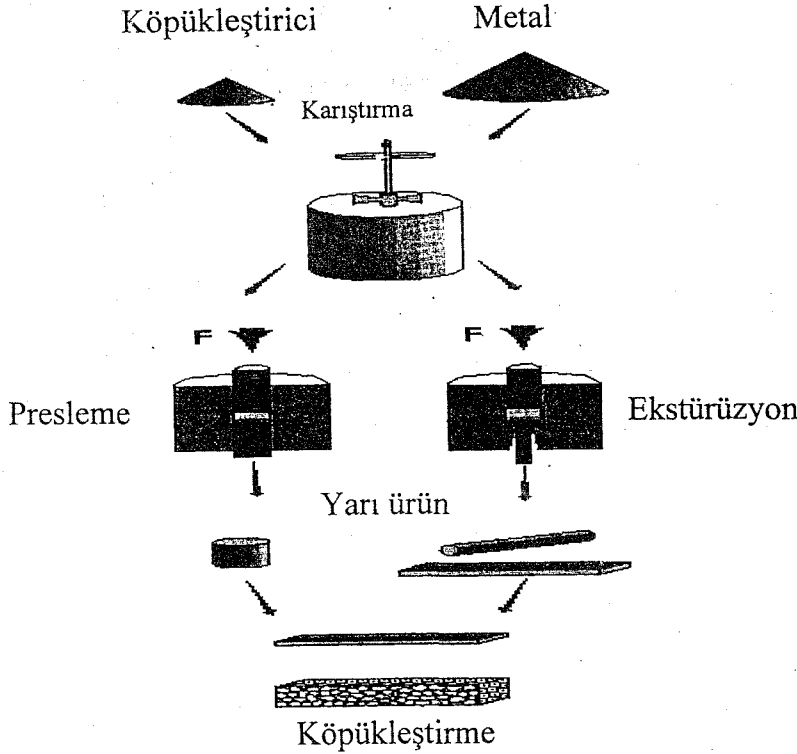
Şekil 1: Alcan alüminyum köpük metal üretiminin şematik gösterimi



Şekil 2: Alporas alüminyum köpük metal üretiminin şematik gösterimi

malzemesi metal matris kompozit olan bu metotta sıvı alüminyum metaline silikon karbit, alüminyum oksit veya magnezyum oksit tozları karıştırılarak viskozite ayarlanır. Daha sonra sıvının içine üflenen gaz yardımıyla sıvı metalin yüzeyine çıkan metal-gaz kabarcıkları alınarak döküm yapılır. Sıvı metalden direk köpükleştirme için kullanılan ikinci metod ise sıvı metale gaz üfleminin yerine köpük yapıcı malzemenin eklenmesidir. Köpük ya-

Toz metalurjisi kullanarak köpük metal üretimi Fraunhofer Resource Center tarafından patentlenmiştir [7,8,9]. Metodun ilk aşamasında köpük yapılacak metal ve köpük yapıcı toz malzemeler karıştırılıp pres veya ekstürüzyonla sıkıştırılır (Şekil 3). Sıkıştırılmış yarı ürün ergime sıcaklığının üstüne ısıtılarak köpükleşme sağlanır. Bu yöntemle alüminyum, çinko, kurşun ve çelik metal köpükler üretilebilir. Değişik metaller için çeşitli köpük yapıcı malzemeler kullanılabilir.



