

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kompozit Metal Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Mak. Müh. Pınar Aydan DEMİRHAN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd.Doç.Dr. Vedat TAŞKIN

İkinci Danışman : Yrd.Doç.Dr. Nilhan Ürkmez TAŞKIN

2010
EDİRNE

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kompozit Metal Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Mak. Müh. Pınar Aydan DEMİRHAN

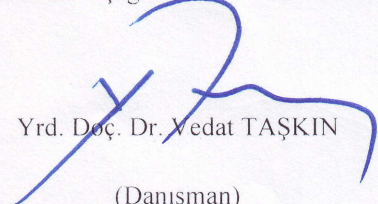
Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı


Danışman : Yrd. Doç. Dr. Vedat TAŞKIN

İkinci Danışman : Yrd.Doç.Dr. Nilhan Ürkmez TAŞKIN

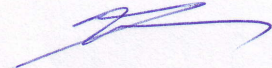
Bu tez 02 /09/2010 tarihinde Aşağıdaki Jüri Tarafından Kabul Edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr. Vedat TAŞKIN

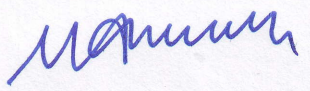
(Danışman)


Yrd. Doç. Dr. Nilhan Ürkmez TAŞKIN

(İkinci Danışman)


Prof. Mehmet Emin YURCI

(Jüri Üyesi)


Doç. Dr. Metin AYDOĞDU

(Jüri Üyesi)

ÖZET

Bu çalışmada, farklı oranlarda SiCp takviyesi içeren EN AW-5083 alüminyum alaşımına köpük yapıcı tozlar eklenerek kapalı hücreli kompozit metal köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Takviye oranı ve takviye boyutundaki değişimin kompozit metal köpüğün basma özellikleri ve köpürme davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Takviye oranının artması ile birlikte metal köpük malzemenin yoğunluğu azalmış, lineer genleşme miktarı artmıştır. Takviye oranının artması ve takviye boyutunun düşmesiyle gözenek boyutlarının küçüldüğü, gözeneklerin daha düzgün bir dağılıma sahip olduğu gözlenmiştir. Aynı bağıl yoğunluğa sahip kompozit köpüklerde takviye oranındaki artışla birlikte plato gerilmesi ve enerji sönmüleme oranında artış olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kompozit metal köpük, kapalı hücre, basma dayanımı

ABSTRACT

In this thesis, closed cell composite metal foam were fabricated from EN AW-5083 aluminum alloy with reinforced by different fraction of SiCp using a blowing agent. The effect of size and fraction of SiCp on the foaming and compressive behavior of composite metal foam were investigated. Linear expansion and density of metal foam declined with increasing fraction of SiCp. With increasing fraction of reinforcement and decreasing size of the SiC particle, pore size is become smaller and more uniform distribution of pores have been observed. Compare to the same relative density of composite foam, plateau stress and energy absorption increased with increasing fraction of SiCp.

Keywords: Composite metallic foam, closed cell, compressive strength

ÖNSÖZ

Eğitimim boyunca bana yol gösteren, bilgi ve tecrübelerini hoşgörüyü sunan, çalışmalarımın her aşamasında yanımda olan, değerli hocalarım Yrd.Doç.Dr. Vedat TAŞKIN ve Yrd.Doç.Dr Nilhan Ürkmez TAŞKIN'a bana inandıkları ve hep yanımda oldukları için;

Değerli hocam Doç Dr. Metin AYDOĞDU'ya tecrübe ve görüşleriyle beni yönlendirdiği için,

Çalışma arkadaşım İsmail MUTLU'ya çalışmalarım boyunca her konuda beni desteklediği ve yardımlarını esirgemediği için,

Tüm çalışma arkadaşlarıma, manevi destekleriyle yanımda oldukları için,

Aileme, tüm eğitimim boyunca desteklerini hissettirdikleri için,

Hayat arkadaşım Tolga DEMİRHAN'a sonsuz sabrı ve desteği ile beni bugünlere ulaştırdığı için,

Sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum...

Bu tez TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı tarafından 108M325 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
SİMGE LİSTESİ.....	x
1.GİRİŞ	1
2.KOMPOZİT METAL KÖPÜK MALZEMELER	3
2.1 Metal Köpük Malzemeler	3
2.2 Metal Köpük Malzeme Üretim Yöntemleri	4
2.2.1 Sıvı metal köpük üretimi.....	5
2.2.1.1 Gaz enjeksiyonu ile ergiyik köpük üretimi	5
2.2.1.2 Köpürtücü ajan kullanarak ergiyik köpük üretimi	6
2.2.1.3 Katı-gaz ötektik katılaştırma	8
2.2.2 Katı metal köpük üretimi	9
2.2.2.2. Thikso- döküm ile prekürsör köpük üretimi	10
2.2.2.3. Köpürtücü ajan içeren külçelerden köpük üretimi	12
2.2.2.4. Köpürme sırasında gaz üretimi ile köpük üretimi.....	13
2.2.2.5. Yanma reaksiyonu ile köpük üretimi	13
2.3.Kompozit Metal Köpük Malzemelerin Kullanım Alanları	13
2.4 Kompozit Metal Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	18
3.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	25
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	30
4.1.Kompozit Metal Köpük Üretimi	30
4.1.1 Malzeme Seçimi.....	30
4.1.2 Deney Düzenegi	33
4.1.3 Kalıplar.....	35
4.1.4 Köpük üretimi	35
4.1.5 Numune hazırlama	39
4.2. Karakterizasyon.....	39
4.2.1 Yoğunluk tespiti	39
4.2.2 Basma deneyleri	40
4.2.2 Mikro yapı analizleri	40
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	41
5.1 Yoğunluk, Hücre Boyutu ve Dağılımı	41
5.2 Mikro Yapı ve Görüntü Analizi	47

