

Al₂O₃ İLAVESİNİN ALÜMİNYUM ve ALUMİX 231 ESASLI METALİK KÖPÜĞÜN KÖPÜRME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

*Uğur GÖKMEN, **Mehmet TÜRKER

*Gazi Ü. Atatürk Meslek Yüksekokulu Beşevler, ANKARA

**Gazi Ü. Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Müh. Beşevler, ANKARA

ugurgokmen@gazi.edu.tr, mturker@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 11.11.2011; Kabul/Accepted: 02.04.2012)

ÖZET

Yapılan çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile saf alüminyum ve ön alaşımlı Alumix 231 (Al-Cu %2,5-Mg %0,5-Si %14) esaslı Al₂O₃ parçacık takviyeli kompozit köpükler üretilmiştir. Al ve Alumix 231 tozları ile % 1 oranında titanyum hidrür tozları ve % 1-3-5-7 oranlarında Al₂O₃ parçacıkları üç boyutlu karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karışım tozlar kalıp içerisinde 600 MPa basınç altında preslenerek blok numuneler haline getirilmiştir. Elde edilen blok numuneler fırın içerisinde 550 °C sıcaklıkta 3 saat ön ısıtmaya ve aynı zamanda da sinterlemeye tabii tutulmuş ve numunelere daha sonra 690 ve 710 °C sıcaklıkta köpürtme işlemi yapılmıştır. Köpürtme işlemi sonrasında numuneler fırından alınarak atmosfer ortamında soğutulmuştur. Elde edilen köpük numunelerde Al₂O₃ ilavesinin lineer genleşme, parça yoğunluğu ve gözenek boyutuna etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Al Köpük, Alumix 231 köpük, Al₂O₃ ilavesi, Lineer genleşme.

EFFECT OF Al₂O₃ ADDITION ON THE FOAMABILITY BEHAVIOUR OF ALUMINUM AND ALUMIX 231 BASED METALLIC FOAM

ABSTRACT

In this study, pure aluminum and pre-alloyed Alumix 231 (Al-Cu %2,5-Mg %0,5-Si %14) based composite foams reinforced with Al₂O₃ particulate have been produced by powder metallurgy route. 1% titanium hydrate powders and 1-3-5-7% Al₂O₃ particulates have been added to Al and Alumix 231 powders and mixed in a three dimensional mixer. Mixed powders were then pressed at 600 MPa pressure to produce block samples which were sintered at 550 °C for 3 hours. After then foaming process has been carried out at 690 and 710 °C. Foamed samples were taken from the furnace and cooled in open air. Effects of Al₂O₃ particles on the linear expansion, density and the size of porosity have been determined.

Key Words: Al Foam, Alumix 231 foam, Al₂O₃ addition, Linear Expansion.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulan gözenekli yapılar son yıllarda fonksiyonel malzemeler olarak oldukça dikkat çekmektedir. Fonksiyonel olarak tercih edilen gözenekli malzemelerin başında metalik köpükler gelmektedir. Metalik köpükler, mekanik özelliklerinin iyi olmasından dolayı günümüzde artan öneme sahip malzemelerdir. Bu özellikler arasında enerji sönümleme kabiliyetinin yüksek olması, düşük ağırlık, ısı izolasyon, titreşim azaltma gibi özellikler sayılabilir [1]. Gözenekli ve köpük yapılar taşıyacakları yük dikkate alınarak seçilmelidir. Metal

köpük yapılarla polimer ve seramik esaslı köpük yapılar arasında mekanik özellikler açısından farklar vardır. Polimer malzemelerin yeterli derecede rijit olmadıkları, seramik malzemelerin ise çok gevrek bir yapıya sahip oldukları bilinmektedir. Enerji sönümlemenin, hafifliğin ve mukavemetin bir arada istenildiği filtreler, susturucular, mil yatağı gibi bazı uygulamalarda metalik köpük yapıları kullanmak doğru bir seçim olarak görülmektedir [2,3]. Metalik köpüklerin kullanım alanları arasında spesifik mukavemetin tasarımlarda parametre olarak ön plana çıktığı otomotiv sanayi, uzay sanayi, demiryolu taşımacılığı ve asansör gibi alanlar bulunmaktadır [4]. Metalik köpükler özellikle ultra hafif olmalarından

dolayı boru ve profiller içerisinde ve sandviç yapılar arasında dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar [5-7]. Metalik köpük malzemeler arasında Al esaslı metalik köpükler, kapalı hücre yapıları ve hafiflikleri ile göze çarpmaktadırlar [8]. Alüminyumun bulunabilirliği, elde edilmesi, üretimi ve hafifliği nedeniyle bir ileri teknoloji malzemesi olduğu Boston tarafından belirtilmiştir. [9]. Al köpükler, darbe enerjisini plastik enerjiye dönüştürebilir ve birçok metalden daha fazla enerji sönümleyebilir [10]. Metalik köpüklerin gözenek yapılarına bağlı olarak kullanım alanları değişmektedir. Metalik köpükler “açık gözenekli” ve “kapalı gözenekli” olmak üzere ikiye ayrılır. Gözenekler birbiriyle bağıntılı bir halde bulunuyorsa bu yapıya “açık gözenekli metalik köpük” adı verilmektedir. “Kapalı gözenekli metalik köpükler” de ise hücrelerin her birinin içerisinde gaz hapsedilmiş ve birbirinden yalıtılmış bir halde bulunmaktadır [11]. Bu çalışmada üretimi yapılan gözenekler kapalı hücreli gözeneklerdir.