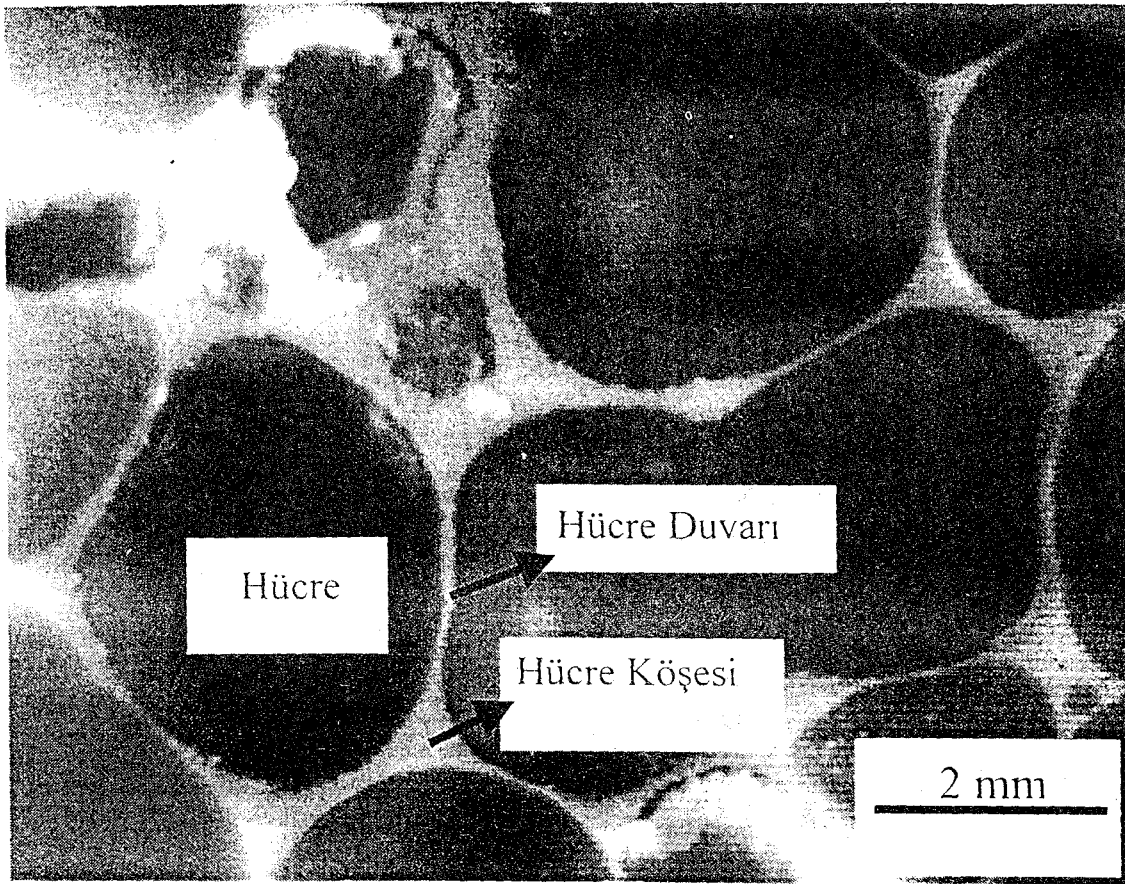
Şekil 3: Fraunhofer toz metalurjisi köpük metal üretiminin şematik gösterimi

pıcı malzeme sıcaklığın etkisiyle bozunarak gaz salar ve köpükleşmeyi sağlar. Bu yöntemle üretilen Alporas köpük metalde titanyum hidrat (TiH_2) köpük yapıcı olarak kullanılmaktadır (Şekil 2) [6].

Yapısında dağılmış küçük boyutlu gaz kabarcıkları bulunduran sıvılar sıvı köpük olarak tanımlanmaktadır. Sıvı metal köpük donma noktasının altında bir sıcaklığa getirilirse katı metal köpük oluşması sağlanır. Metal köpükte her bir gaz kabarcığının oluşturduğu hacime hücre demektir (Şekil 4). Hücre, hücre duvarları ve hücre köşelerinden oluşur. Hücre duvarı iki gaz kabarcığının oluşturduğu sınır, hücre köşesi ise üç gaz kabarcığının kesiştiği yerdir. Hücre köşesi hücre duvarından daha kalındır (Şekil 4).