5.3 Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi.....	59
6.SONUÇLAR	62
7.KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Açık ve kapalı hücreli metal köpük	3
Şekil 2.2 Ergiyiğe gaz enjeksiyonu ile direk köpürtme	5
Şekil 2.3 Köpürtücü ajan kullanarak ergiyikten köpük üretimi	7
Şekil 2.4 Katı-gaz ötektik katılaştırma süreci	9
Şekil 2.5 Tikso-döküm işlem aşamaları	11
Şekil 2.6 Otomobiller için köpük dolgulu motor montaj kelepçesi prototipleri	14
Şekil 2.7 Alüminyum köpük sandviçlerden üretilmiş prototip roket başlığı	17
Şekil 2.8 Alüminyum sandviç paneller kullanılarak üretilmiş konsept otomobil	17
Şekil 2.9. Metal köpük malzemeler için gerilme genleme diyagramı.....	20
Şekil 4.1 Ergitme fırını karakteristik sıcaklık eğrisi	33
Şekil 4.2 Deney düzeneği.....	34
Şekil 4.3 Gaz beton kalıp	35
Şekil 4.4 AlMg4.5Mn0.7 yarı katı sıcaklık aralığı.....	36
Şekil 4.5 Kompozit metal köpük üretim aşamaları	37
Şekil 4.6 Üretilen kompozit metal köpük malzemeler	38
Şekil 4.7 Basma numuneleri	39
Şekil 4.8 Basma deney düzeneği.....	40
Şekil 5.1 Takviye oranı – yoğunluk değişimi	41
Şekil 5.2 Takviye oranı - gözeneklilik değişimi	41
Şekil 5.3 Farklı köpürme süreleri ile üretilen %10 takviyeli kompozit metal köpük	42
Şekil 5.4 Farklı oranlarda SiCp (12µm) takviye ile üretilmiş köpükler.....	43
Şekil 5.5 Farklı oranlarda SiCp (1µm) takviye ile üretilmiş köpükler.....	43
Şekil 5.6 Takviyesiz AlMg4.5Mn0.7	44
Şekil 5.7 %5 SiCp(1µm) takviyeli	44
Şekil 5.8 %5 SiCp(12µm) takviyeli	44
Şekil 5.9 %10 SiCp(1µm) takviyeli	45
Şekil 5.10 %10 SiCp(12µm) takviyeli	45
Şekil 5.11 %15 SiCp(1µm) takviyeli	45
Şekil 5.12 %15 SiCp(12µm) takviyeli	45
Şekil 5.13 %20 SiCp(12µm) takviyeli	46
Şekil 5.14 AlMg4.5Mn0.7 alüminyum köpük	47
Şekil 5.15 Ağırlıkça %10 SiCp (12µm) takviyeli kompozit metal köpük	48
Şekil 5.16 Ağırlıkça %15 SiCp (12µm) takviyeli kompozit metal köpük	49
Şekil 5.17 Ağırlıkça %20 SiCp (12µm) takviyeli kompozit metal köpük	50
Şekil 5.18 Ağırlıkça %10 SiCp (1µm) takviyeli kompozit metal köpük	51
Şekil 5.19 Ağırlıkça %15 SiCp (1µm) takviyeli kompozit metal köpük	52
Şekil 5.20 Takviyesiz AlMg4.5Mn0.7 alüminyum köpüğün EDS analiz sonuçları.....	53
Şekil 5.21 Ağırlıkça %15 takviyeli kompozit köpüğün EDS analiz sonuçları.....	54
Şekil 5.22 Ağırlıkça %20 takviyeli kompozit köpüğün EDS analiz sonuçları	55
Şekil 5.23 Takviyesiz köpük mikro yapı görüntüsü.....	56
Şekil 5.24 12µm % 10 SiCp takviyeli köpük mikro yapı görüntüsü	56
Şekil 5.25 12µm % 15 SiCp takviyeli köpük mikro yapı görüntüsü	56

Şekil 5.26 12µm % 20 SiCp takviyeli köpük mikro yapı görüntüsü	56
Şekil 5.27 1µm % 10 SiCp takviyeli köpük mikro yapı görüntüsü	56
Şekil 5.28 1µm % 15 SiCp takviyeli köpük mikro yapı görüntüsü	56
Şekil 5.29 Takviyesiz alüminyum köpük gerilme-genleme diyagramı	57
Şekil 5.30 %5 SiCp (12µm) takviyeli kompozit köpük gerilme-genleme diyagramı.....	58
Şekil 5.31 %20 SiCp (12µm) takviyeli kompozit köpük gerilme-genleme diyagramı..	58
Şekil 5.32 %5 SiCp (1µm) takviyeli kompozit köpük gerilme-genleme diyagramı.....	59
Şekil 5.33 %15 SiCp (1µm) takviyeli kompozit köpük gerilme-genleme diyagramı.....	59
Şekil 5.34 %20 ve %15 SiCp (12µm) takviyeli köpük gerilme-genleme diyagramı.....	60
Şekil 5.35 %5, %10 ve %15 SiCp (1µm) takviyeli köpük gerilme-genleme diyagramı.	60
Şekil 5.36 %40 Şekil değişimine kadar sönmölen enerji	61

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1 Kapalı Hücreli Köpükler İçin Formüller	24
Tablo 4.1 AlMg _{4.5} Mn _{0.7} Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri.....	30
Tablo 4.2 AlMg _{4.5} Mn _{0.7} Alüminyum Alaşımın Kimyasal Kompozisyon Limitleri	30
Tablo 4.3 AlMg _{4.5} Mn _{0.7} Alaşımının Fiziksel Özellikleri.....	31
Tablo 4.4 SiCp Boyut Dağılımı	32
Tablo 4.5 SiCp Kimyasal Bileşimi	32
Tablo 4.6 TiH ₂ Fiziksel Özellikleri.....	32
Tablo 4.7 TiH ₂ Kimyasal Bileşimi.....	32
Tablo 4.8 Deney Matrisi	38