Yapılan çalışmada, toz metalurjisi (TM) yöntemiyle, Al ve Alumix 231 esaslı değişik oranlarda (% 1-3-5-7) Al₂O₃ takviyeli metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Matris malzemenin türüne bağlı olarak ilave edilen takviye elemanın metalik köpük malzemenin gözenek morfolojisine, lineer genişlemeye ve yoğunluğa etkisi karşılaştırılmıştır.

2. DENEY MALZEMESİ VE METOT (EXPERIMENTAL MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzeme (Materials)

Bu çalışmada TM yöntemi kullanılarak kompozit köpükler üretilmiştir. Matris malzemesi olarak Ecka Granules firması tarafından üretilen % 99,9 saflıktaki saf Al ve ön alaşımlı Alumix 231 (Al-Cu %2,5-Mg %0,5-Si %14) tozları, köpürtücü madde olarak Sigma Aldrich firması tarafından üretilen % 98 saflıktaki TiH₂ tozu ve parçacık takviyeli kompozit köpük üretimi için ise % 99,5 saflıkta Al₂O₃ tozları

kullanılmıştır. Kullanılan tozların fiziksel özellikleri Tablo 1’ de verilmiştir.

2.2. Metot (Method)

Saf Al ve ön alaşımlı Alumix 231 tozları % 1 oranında TiH₂ ve ağırlıkça % 1-3-5-7 oranlarında Al₂O₃ tozu eklenerek, turbula marka T2F tipi üç boyutlu karıştırıcı ile homojen bir dağılım elde etmek amacıyla 30 dakika karıştırılmıştır. Karışım tozlar kalıp içerisinde 600 MPa basınç altında tek yönlü preslenerek 50 x 30 x 10 mm boyutunda toz metal blok numuneler üretilmiştir. Protherm marka fırın içerisinde 550 °C sıcaklıkta 3 saat süre ile ön sinterleme işlemine tabi tutulan TM blok numuneler eksantrik pres kullanılarak 450 °C’ de sıcak dövme yoluyla % 50 oranında tek yönlü deforme edilmiştir. Üretilen metal matrisli kompozit köpüklerde köpürtme sıcaklığının gözenek morfolojilerine etkilerini incelemek amacıyla farklı sıcaklıklarda deneyler yapılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Köpürtme sıcaklıkları (Foaming duration)

Matris Malzemesi	Köpürtme Sıcaklığı (°C)			
	Al	650	670	690
Alumix 231	650	670	690	710

Köpürtme sıcaklıkları matris malzemelerin kimyasal bileşimine uygun şekilde belirlenmiş 5 °C/dk ısıtma hızı kullanılarak SFL marka Mufle tipi fırın içerisinde koruyucu gaz kullanmadan köpürtme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Köpürtme işlemi herhangi bir kalıp kullanılmadan serbest halde yapılmıştır. Yapılan ön deneyler neticesinde Alumix 231 tozu için köpürtme sıcaklığı 690°C, saf Al tozu için ise köpürtme sıcaklığı 710°C olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan tozların fiziksel özellikleri ve üretim yöntemleri
(Physical properties and production routes of powders used)

Malzeme	Fiziksel Özellikler			
	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime sıcaklığı (°C)	Toz Boyutu (µm)	Üretim yöntemi
Alüminyum	2,7	660	<160	Gaz atomizasyon
Alumix 231	2,67	577	<160	Gaz atomizasyon
Al ₂ O ₃	3,97	2040	<32	---
TiH ₂	3,91	<400	<45	---

2.3. Karakterizasyon (Characterization)

Elde edilen köpüklerin yoğunlukları Sartorius marka 0,0001 g hassasiyetine sahip terazi ve yoğunluk kiti kullanılarak belirlenmiştir. Yoğunluk hesabı aşağıda verilen Arşimet prensibine göre yapılmıştır:

$$d = \frac{m}{V_y - V_s}$$

d: Yoğunluk (g/cm³)

m: Ağırlık (g)

V_y: Yaş ağırlık (g)

V_s: Su içerisindeki ağırlık (g)

Numunelerin lineer genişleme oranları literatürden yararlanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır [12];

$$\text{Lineer Genişleme Oranı} = \frac{L_s - L_i}{L_i}$$

L_i: Köpürme öncesi numune yüksekliği (mm)

L_s: Köpürme sonrası numune yüksekliği (mm)