Tablo 1. Üretilen kapalı hücreli alüminyum köpük metallerin özellikleri

	Cymat (Alcan)	Alporas	Fraunhofer
Üretim metodu	Sıvı Al + gaz	Sıvı Al + TiH_2	Katı Al + TiH_2
Yoğunluk (g/cm^3)	0.08-0.38	0.21	0.35-0.7
Nispi Yoğunluk	0.03-0.14	0.08	0.13-1.26
Hücre Boyutu (mm)	4-18	6	3
Fiyat (\$/kg)	5-10		300



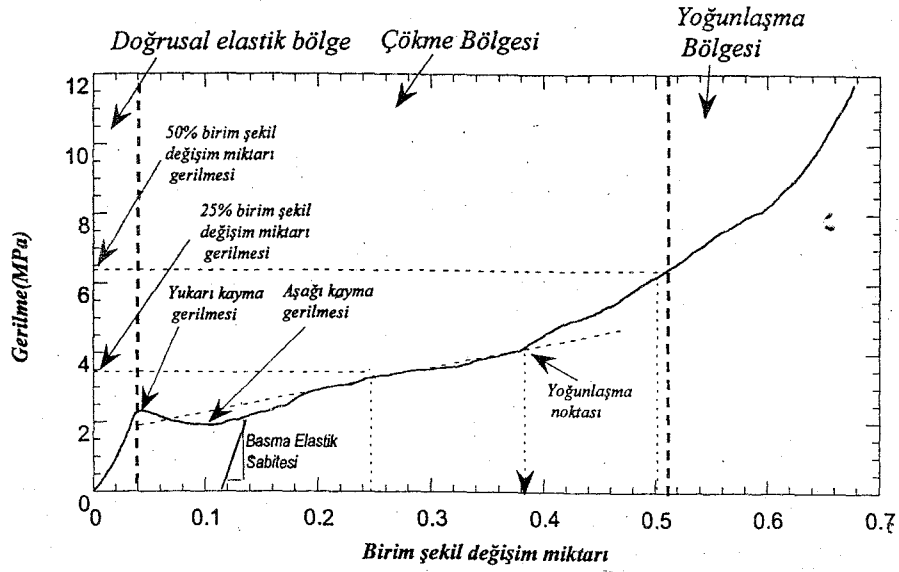
Şekil 4: Fraunhofer alüminyum köpük metalinin hücre yapısının mikroskopik görünümü

Köpük metaller basma testinde tipik bir gerilme/birim şekil değişim miktarı grafiği gösterirler; Fraunhofer köpük metali (yoğunluk 0.34 gr/cm^3) için Şekil 5'de verilmiştir. Elastik Sabitesi, yukarı ve aşağı kayma gerilmeleri, % 25 ve % 50 birim şekil değişim miktarlarına karşılık gelen gerilme miktarları ve yoğunlaşma noktası grafikten elde edilebilecek önemli mekanik özelliklerdir. Köpük metallerin gerilme/birim şekil değişim miktarı grafiği doğrusal elastik, çökme ve yoğunlaşma olmak üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Köpük metal doğrusal elastik bölgede elastik deformasyona uğrar. Bu bölge hücre duvarlarının bükülmesi ve yırtılmaya başlaması ile sona erer ve çökme bölgesi başlar. Çökme bölgesinde bölgesel deformasyon (hücre çökmesi ve yoğunlaşması) diğer bölgelere yayılarak devam eder. Bu bölgenin bitiminde hücreler (çökme-yoğunlaşma deformasyon sırasına izleyerek) sıkışarak yoğunluğu artmış bir yapı oluşturur. Çökme bölgesinde oluşan gerilme dalgaları (değişimleri) bölgesel deformasyonun yayılması esnasında oluşmaktadır. Yapısında homojen hücre boyut ve dağılımı bulunduran köpüklerin, çökme bölgesinde sabit bir deformasyon gerilmesi (pilato gerilmesi) göstermesi beklenir. Gerçekte ise hücre boyutu ve dağılımındaki farklılık-