SİMGE LİSTESİ

ρ_f	Metal köpük malzemenin yoğunluğu
ρ_s	Katı metalin yoğunluğu
P_f	Gözeneklerin hacimsel oranı
E^*	Metal köpük malzemenin elastiklik modülü
E_s	Metal malzemenin elastiklik modülü
C_x	Hücre geometrisi ile ilgili sabitler
σ_{pl}	Plato gerilmesi
σ_{ys}	Metal malzemenin akma dayanımı
τ_{pl}^*	Metal köpük malzemenin kayma gerilmesi
σ_t	Çekme dayanımı
H	Sertlik
ν	Poisson oranı

1.GİRİŞ

Metal köpük malzemeler, düşük ağırlıkla yüksek dayanımın birleşmesi veya yüksek gaz geçirgenliği ile yüksek termal iletkenliğin bir arada olması gibi fiziksel ve mekanik özelliklerin ilgi çekici kombinasyonlarına sahip olmalarıyla bilinirler. Bu nedenle köpük metallere olan ilgi son yıllarda oldukça artmıştır.(Banhart, 2001)

Yüksek oranda gözenekliliğe sahip metal köpük malzemeler çeşitli mühendislik uygulamaları için yeni bir malzeme sınıfı olmuş ve faydalı özellikleri ile dikkat çekmiştir. Gözenekli metal yapılar için pek çok mevcut uygulamanın yanı sıra kimyasal süreçler için ısı değiştirgeci veya filtre olarak kullanılmaları ya da otomotiv uygulamalarında darbe enerji sönümleyicisi olarak kullanılmaları gibi yeni uygulama fikirleri de oluşmaktadır. Metal köpük malzemelerin özellikleri ses ve ısı yalıtımında, hafif yapılarda veya enerji sönümlenme gibi diğer alanlarda da kullanılmalarına uygundur. Hücreli metalik malzemeleri değerli kılan en önemli özellikleri hafif yapıları, nispeten yüksek dayanımları ve kendine özgü lineer olmayan deformasyon davranışlarıdır. (Yu vd., 1997) Köpük metal malzemeler polimer köpük ve ağaçların kullanılmadığı özel ortam ve sıcaklıklar gerektiren mühendislik uygulamaları için olağanüstü avantajlar sunarlar. (Song vd., 2007)

Metal köpük malzemelerle ilgili çalışmalar 1940'lı yılların sonlarına doğru başlamıştır. 1948'de Benjamin Sosnick alüminyum, civa ile köpürtmeyi denemiştir. Önce yüksek basınç altında kapalı bir hacimde alüminyum ve civa karışımını ergitmiştir. Basınç kaldırıldığında alüminyumun ergime sıcaklığında civa buharlaşmaya başlamış ve köpük oluşmuştur. 1950'li yıllarda daha az riskli yöntemler geliştirilmiştir. Ergiyiği oksitlendirme veya katı parçacıklar ilave etme gibi ön işlemlerle sıvı metalin özellikleri değiştirildiğinde daha kolay köpük oluşturduğu fark edilmiştir. William Elliott, 1950'lerde Bjorksten Research Laboratories (BRL)'de bir alüminyum köpürtme prosesi geliştirmiştir. BRL daha sonraki yıllarda kurşun ve çinko gibi metaller için köpürtme metotları üzerinde çalışmıştır. O yıllarda kullanılan iki metottan birincisi, sürekli gaz enjeksiyonu diğeri ise bir karıştırıcı yardımıyla ergiyiğe gaz salınmasıdır. Bu

yöntemler günümüzde hala kullanılmaktadır. Alüminyumun metal köpük üretimi için daha elverişli bir malzeme olduğu anlaşılmıştır. The Ethyl Corporation, Ford Motor Company için yüksek kalitede metal köpük malzemeler üretmiş ancak başlangıçta çok tutulmamıştır. O dönemde sınırsız gibi görünen enerji kaynakları, güvenlik ve geri dönüşüm konuları günümüzdeki kadar önemsenmediğinden hafif malzeme kullanımına gerek duyulmamıştır. Bu sebeple 1975 yılından sonra köpük metal geliştirme faaliyetleri giderek azalmıştır. (Babcsan vd., 2006)

1980'lerin sonlarına doğru metal köpük araştırmaları yeniden popüler bir konu haline gelmiştir. Japon mühendisler şimdilerde Alporas süreci olarak bilinen yöntemi geliştirmişlerdir. Norveç'ten Norsk Hydro ve Kanada'dan Alcan Corp. birbirlerinden bağımsız olarak parçacık-stabilize ergiyik prosesini geliştirmişlerdir. 1950'lerde Benjamin Allen tarafından geliştirilen toz metalurjisi köpürtme yöntemi 1990'larda yeniden keşfedilmiş ve Alman Fraunhofer Laboratuvarı'nda oldukça kapsamlı bir hale getirilmiştir. Günümüzde tüm bu yöntemlerin geliştirilmesine devam edilmektedir. (Babcsan vd., 2006)