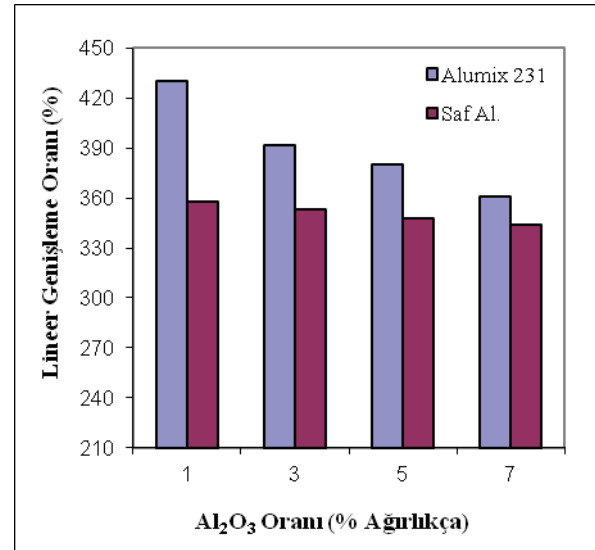
Elde edilen kompozit köpükler makro ve mikro boyutta karakterizasyon işlemleri için köpürme yönlerine dik olarak ortadan kesilmiştir. Kesik yüzeyler 240-400-800-1200' lük zımparalar ile su altında zımparalanmış ve daha sonra parlatma keçelerinde 3 µm' lik elmas pasta kullanılarak parlatma yapılmıştır. Üretilen metalik köpüklerin gözenek duvarlarında dağılmış Al₂O₃ parçacıkların matris malzeme ile ara yüzeyleri JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Lineer Genişleme (Lineer Expansion)

Şekil 1'de ön alaşımlı Alumix 231 tozu ve saf Al tozlarına ilave edilen Al₂O₃ parçacık oranına bağlı olarak değişen maksimum lineer genişleme oranları görülmektedir. Her iki matris malzemesi içerisinde bulunan Al₂O₃ parçacık oranının artmasına bağlı olarak lineer genişlemede azalma meydana gelmektedir. Yüzey-aktif maddeler sıvıların yüzey gerilimlerini azaltarak metalik köpüklerin elastik davranışının geliştirilmesine neden olur [13]. Bu nedenle matris malzemesine ilave edilen Al₂O₃ parçacıklarının gözenek duvarları üzerinde yüzey etken maddesi olarak davrandığı düşünülmektedir. Ayrıca matris yapı içerisindeki Al₂O₃ parçacık oranındaki artış hücre duvarlarında dayanımı artırıp gözenek oluşumunu geciktirmekte ve hücre duvarlarının dayanımının artmasına bağlı olarak da köpürme sırasında lineer genişleme azalmaktadır [14]. Köpük dayanıklılığındaki parçacıkların rolü birden

çok mekanizma (parçacık boyutu, parçacık dağılımı gibi) ile ilişkilendirilebilir. Geniş alanlar üzerinde ince film kalınlığı ve drenaj azalması gibi çeşitli etkiler parçacıkların genel köpük dayanıklılık etkisinde önemlidir [15].

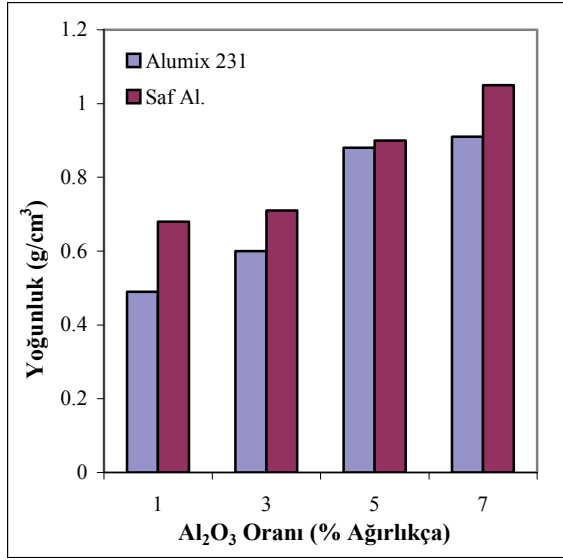


Şekil 1. Al ve Alumix 231 esaslı malzemeler içerisindeki Al₂O₃ oranına bağlı olarak lineer genişlemedeki değişim.

(Variations in the linear expansion rates of Al and Alumix 231 foams by addition of Al₂O₃)

3.2. Yoğunluk (Density)

Şekil 2'de saf Al ve Alumix 231 içerisine ilave edilen Al₂O₃ parçacıklarının oranının artmasına bağlı olarak değişen yoğunluk oranları görülmektedir. Şekil 2' de görüldüğü gibi seramik parçacık oranındaki artışa bağlı olarak yoğunluk değerlerinde artış meydana gelmiştir. Matris malzemesi ön alaşımlı Alumix 231 tozu olan numunelerde en düşük yoğunluk değeri 0,48 g/cm³ en yüksek yoğunluk değeri 0,91 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. Matris malzemesi saf Al tozu olan numunelerde ise en düşük yoğunluk değeri 0,67 g/cm³ en yüksek yoğunluk değeri 1,04 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Her iki matris malzemesi ile üretilen köpükler için kısmen yakın yoğunluk değerleri elde edildiği söylenebilir. Fakat Alumix 231 esaslı köpüklerin Al esaslı köpüklere oranla yoğunluğunun çok azda olsa düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin gözenek duvarlarında var olan parçacıkların dayanımı artırarak köpürmenin daha geç başlamasına neden olduğu düşünülmektedir. Al alaşımlarında yapı içerisinde var olan silisyum ve magnezyumun yapının ergime derecesini düşürdüğü ve gözenek duvarlarını incelttiği bilinmektedir [16]. Ön alaşımlı Alumix 231 tozu içerisinde var olan %14 oranındaki silisyumun alaşımın ergime derecesini önemli ölçüde düşürdüğü bilinmektedir. Buna bağlı olarak köpürmenin daha erken başladığı ve gaz boşluklarının fazla olmasından dolayı yoğunluğun daha düşük olduğu söylenebilir.