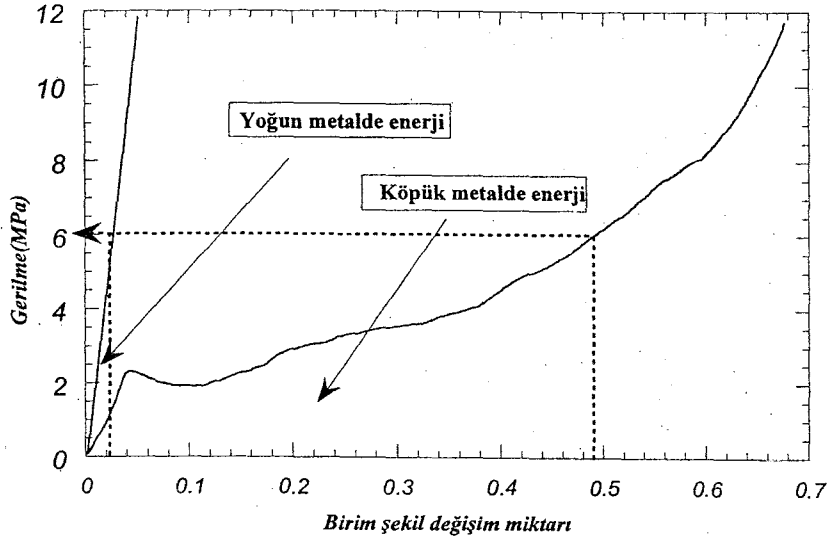
lar, zayıf hücrelerin önce kuvvetli hücrelerin de sonradan çökmesine neden olur ve bu yüzden gerilme çökme bölgesinde artan bir özellik gösterir. Bu özellik Şekil 5'te çökme bölgesinde görülmektedir. Şekilde dikkat edilecek diğer bir nokta ise köpük metalin çok yüksek birim şekil değişim miktarlarına ($\sim 70\%$) kadar kırılmadan deforme olmasıdır.

Gerilme/birim şekil değişim miktarı grafiğinin altındaki alan köpük metalin enerji-emme kapasitesini gösterir. Verilen sabit bir gerilme miktarında köpük metal yoğun metalden daha fazla enerji-emme özelliğine sahiptir (Şekil 6). Sabit birim şekil değişim miktarlarında ise enerji-emme yoğun metalde daha yüksektir. Fakat uygulamalarda sabit gerilmedeki enerji-emme daha önemlidir.

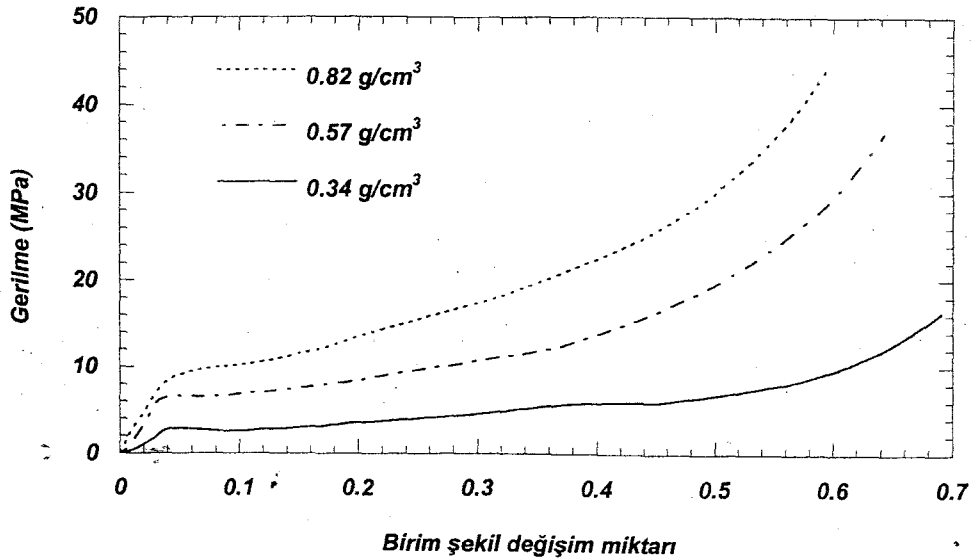
Burada köpük metallerin ve polimerlerin basma ve enerji-emme özelliklerini karşılaştırmak yararlı olacaktır, çünkü bu iki malzemenin yapısal uygulama alanları kesişmektedir. Benzer yoğunluğa sahip köpük polietilen ve köpük alüminyum malzemelere yapılan basma deneyleri, köpük metalin basma gerilmesinin üç kat daha yüksek olduğunu göstermiştir [9]. Köpük metaller deformasyon enerjisini plastik deformasyona dönüştürerek yok eder-