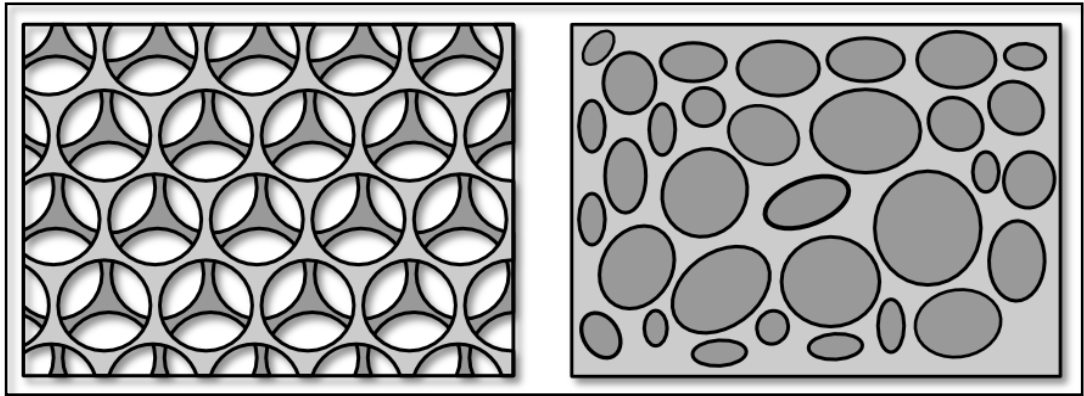
Bugün alüminyum köpük üreten az sayıda firma vardır. Piyasa hala çok küçük olmasına rağmen yavaş yavaş genişlemeye başlamıştır. Köpük özelliklerini geliştirmek ve ürün süreçlerini daha güvenilir hale getirmek için bilimsel çalışmalara devam edilmektedir. Bunun için köpük stabilizasyonunun iyi bilinmesi kaçınılmazdır. Ne yazık ki metal köpürtmenin fiziği üzerine araştırmalar oldukça sınırlıdır. (Babcsan vd., 2006)

Bu çalışmada, giderek önemi artan kompozit metal köpük malzemelerin takviye oranı ve takviye boyutundaki değişimin mekanik özellikler ve köpürme davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmaktadır. AlMg4.5Mn0.7 alüminyum alaşımı ağırlıkça farklı oranlarda ve parçacık boyutlarında SiCp ile takviye edilmiş ağırlıkça %0.5 TiH₂ köpürtücü ajan olarak kullanılmıştır. Üretilen kompozit metal köpük malzemenin basma özelliklerindeki değişim incelenmiş ve elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır.

2.KOMPOZİT METAL KÖPÜK MALZEMELER

2.1 Metal Köpük Malzemeler

Hücreli yapılar, etrafı katı veya sıvı malzeme ile çevrenmiş içi gaz dolu gözenekler içerirler. Gözenekler birbirleriyle bağlantılı ya da tamamen birbirlerinden yalıtılmış halde olabilir. Gözenekler arasındaki boşlukların birbirleriyle bağlantılı olduğu köpük yapısına açık hücreli köpük, gözenekler arasında temasın olmadığı köpük yapısına ise kapalı hücreli köpük denir. Şekil 2.1’de açık ve kapalı gözenekli metal köpük görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.1 Açık (solda) ve kapalı (sağda) hücreli metal köpük

Köpük teriminin özgün anlamı sıvı içine dağılmış gaz baloncuklarıdır. Bu tip köpüklerin morfolojileri sıvıyı katılaştırarak korunabilir. Metalik köpükten bahsedildiğinde genel anlamda katı köpükten bahsedilir. Katı köpük genel olarak hücreli katılar olarak adlandırılan malzemelerin özel bir türüdür. Sıvı metal köpük yalnızca malzemenin üretiminde ortaya çıkan bir safhadır. Fakat hücreli katıların sıvı fazda üretilmesi zorunlu değildir, farklı yöntemler kullanılarak farklı köpük morfolojileri elde edilebilir. (Banhart, 2001)

Literatürde ve pratik kullanımda metal köpük teriminin kullanılmasında bir karmaşa söz konusudur. Terim metal köpük ve benzeri yapıları tanımlamada oldukça genel bir kullanıma sahiptir.

Hücreli metallere, içinde dağılmış çeşitli boyutlarda gaz boşlukları içeren metallere verilen genel isimdir.

Gözenekli metallere, genellikle yuvarlak ve birbirinden yalıtılmış gözeneklere sahip hücreli metallere verilen addır. Gözeneklilik %70'den azdır ve mekanik olarak gözeneklerin birbirleriyle etkileşimde olmaması için gözenekliliğin %20'den az olması gerekir.

Metal köpükler, hücreli metallere özel bir sınıftır, metal köpük ismi verilirken sıvı metal köpüklerden esinlenilmiştir. Genellikle çok yüzlü hücrelere sahiptirler, hücre şekilleri değişiklik gösterir.

Metal süngerler, genellikle birbirleriyle bağlantılı boşluklar içeren özel bir morfolojiye sahip hücreli metallere aittir. Bazı açık hücreli metalik yapılar için metal köpük yerine metal sünger ifadesini kullanmak tercih edilir. (Banhart, 2000; Babcsan vd., 2003)

2.2 Köpük Malzeme Üretim Yöntemleri

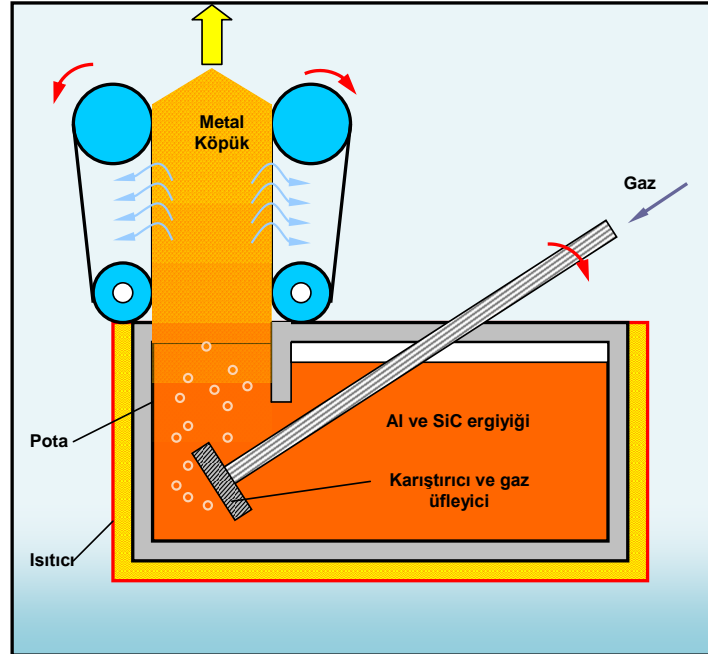
Katı hal ve sıvı hal, metal köpük üretiminde iki temel yöntem tipidir. Genelde katı halden köpürtme toz metalürjisi süreci ile başarılmıştır. Katı halden köpürtme yöntemiyle çok çeşitli metalik köpükler üretilir. Sıvı halden köpürtme ile karşılaştırıldığında bu yöntemin kontrolü daha kolaydır ancak takviye tozları için kullanılan ekipman ve toz malzeme maliyeti arttırır. (Song vd., 2007)