Şekil 2. Matris malzemeler içerisindeki Al₂O₃ oranındaki artışa bağlı olarak yoğunluk değişimi. (Density variation depending on the added Al₂O₃ particles in the matrix)

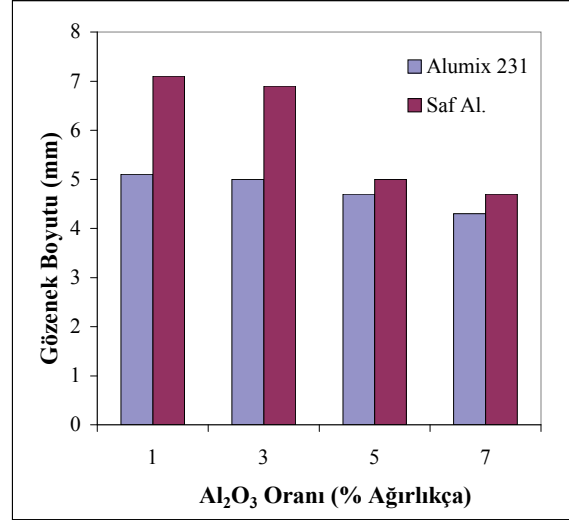
3.3. Gözenek Boyutu (Pore Size)

Üretilen metal matrisli kompozit köpüklerin gözenek boyutları takviye elemanın miktarına göre farklılıklar göstermektedir. Şekil 3'te Alumix 231 esaslı ve saf Al esaslı Al₂O₃ parçacık takviyeli kompozit köpüklerde takviye elemanın miktarındaki artışa bağlı olarak gözenek boyutunda meydana gelen değişimler görülmektedir. Her iki matris yapıda da artan takviye elemanı miktarına bağlı olarak gözenek duvar kalınlıklarında artma, gözenek boyutunda azalma olduğu tespit edilmiştir. Alumix 231 esaslı kompozit köpüklerin saf Al esaslı kompozit köpüklere göre gözenek duvar kalınlıklarının daha ince ve gözenek boyutlarının daha küçük olduğu belirlenmiş ve Şekil 3'te gözenek boyutları arasındaki farklar grafik üzerinde gösterilmiştir. Si ve Mg gibi alaşım elementlerinin Al matrisli yapıların köpürmesi sırasında ergiyiğin akışkanlığına ve köpürtücü maddenin ayrıştıktan sonra daha rahat hareket etmesine etkileri literatürde belirtilmiştir [17]. Buna bağlı olarak Alumix 231 içerisinde var olan alaşım elementlerinden dolayı köpürmenin daha erken başlaması ve gözenek duvarlarına köpürtücü maddeden açığa çıkan hidrojen gazının daha erken etki etmesi sebebi ile gözenek duvarlarının daha ince ve gözenek boyutlarının daha küçük olduğu düşünülmektedir.

3.4. Gözenek Yapısı (Pore Structure)

Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının sabit olması nedeniyle sabit köpürtme süresinde gözenek duvarlarında artan takviye elemanına bağlı olarak bozulma daha geç olmuştur. Artan Al₂O₃

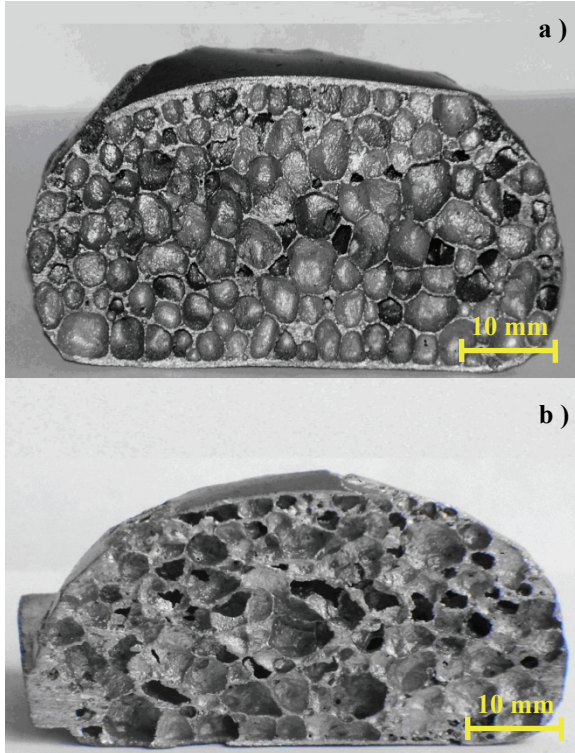
oranına bağlı olarak gözenek sayısında azalma ve gözenek duvar kalınlıklarında artış meydana gelmiştir. Takviye elemanında ki artış gözenek duvarlarında dayanım artışına neden olmaktadır [13]. Kullanılan köpürtme sıcaklığı yapıya ilave edilen takviye elemanın ergime derecesinden daha düşüktür ve bu nedenle seramik parçacıkların gözenek duvarlarında hiçbir reaksiyona girmeden kaldığı düşünülmektedir.