Şekil 5: Köpük metalin gerilme/birim şekil değişim miktarı grafiği



Şekil 6: Köpük ve yoğun metallerde enerji emme



Şekil 7: Gerilmenin köpük yoğunluğu ile değişimi

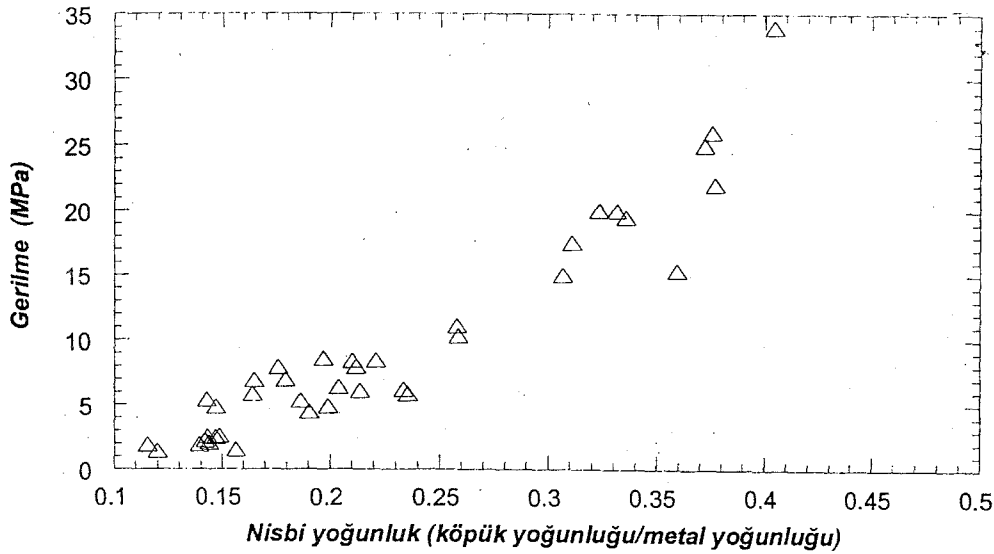
ler. Köpük polimerler ise depo ettikleri deformasyon enerjisini yükün kalkmasıyla salarlar. Bu özellik hareketli taşıtların çarpışmasında ikincil kazaların ortaya çıkmasına sebep olabilir. Yapılan yüksek hız basma deneyleri sonucunda (~3000/s'e kadar) alüminyum köpük metalinin gerilme miktarlarının deformasyon hızıyla değişmediği bulunmuştur [10]. Kapalı hücreli polimerik köpüklerde ise gerilmenin deformasyon hızıyla arttığı gözlenmiştir. Basma testi esnasında hücrelere sıkışan gazların buna kısmen sebep olduğu bulunmuştur [11, 12]. Fakat, alüminyum köpük metallerde hücre duvarlarının bükülme veya yırtılma ile çökmesi gazların hücrelerde sıkışmasını engellemektedir.

Alüminyum köpük metallerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılabilmesi için bir başka hafif malzeme ise metal