Ergiyik metal köpürtme için bilinen üç yol vardır: sıvı metal içine gaz enjekte etme, ergiyik metale gaz salan köpürtücü ajan ekleyerek sıvı içine gaz salma, sıvı içinde çözünmüş olan gazdan köpük elde etme. (Babcsan vd., 2003)

2.2.1 Sıvı metal köpük üretimi

2.2.1.1 Ergiyiğe gaz enjeksiyonu ile köpük üretme

Alüminyum ve alaşımlarından köpük metal elde etmekte kullanılan bu yöntem Cymat Aluminium Corp. Firması tarafından kullanılmaktadır. Silisyum karbür, alüminyum oksit veya magnezyum oksit parçacıkları ergiyiğin viskozitesini arttırmak ve köpük özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Takviye parçacıklarının hacimsel oranı %10-20 arasında değişirken parçacık boyutu 5-20 μm arasındadır. Ergiyik, gaz enjeksiyonu ile köpürtülür. Kullanılan gaz genellikle hava, argon veya nitrojendir. Ergiyik içinde gaz üretmek ve gözeneklerin düzenli dağılımını sağlamak için özel tasarlanmış pervaneler veya titreşimli enjektörler kullanılır. Sonuçta oluşan viskoz gaz ve ergiyik karışımı sıvının yüzeyine doğru ilerler düzgün sıvı köpüğe dönüşür, sıvı metal drenajları kaybolur. Malzeme soğutulur katılaştırılır. (Babcsan vd., 2003)



Şekil 2.2 Ergiyiğe gaz enjeksiyonu ile direk köpürtme (Wadley, 2002)

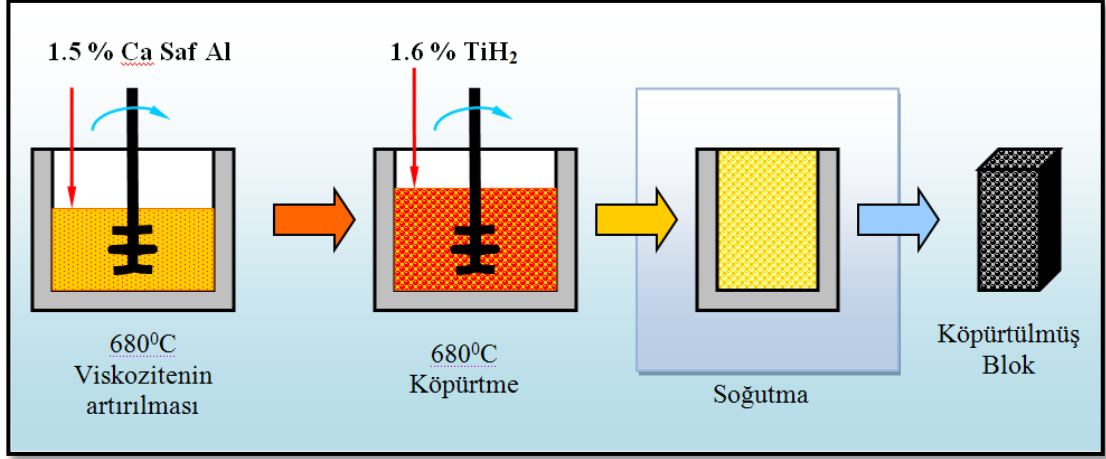
Enjekte edilen hava, kabarcıkların ergiyik yüzeyine doğru yükselmesine neden olur, hücre duvarlarının ara yüzelerindeki katı seramik parçacıklarının varlığı sıvı köpük oluşumunu stabilize eder. Dengelenmiş sıvı köpük mekanik olarak ergiyik yüzeyine taşınır ve soğutularak katı köpük oluşumu sağlanır. Alüminyum köpük üretimi için geliştirilen teknolojilerle, araştırmacılar köpüğün mekanik ve fiziksel özelliklerinin hücre duvar malzemesi ve köpük içindeki hacimsel katı oranının yanı sıra hücre geometrisinden de büyük oranda etkilendiğini tespit etmişlerdir. Hava enjeksiyonu ile alüminyum köpük üretiminde, köpürtme odası boyutları ve şekli, katı parçacıkların büyüklüğü ve hacimsel oranı, köpürme sıcaklığı, hava enjeksiyon hızı, pervane hızı ve dizaynı gibi süreç değişkenleri ile hücre boyutları ve duvar kalınlıkları kontrol edilirler. (Deqing vd., 2006)

Köpürtülen malzeme kapalı dış yüzeye sahiptir ancak istenen şekli elde etmek için köpürtme işleminden sonra şekillendirilebilir. Yüksek oranda seramik parçacık içermesinden dolayı bu tür köpüklerin işlenmesi problemlidir. Direk köpürtme yönteminin avantajı büyük hacimlerde köpüğün sürekli olarak üretilebilmesi ve düşük yoğunluklar elde edilebilmesidir. (Banhart, 2005)

2.2.1.2 Köpürtücü ajan kullanarak ergiyikten köpük üretimi

Direk ergiyik köpürtme için kullanılan bir diğer yöntem ergiyiğe köpürtücü ajan eklemektir. Köpürtücü ajan ısı etkisi altında çözünür ve gaz salar. Shinko Wire Co. (ALPORAS) şirketi 1986'dan bu yana bu yöntemle günde 1000kg köpük malzeme üretmektedir. (Banhart, 2005)