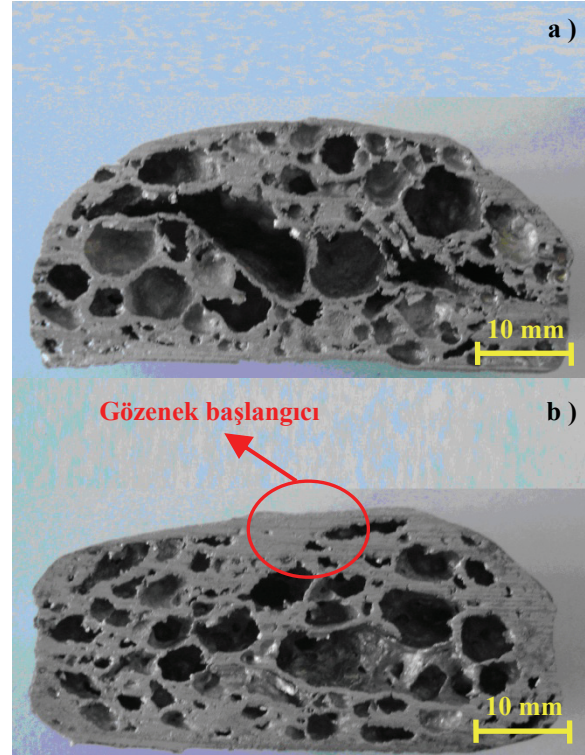
Şekil 3. Matris malzeme içerisindeki Al₂O₃ oranındaki artışa bağlı olarak gözenek boyutundaki değişimin karşılaştırılması.

(Comparison of the pore size depending on the added Al₂O₃ particles amount)

Alumix 231 esaslı kompozit köpüklerin saf Al esaslı kompozit köpüklere göre daha ince gözenek duvar kalınlıklarına ve daha küçük gözenek boyutlarına sahip olduğu Şekil 4 ve 5'te görülmektedir. Bunun sebebinin Alumix 231 içerisinde bulunan alaşım elementlerinden dolayı köpürmenin daha erken başlaması ve gözenek duvarlarına köpürtücü maddeden açığa çıkan hidrojen gazının daha erken etki etmesi olduğu düşünülmektedir. Si ve Mg gibi elementler gözenek duvarlarında oluşan yüzey gerilimine ve köpürme sırasında eriyiğin viskozitesine etki etmektedir [18]. Örnek olarak %1 ve %5 Al₂O₃ takviye elemanı içeren metal matrisli kompozit köpükler seçilmiştir. Şekil 4'a ve 5'a da verilen metalik köpüklere ait resimler makro boyutta karşılaştırıldığında Alumix 231 esaslı köpüklerde saf Al esaslı köpüklere göre gözenek miktarının daha fazla olduğu, gözenek boyutlarının ve dağılımının daha homojen olduğu görülmektedir. Alumix 231 içerisinde var olan silisyumun matris yapının erime noktasını düşürdüğü, köpürme süresini azalttığı ve daha kısa sürede gözenek oluşumuna neden olduğu ve buna bağlı olarak gözenek miktarında artış olduğu düşünülmektedir.



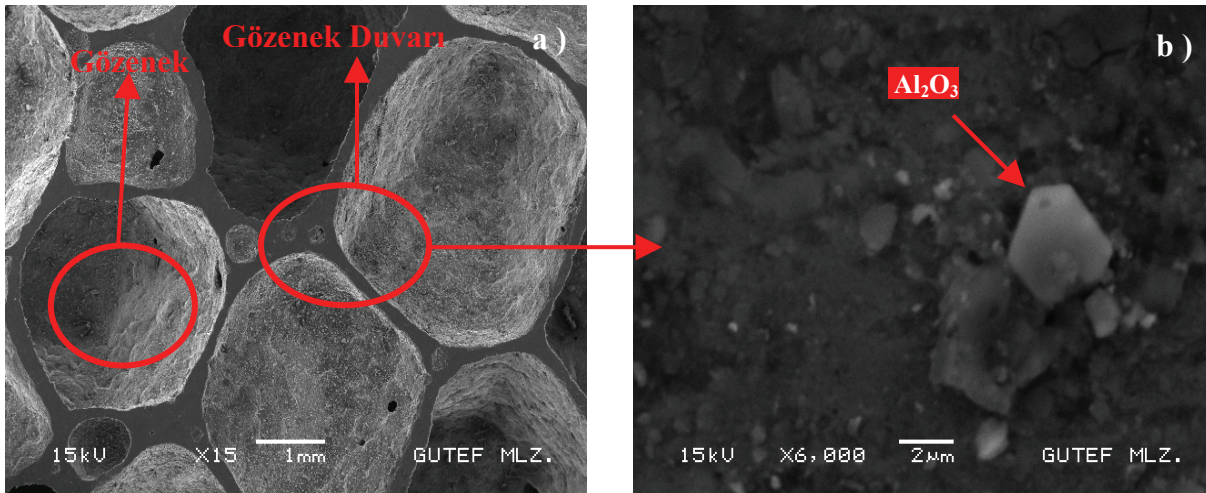
Şekil 4. Alumix 231 esaslı Al₂O₃ takviyeli numuneler;
a) %1 Al₂O₃ b) %5 Al₂O₃
(Alumix 231 based Al₂O₃ reinforced foams)