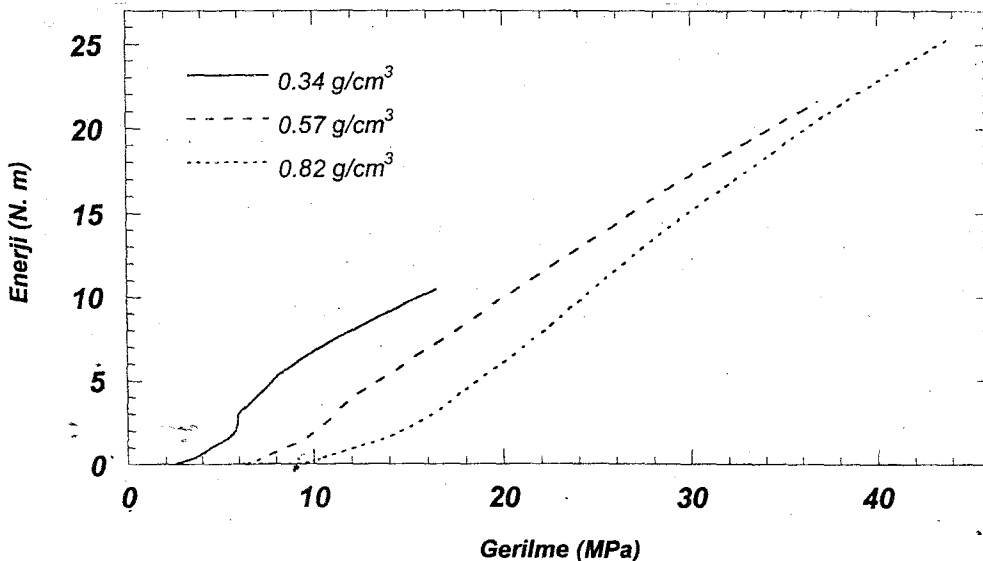
balpeteğidir. Balpeteğinin, altıgen hücrelerin yöneldiği eksenindeki basma direnci köpük metallerinkinden daha yüksektir. Fakat hücrelerin yöneldiği eksene dik olan yönde balpeteği köpük metalden daha zayıf direnç gösterir. Ancak köpük metallerin mekanik özellikleri homojen olup, test yönüne bağlı olarak fazla değişmez.

Alüminyum köpük metallerinde hücre duvarlarının alüminyum oksit tabakası ile kaplı olması bu metallere yanmama (ateşe dayanıklı) özelliğini sağlamaktadır [13]. Bu tabakanın kalınlığının Alcan köpük metalinde 1-2 mikron olduğu ölçülmüştür [14].

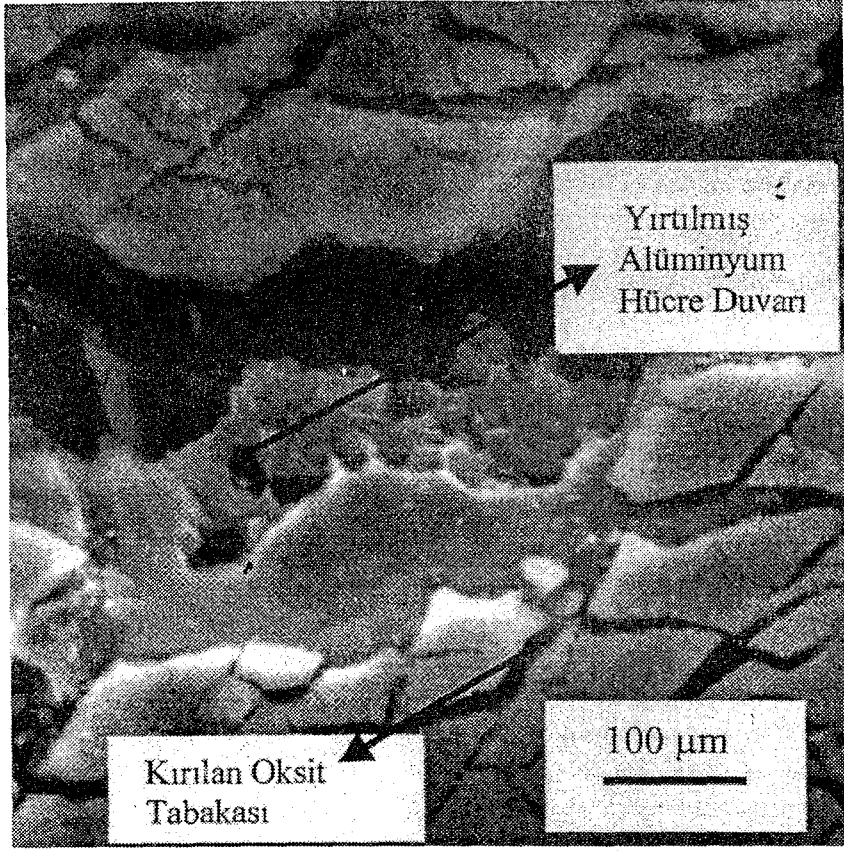
Köpük metaller dolgu malzemeleri olarak kullanıldığında, örneğin tabaklar arasında veya çelik tüplerin içinde, darbeye karşı direnci ve bükülme mukavetini arttırmaktadır [15,16]



Şekil 8: Gerilmenin (%10 birim şekil değişim miktarında) nisbi yoğunlukla değişimi.