Üretimin ilk aşamasında 680 °C alüminyum ergiyiği içine %1.5 kalsiyum ilave edilir. Ergiyik birkaç dakika karıştırılarak oksit oluşumu sağlanır. Daha sonra köpürtücü ajan işlevi görecektir ve hidrojen gazı salımını gerçekleştirecek olan TiH₂ %1.6 oranında ergiyiğe eklenir. Ergiyik yavaşça genişlemeye başlar ve köpürme işlemi 15 dakikada tamamlanır. Soğutma işleminden sonra elde edilen katı köpük ikincil işlemler için kalıptan çıkarılır. (Babcsan vd., 2003)



Şekil 2.3 Köpürtücü ajan kullanarak ergiyikten köpük üretimi (Banhart, 2001)

TiH₂ yerine köpürtücü ajan olarak CaCO₃ kullanılabilir, gözenek boyutları daha küçük olmakla birlikte TiH₂ ile elde edilen yoğunluğa benzer sonuçlar elde edilir. (Babcsan vd., 2003)

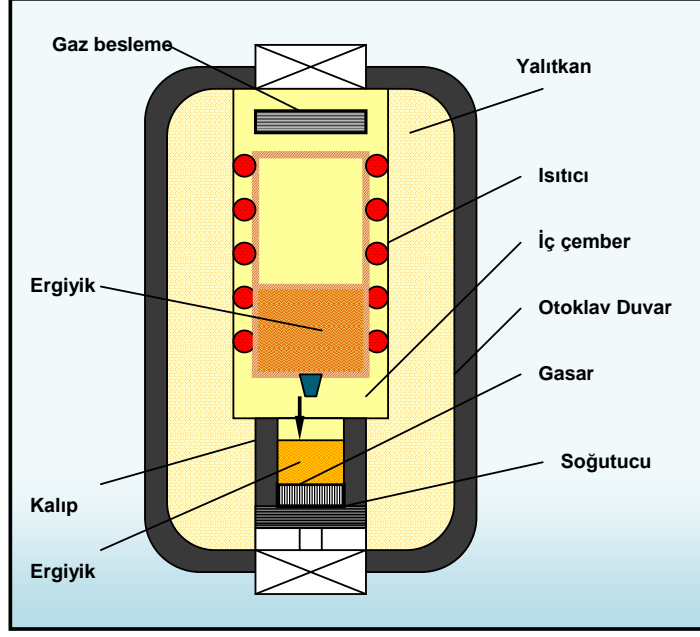
Ergiyik köpürtme yönteminde ergiyik alüminyum alaşımını köpük oluşumuna uygun hale getirmek için genellikle ağırlıkça %10-30 SiC gibi seramik parçacıklar veya Al₂O₃ eklenir. Bu koşullandırılmış ergiyiğe gaz püskürterek oldukça düzgün dağılıma sahip köpükler üretilebilir fakat sert parçacıkların bulunması işleme ve geri dönüşümde önemli zorluklara sebep olur. (Haesche vd., 2007)

Alüminyum köpük, viskozitesi artırılmış alüminyum ergiyiğe köpürtücü ajan eklenerek de üretilebilir. Alüminyum matris malzemesi içine, ergiyiğin viskozitesini kontrol etmek için saf kalsiyum eklenir, köpürtücü ajan olarak TiH₂ tozları kullanılabilir. Saf alüminyum 700°C ye ısıtılarak ergitilir, ergiyiğe saf kalsiyum eklenerek viskoz hale gelene kadar sabit hızla karıştırılır. Viskozite kritik değere ulaştığında köpürtücü ajan eklenir. Ergiyik yüksek hızda karıştırılarak tozların homojen dağılımı sağlanır. Karışım fırın içinde tutularak köpürtücü ajanların ayrışması sağlanır. Bu aşamada ergiyik içindeki baloncuklar hücresel yapı oluşana kadar büyümeye devam eder. Köpürme tamamlanınca ergiyik fırından dışarı alınır ve soğutularak katılaştırılır. (Song vd., 2001)

Köpürme süreci genellikle gözenek boyutu ve hacimsel yüzdesine göre üç periyoda (gaz emülsiyonu, kuru periyot ve yaş periyot) ayrılır. Gaz emülsiyon periyodunda ergiyikteki gözeneklerin hacmi ve boyutları küçüktür. Bu periyot köpürmenin başlangıcında görülür. Yaş periyotta ergiyik içindeki gözenekler daha büyüktür ve köpük makro boyutta gelişir. Gaz belirgin bir hacimsel oranı kaplar. Yaş köpükte hücreler yaklaşık olarak küreseldir ve rastgele dizilimlerle birbirlerini sararlar. Bu pozisyonları kolaylıkla bozulabilir çünkü büyük miktarda sıvı içerik hücreler arasında tampon görevi görür. Kuru periyoda genellikle gözenek yüzeyleri yeterince genişlettikten sonra ulaşılır. Kuru periyot boyunca köpük hücresel bir yapı sergiler. Yapı zamanla zayıflamaya başlar. Karıştırmada küçük bir değişiklik, köpürtücü ajanın bozunması, gözenek gelişimi, gözenek parçalanması, gözenek birleşmesi ve/veya sıcaklık dalgalanması bu yapıyı değiştirebilir veya tamamen çökertebilir. Bu sebepten köpürtme deneyleri her zaman tekrarlanabilir değildir. Diğer taraftan köpürtücü ajandan gelen gazın gelişimi ergiyik içinde köpük yapı oluşumunu geliştirir ve çökmeyi önler. Bu nedenle ergiyiğin köpürmesi süresince kuru köpük periyodunda yapı dağılımı dikkate alınmalıdır. Kuru periyot alüminyum köpüğün son yapısı için çok önemlidir. Alüminyum köpük üretiminin tipik gereksinimlerinden biri yeterli hacimsel gaz oranı iken bir diğeri de homojen hücresel yapıdır. Bu iki gereksinim köpürtme sürecinde, özellikle de kuru periyotta bir çelişki yaratmaktadır. Bu nedenle kuru periyotta gözenek oluşum sürecinin iyi algılanması, köpüğün çökmesini ve kaymasını önlemek için köpürtücü ajan tamamen tükenmeden soğutma sürecinin bitirilmesi gereklidir. (Song vd., 2007)