Şekil 5. Saf Al esaslı Al₂O₃ takviyeli numuneler;
a) %1 Al₂O₃ b) %5 Al₂O₃
(Al₂O₃ reinforced Al based foams)

Şekil 4'b ve 5'b de verilen metalik köpüklere ait resimlere bakıldığında her iki matris malzemesi içerisinde var olan parçacıkların miktarındaki artışa bağlı olarak gözenek sayısında azalma gözenek duvar kalınlıklarında artış gözlenmiştir. Matris yapıları içerisindeki Al₂O₃ parçacık oranındaki artış hücre duvarlarında dayanımı artırıp gözenek oluşumunu geciktirmekte ve hücre duvarlarının dayanımını arttırmaktadır [14].

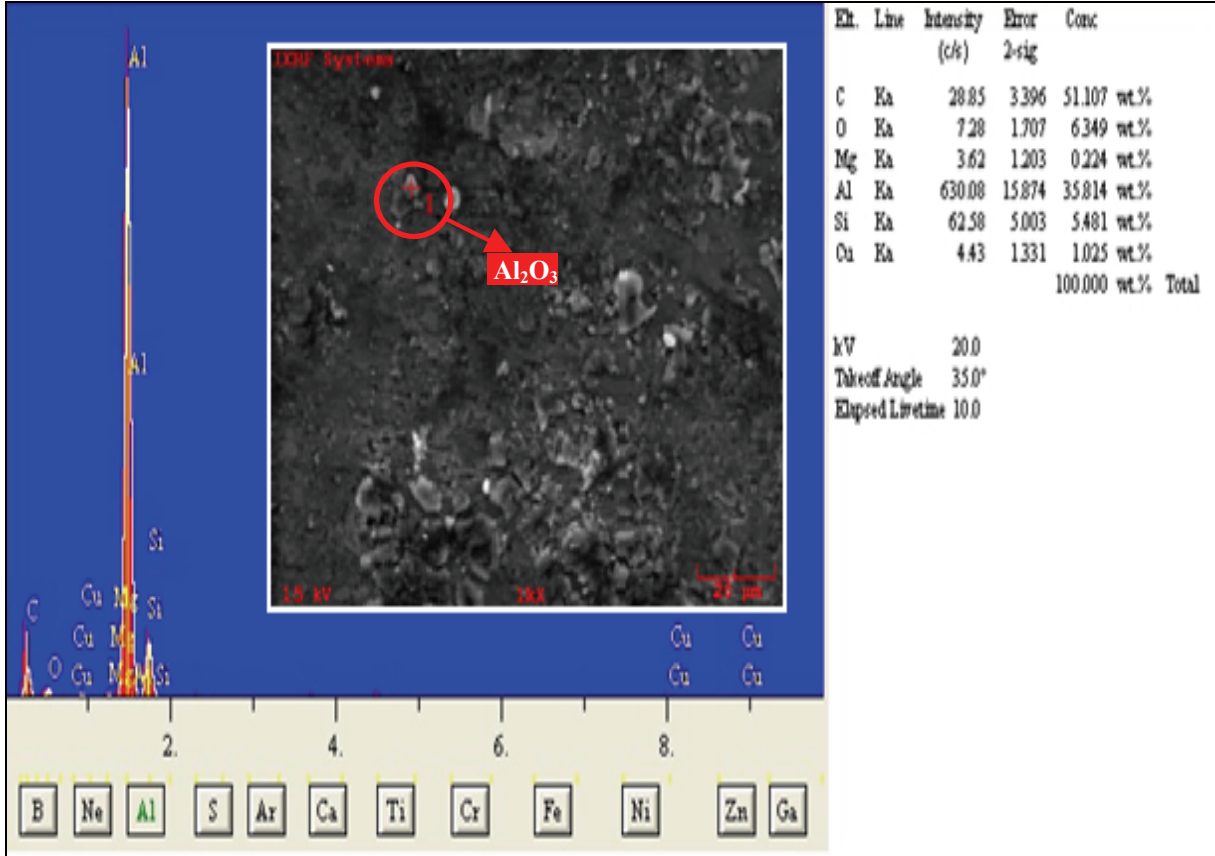
Üretilen köpük numunelerinin SEM görüntüleri ve EDX analiz değerleri Şekil 6,7 ve 8'de görülmektedir. Şekil 6'da Alumix 231 esaslı metal matrisli kompozit köpüklere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6b'ye bakıldığında matris malzemesi ile parçacık arayüzlerinde belirgin mikro boşluk oluşumları gözlenmediğinden matris ile parçacık arasında ıslatma problemi olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 6. Al₂O₃ içeren Alumix 231 esaslı kompozit köpüklerin SEM görüntüleri (SEM pictures of Alumix 231 based Al₂O₃ reinforced composite foams)

a) Gözenek duvarı
(Appearance of pore wall)