Şekil 9: Enerji emme miktarının gerilme ile değişimi



Şekil 10: Yırtılan alüminyum hücre duvarının mikroskopik görünümü

Uygulama Alanları

Alüminyum köpük metallerin potansiyel uygulama alanları hafiflik, enerji-emme, ses, ısı yalıtımı ve yanma özelliklerine bağlı olarak şöyle sıralanabilir [13];

- *Yarı yapısal*: panellerde dolgu malzemesi (inşaatlar, asansörler,...)
- *Darbe*: taşıtların gövdesinde, kapı kısımlarında, paketlemede ve paletlerde
- *Ses*: susturucu
- *Isı transferi/yalıtım*: hafif ateş kapılarında, taşıt ateş duvarlarında ve reaktörlerde

Deneyisel Çalışmalar

Basma Deneyleri

Fraunhofer Resource Center'in toz metalurjisiyle ürettiği, değişik yoğunluklardaki (0.34, 0.57 ve 0.82 g/cm³) köpük alüminyum (6061) metallerinden hazırlanan 20 mm çapında ve 12 mm uzunluğundaki silindirik numunelere düşük hızlarda (10^{-3} s⁻¹) basma testleri yapılmıştır. Eldeki köpük metaller tabak şeklinde olup, si-

lindirik numuneler delinerek (core-drill) hazırlanmıştır. Silindirik numunelerin yoğunlukları basma testinden önce ölçülmüştür. Her numune için basma testleri Instron test makinası ile yapılarak gerilme/birim şekil değişim miktarı grafikleri elde edilmiştir.

Sonuçlar ve Tartışma

Şekil 7'de farklı yoğunluklardaki köpük alüminyumların gerilme/birim şekil değişim miktarı grafikleri gösterilmiştir. Gerilme miktarları yoğunluk ile artmaktadır. Yoğunlaşma noktası ise yoğunluk ile düşmektedir. Köpük metal yoğunluğunun gerilmeye olan etkisi Şekil 8'de %10 birim şekil değişim miktarına (pilato gerilmelerine yakın) karşılık gelen gerilme değerleriyle gösterilmiştir.

Şekil 9'da farklı yoğunlukdaki alüminyum köpük metallerin enerji-emme miktarları gerilmeye karşılık verilmiştir. Sabit bir gerilme miktarı alındığında en yüksek enerjiyi yoğunluğu en düşük olan köpük emmiştir. Sabit birim şekil değişim miktarında ise en yüksek enerji emen yoğunluğu en yüksek olan köpüktür.

Yapılan mikroskobik gözlemlerde hücrelerin oksit tabakası ile kaplı olduğu bulunmuştur (Şekil 10). Oksit tabakası basma testinde gevrek kırılırken, oksit tabaka-

sının altındaki metal düktilite olarak yırtılmıştır. Kırılan oksit tabakasının köpük metalinin üzerinde kaldığı gözlenmiştir. Alüminyum köpüklerde hücrelerin hücre duvarlarının bükülmesi ve yırtılması ile çöktüğü gözlenmiştir [10]. Bükülme uygulanan basma yükünün sonucu olmaktadır. Yırtılma ise basma testine normal düzlemde oluşan çekme uzamalarından kaynaklanmaktadır.

Köpük metal numunelerinin çaplarının çok yüksek birim şekil değişim miktarlarına (~%70) kadar değişmesi, Poisson Oranının düşük olduğunu göstermektedir. Bu özellik diğer köpüklerde de gözlenmiştir [17].