2.2.1.3 Katı-gaz ötektik katılaştırma

Yaklaşık 15 yıl önce geliştirilen metot sıvı ve katı metalde gaz çözünübilirliğinin farkını ortaya koyar. Önce ergiyik yüksek basınç altında gazla (hidrojen/azot) yüklenir. Sıcaklık metalin ergime noktasının altına indiğinde gaz yoğunlaşır. Elverişli koşullar altında gaz baloncukları metalin içine hapsolür. Gözenek morfolojisi; gaz içeriği, ergiyik üzerindeki basınç, ısının yönü, oranı ve ergiyiğin kimyasal bileşimi ile büyük



Şekil 2.4 Katı-gaz ötektik katılaştırma süreci (Banhart, 2001)

oranda belirlenmiştir. Genellikle uzamış gözenekler katılaşma yönünde dizilim oluşturur. Gözenek çapı $10\mu\text{m}$ - 10mm , gözenek boyu $100\mu\text{m}$ - 300mm ve gözeneklilik %5-75 arasında değişmektedir. (Babcsan vd., 2003)

2.2.2 Katı metal köpük üretimi

2.2.2.1. Toz sıkıştırma ile köpük üretimi

Toz metalürjisi ile kapalı hücre metal köpük üretim yönteminde metal tozları ile köpürtücü ajan tozları karıştırılarak sıcak presleme, ekstrüzyon veya toz haddeleme ile sıkıştırılır ve yoğun bir yarı bitmiş ürün haline getirilir. Hazırlanan bu malzeme ergime noktasının üstünde bir sıcaklığa ısıtılarak genişletilir. Isıtma sürecinde metal yarı sıvı ve viskoz bir hale gelir ve köpürtücü ajan anlık olarak çözünür, serbest kalan gaz yüksek oranda gözenek içeren bir yapı oluşmasını sağlar. (Duarte vd., 2000)

Üretim süreci metal tozları toz köpürtücü ajanlarla karıştırmakla başlar, sonra karışım yoğun bir ürün olarak sıkıştırılır ve yarı bitmiş ürün oluşur. Sıkıştırma farklı yöntemlerle yapılabilir yalnızca köpürtücü ajanın metal içine gömüldüğünden ve açık gözenek kalmadığından emin olunmalıdır. (Banhart, 2005)

Sıkıştırma metotlarına örnek olarak eşeksenli veya izostatik basma, çubuk ekstrüzyon veya toz haddeleme verilebilir. Sıkıştırma işleminden sonra ön malzeme ergitilir ve köpürtücü ajanın bozunması sağlanır. Gaz salınım kuvvetleri malzemeyi genişletir ve yüksek gözenekli bir yapı oluşturur. Tam genişlemenin tamamlanması için gereken zaman, sıcaklığa ve prekürsör boyutlarına bağlıdır ve birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişim gösterir. Alüminyum ve alaşımları, çinko kalay, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı alaşımlar köpürtücü ajan ve süreç parametrelerinin uygun seçilmesi ile köpürtülebilir. (Babcsan vd., 2003)

Toz metalürjisi sürecinde toz karışımına metal olmayan parçacıklar eklemek sıkıştırmayı kötü etkilemediği gibi stabilizasyonu da artırır. (Haesche vd., 2007)

2.2.2.2. Tikso-döküm ile prekürsör köpürtme

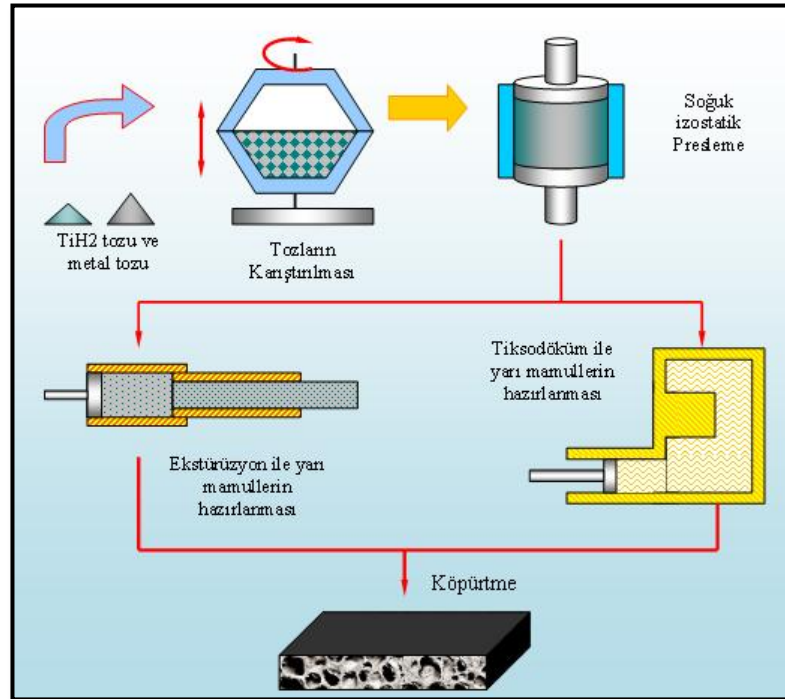
Toz sıkıştırma ile metal toz karışımını katı halde sıkıştırmak yerine, yarı katı halde tikso-döküm ile sıkıştırma yapılabilir. Bu toz karışım için önce soğuk izostatik presleme ile yoğunlaştırılmış kütükler oluşturulur. Bu kütükler alaşımın yarı katı sıcaklık aralığına ısıtılır ve kalıp döküm makinelerinde dökümü yapılır. Hazırlanan malzeme yeniden ergitilerek köpürtülür. Bu metodun avantajı prekürsörün karmaşık şekilli olabilmesi ve daha sonra işlenmesine gerek kalmamasıdır. Dahası toz sıkıştırma metotlarıyla kıyaslandığında dökümde daha izotropik prekürsör elde edilir ve bununla birlikte üniform gözenek yapısı sağlanır. (Babcsan vd., 2003)