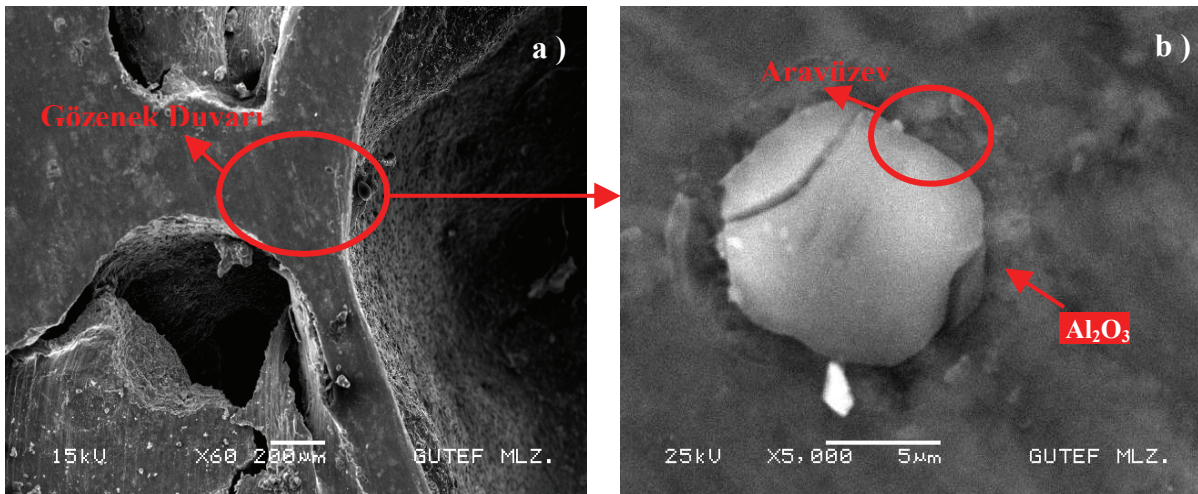
b) Matris içerisinde parçacık dağılımı
(Particles distribution in the matrix)



Şekil 7. Al₂O₃ içeren Alumix 231 esaslı kompozit köpüklerin EDX analiz değerleri (EDX analysis of the Alumix 231 based foams)

Al₂O₃ içeren Alumix 231 esaslı kompozit köpüklerin EDX görüntüleri Şekil 7’de verilmiştir ve SEM resmi üzerinden nokta analizleri yapılmıştır. Ön alaşım Alümix 231 tozu matris malzemesi olarak kullanıldığında yapı içerisinde yüksek oranda Si elementine rastlanmaktadır. Toz metalurjisi yöntemi ile köpük üretiminde matris içerisine ilave edilen en

yaygın alaşım elementlerinden birinin silisyum olduğu bilinmektedir [19]. Si, ötektik noktayı düşürdüğünden düşük sıcaklıklarda ergiyik hale gelen Al ile parçacık ara yüzey uyumu artabilir. Şekil 7’de verilen analiz sonucuna göre gözenek duvarı üzerindeki Al₂O₃ parçacığının varlığını kanıtlayan yüksek oksijenin varlığıdır.



Şekil 8. Al₂O₃ içeren Saf Al esaslı kompozit köpüklerin SEM görüntüleri (SEM pictures of Al₂O₃ particles reinforced Al foams)

a) Gözenek duvarı (Pore wall)

b) Matrise gömülmüş durumda Al₂O₃ parçacığı (Al₂O₃ particles embedded in the matrix)

Şekil 8’de Al esaslı metal matrisli kompozit köpüklere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Elde edilen görüntülerde gözenek duvarı üzerinde var olan Al₂O₃ parçacıkları net olarak tespit edilmiştir. Şekil 8a’ da saf Al esaslı Al₂O₃ takviyeli kompozit köpüğe ait gözenek duvar görüntüsü verilmiştir. Gözenek duvarı üzerinden alınan parçacık görüntüsü incelenmiştir. Parçacıklar matris malzeme yüzeyine kısmen gömülmüş durumdadır. Bu durum parçacık-matris uyumunun iyi olduğunu gösterebilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile saf Al ve Alumix 231 esaslı, Al₂O₃ seramik parçacık takviyeli metal matrisli kompozit köpükler üretilmiştir;