Sonuç

Kapalı hücreli alüminyum köpük metallerin üretim metodları, özellikleri ve kullanım alanları özetlenmiştir. Toz metalurjisi metodu ile köpük metallerin son şekline yakın üretilmesi bu metodun gelecekte yaygın olarak kullanılmasına imkan sağlayabilir. Basma testleri alüminyum köpük metallerinin tipik bir köpük malzeme gibi davrandığını göstermiştir. Basma gerilmesi yoğunlukla artış göstermiştir. Buna karşılık, enerji emme kapasite-ri yoğunluk artışıyla azalmıştır. Alüminyum köpük metallerin hücre duvarlarını bir oksit tabakası kaplamaktadır. Bu özelliğinden dolayı ateşe dayanıklı malzemelerin yapılmasında kullanılabilirler. Oksit tabakasının mekanik özelliklere olan etkisi araştırılması gereken bir diğer parametredir.

Referanslar

1. <http://www.foamex.com/auto/energy.html>
2. G. J. Davies and S. Zhen, "Review Metallic Foams: Their Production, Properties and Applications", J. Mater. Sci., 18, Sayfa 1899-1911, 1983.
3. J. Banhart, "Production Methods for Metallic Foams", Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, J. Banhart ve H. Eifert Basımı, Stanton, Delaware, Ekim 7-8, Sayfa 3-11, 1997.
4. J. T. Wood, "Production and Applications of Continuously Cast, Foamed Aluminum", Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, J. Banhart ve H. Eifert Basımı, Stanton, Delaware, Ekim 7-8, Sayfa 31-35, 1997.
5. O. Prakash, H. Sang, J. D. Embury, "Structure and Properties of Al-Si Foam", Mater. Sci. Eng., A199, Sayfa 195-203, 1995.
6. L.J. Gibson, A. E. Simone, "Aluminum Foams: Structure and Properties", Ultralight Metal Structures, ARPA/ONR Workshop, Harvard University, 18 Nisan 1997.
7. J. Baumeister, H. Schrader, "Method for Manufacturing Foamable Metal Bodies", U.S. Patent No:5, 151, 246.
8. C-J. Yu, H.H. Eifert, "Metal Foaming by a Powder Metallurgy Method: Production, Properties and Applications", J. Materials Research Innovations, 2(3), 1998.
9. C-J. Yu, J. Banhart, "Mechanical Properties of Metallic Foams", Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, J. Banhart ve H. Eifert, Stanton, Delaware, Ekim 7-8, Sayfa 37-48, 1997.
10. M.Güden, I. W. Hall, C-J. Yu, "Quasi-static and Dynamic, Crushing of an Aluminum Closed-Cell Foam", Trans. Metall. Soc. Annual Meeting, Ekim 1988, Chicago.
11. M. O. W. Richardson, D. S. Nandra, "Load-Deflection Analyses of Shock Mitigating Polyurethane-Silicone Foams", Cellular Polymers, 4, Sayfa 445-462, 1985.
12. J. A. Sherwood, C. C. Forest, "Constitutive Modeling and Simulation of Energy Absorbing Polyurethane Foam under Impact Loading", Plastics and Plastics Composites, MD-Vol. 29, V. J. Stokes, Sayfa 347-370, 1991.
13. A. Giamei, "Aero-Engine and naval Applications for Ultra-Lightweight Metals", Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, J. Banhart ve H. Eifert Basımı, Stanton, Delaware, Ekim 7-8, Sayfa 63-78, 1997.
14. Y. Sugimura, J. Meyer, M. Y. He, H. Bart-Smith, J. Grenstedt, A. G. Evans, "On the Mechanical Performance of Closed Cell Al Alloy Foams", Acta Mater. Vol. 45, No. 12, Sayfa 5425-5259, 1997.
15. C. L. Wu, C. A. Weeks, C. T. Sun, "Improving Honeycomb-Core sandwich Structures for Impact Resistance", J. Advance Mater., Sayfa 41-47, 1995.
16. M. Seitzberger, F. G. Rammerstorfer, H. P. Degischer, R. Grandinger, "Crushing of Axially Compressed Steel Tubes Filled with Aluminum Foam", Acta Mechanica, Vol. 125, Sayfa 93-105, 1997.
17. L. J. Gibson, M. F. Ashby, "Cellular Solids: Structures and Properties", Pergamon Press, Oxford, Sayfa 132, 1988.