- Matris malzemesi olarak kullanılan saf Al ve ön alaşımlı Alumix 231 tozları ile üretilen numunelerde her iki yapıda da yüksek oranda gözeneğe sahip metalik köpükler elde edilmiştir.
- Yapılan deneyler neticesinde saf Al matrisli yapılar için uygun köpürtme sıcaklığının 710°C, ön alaşımlı Alumix 231 matrisli yapılar için 690°C olduğu tespit edilmiştir. Köpürtme sıcaklıkları arasındaki bu fark matris malzemelerin kimyasal bileşimlerinden kaynaklanmaktadır. Alumix 231 içerisindeki silisyumun varlığının köpürtme sıcaklığının azalmasında etkili olduğu düşünülmektedir.
- Ön alaşımlı Alumix 231 matrisli köpük metallerde elde edilen gözenek yapılarının, saf Al matrisli köpük metallere elde edilen gözenek yapılarına göre daha düzenli ve homojen bir dağılım sergilediği görülmüştür. Ön alaşımlı Alumix 231 tozu içerisinde bulunan %14 oranındaki silisyum ergime sıcaklığını düşürmekte ve gözenek oluşumunun daha erken başlamasına sebep olmaktadır.
- Sabit köpürtme parametrelerinde artan Al₂O₃ parçacık oranına bağlı olarak, özellikle Al matrisli yapı içerisinde gözenek duvarlarında bozulmanın daha az olduğu ve gözenek sayısında azalma olduğu gözlenmiştir.
- Yapı içerisinde düşük oranlarda (%1, %3, %5) var olan Al₂O₃ parçacıkların gözenek oluşumunu engelleyici yönde etki etmediği ancak bu oranın % 7’ye çıkması durumunda gözenek oluşumuna olumsuz yönde etki ettiği söylenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Gui M.C., Wang D.B., Wu J.J., Yuan G.J., Li C.G., “Deformation and damping behaviors of

- foamed Al-Si-SiC_p composite”, **Materials Science and Engineering**, A286:282-288, 2000.
2. Banhart J., “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams”, **Progress in Materials Science**, 46: 559-632, 2001.
3. Feng Y., Zheng H., Zhu Z., Zu F., “The Microstructure and electrical conductivity of aluminium alloy foams”, **Material Chemistry and Physics**, 78: 196-201, 2002.
4. Banhart J., “Aluminium Foams: On the Road to Real Applications”, **Materials Research Society Bulletin**, 290-295, 2003.
5. Hanssen, A.G., Langseth, M., Hopperstad, O.S., “Optimum design for energy absorption of square aluminium columns with aluminium foam filler”, **International Journal of Mechanical Sciences**, 43:153-158, 2001.
6. Song, H.W., Fan, Z.H., Yu, G., Wang, Q.C., “Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections”, **International Journal of Solids and Structures**, 42:2575 – 2583, 2005.
7. Crupi, V., Montanini, R., “Aluminium foam sandwiches collapse modes under static and dynamic three-point bending”, **International Journal of Impact Engineering**, 34:509-517, 2007.
8. Seitzberger, M., Rammerstorger, F.G., Degischer, H.P., “Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam”, **Acta Mechanica**, 125: 95-103, 1997.
9. Bostan, B., “Mekanik alaşımlama ve ekstrüzyon sonrası Al₄C₃ oluşumunun incelenmesi”, **J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.**, Vol 23, No 2, 343-348, 2008.
10. Hanssen A.G., Langseth, M., Hopperstad, O.S., “Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler”, **Int. J. of Impact Eng.**, 24 (5): 475-507, 2000.
11. Amjad, S., “Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams”, **Adisertation submitted for the degree of Master of Philosophy in Materials Modelling at the University of Cambridge**, 3-7, 2001.
12. Çinici H., Türker M., “TM Yöntemi İle Üretilen Alüminyum Esaslı Metalik Köpüğe Deformasyon Miktarının Etkilerinin Araştırılması”, **13. Uluslar arası Metalürji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul – Türkiye, 854-860, 2006.
13. Babcsán N., Leitmeier D., Degischer H.P., “Foamability of Particle Reinforced Aluminum Melt”, **Mat.-wiss. u. Werkstofftech.**, 34: 22-29, 2003.

14. Liu, J., Yu, S., Zhu, X., Wei, M., Li, S., Luo, Y., Liu, Y., "Effect of Al₂O₃ short fiber on the compressive properties of Zn-22Al foams", **Materials Letters**, 62:3636-3638, 2008.
15. Haesche, M., Weise, J., Moreno, F., Banhart, J., "Influence of particle additions on the foaming behaviour of AlSi 11/ TiH₂ composites made by semi-solid processing", **Materials Science Engineering A**, 480:283-288, 2008.
16. Uzun, A., Gökmen, U., Türker, M., "Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen Alüminyum Esaslı Metalik Köpükte Si İlavesinin Köpürmeye Etkisi", **5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)**, 1003-1006, Karabük, Turkey, 2009.
17. Helwing, H. M., Hiller, S., Garcia-Moreno, F., Banhart, J., "Influence of Compaction Conditions on the Foamability of AlSi8Mg4 Alloy", **Metallurgical and Materials Transactions B**, Volume 40, Number 5, 755-767, 2009.
18. Kim, H.Y., Park, S.Y., Hur, B.Y., Lee, S.W., "Rheology Characteristics of Al-Si Alloy and Mg Alloy for Metal Foam Manufacturing", **Materials Science Forum**, 464-467, 2005.
19. Esmaealzadeh, S., Simchi, A., "Foamability and compressive properties of AlSi7-3 vol.% SiC-0.5 wt.% TiH₂ powder compact", **Materials Letters**, 62:1561-1564, 2008.