Tikso-döküm süreci aşağıdaki adımları içermektedir:

- Metal tozları ve köpürtücü ajanların karıştırılması (örneğin alüminyum, silisyum karbür ve titanyum hidrür)

- Karışımdan soğuk izostatik sıkıştırma ile silindirik kütleler elde edilmesi
- Silindirlerin, ana malzemenin yarı katı hal sıcaklığına ısıtılması
- Dikey veya yatay soğuk bölmelerde yüksek basınçlı kalıp döküm makinesiyle tikso-döküm işlemi yapılması
- Köpürtme işleminin yapılması
- Malzemenin kalıptan ayrılarak taşmaların temizlenmesi (Weise vd., 2003)

Köpürebilir başlangıç malzemesi üretimi için tikso-döküm yaklaşımı, toz metalürjisi ve ergiyik köpürtme yöntemlerinin birleşimidir, ikisinin davranışlarını da içerir: geleneksel toz metalürjisi metodu toz karışımla başlar ancak proste yarı katı halde yer alır. Köpürebilir başlangıç malzemesi üretilir ve ikinci adımda köpürtme yapılır. Köpük stabilizasyonu toz metalürjisi prosesinde kullanılan metal tozların yüzeylerindeki oksit varlığına dayanır, fakat tikso-döküm sırasındaki kesmeden dolayı kısmen kesintiye uğramayan oksit ağı ile farklılaşır. Köpük stabilizasyonunu kolaylaştırmak için yarı katı döküm sürecinde seramik parçacık ilavesi yapmak gerekebilir. (Haesche vd., 2007)



Şekil 2.5 Tikso-döküm işlem aşamaları (Weise vd., 2003)

Prekursör malzemeleri tikso-döküm yöntemiyle köpürtürken küçük miktarlarda Al_2O_3 ve SiC parçacıkları eklemek stabilizasyon ve köpürme davranışını geliştirecek avantajlar sağlar. Maksimum lineer genleşme ve gözenek sayısında artış görülürken drenaj seviyesi ve çökmede azalma görülür. Parçacık ilavesinin etkinliği, parçacık miktarını arttırarak ve küçük boyutlu parçacık kullanarak arttırılabilir. Parçacıklar genellikle hücre duvarı yüzeylerinde veya çok yakınlarında birikirler. Bu sayede hücre duvarlarının dayanımını arttırarak basma özelliklerini iyileştirirler. (Haesche vd., 2007)

Yarı katı süreçle prekürsör malzemelerden köpük metal üretimi, karmaşık yapılu parçaların üretimine izin vermekle birlikte üniform gözenek dağılımı sayesinde izotropik mikroyapı elde edilmesini sağlamaktadır. Bu teknolojinin avantajlarından faydalanmak için sıcaklık ve döküm hızı parametrelerinin köpük yapıya etkilerinin çok iyi anlaşılması gerekmektedir. (Weise vd., 2003)

2.2.2.3. Köpürtücü ajan içeren külçelerden köpük üretimi

Köpürebilir alüminyum tabanlı prekürsör malzeme metal tozları kullanmadan da hazırlanabilir. TiH_2 parçacıkları metal ergitildikten sonra eklenir ve ergiyik soğutulur. Karıştırma sırasında erken hidrojen salımından kaçınmak için katılma ne çok hızlı olmalıdır nede köpürtücü ajanın erken evrede çok fazla gaz salmasına müsaade edilmelidir. (Babcsan vd., 2003)

Diğer bir yöntem de kalıp döküm makinesi kullanmaktır. Toz hidrit kalıp içindeki ergiyiğe anlık olarak enjekte edilir. Seramik ilavesi olmadan normal döküm alışmaları kullanılabilir. Buna karşın kalıp içinde TiH_2 tozlarının homojen dağılımını sağlamak zordur. (Banhart, 2005)

Alternatif olarak TiH_2 tozları ergiyiğe nispeten yavaş karıştırılarak eklenebilir ve takip eden soğutma ile her hidrit parçacığının etrafında hidrojen salımını geciktiren oksit tabakası oluşturan ısı işlem çevrimine maruz kalması sağlanır. Stabil köpük üretimi için %10-15 SiC parçacığı içeren ergiyik kullanılabilir. (Babcsan vd., 2003)

2.2.2.4. Köpürme sırasında gaz üretimi ile köpük üretimi

Dekompozisyonla köpürtücü ajan kullanarak gaz üretiminin yanında, köpük-itici gaz, toz sıkıştırma sırasında iki bileşenin reaksiyonu ile de oluşturulabilir. Çelik köpükler, demir oksit içeren çelik tozlarına kaliteli karbon tozları karıştırılarak üretilir. Bu şekilde sıkıştırılmış malzemenin ergimesi ile CO gazı oluşur. (Babcsan vd., 2003)

2.2.2.5. Yanma reaksiyonu ile köpürtme

Al-Ni alaşımı köpük, alüminyum ve nikel tozlarının Ti, B₄C ve TiC ile karıştırılmasıyla üretilir. Ön malzemenin karıştırılma ve sıkıştırılmasından sonra alüminyumun ergime noktasının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılır ve ekzotermal reaksiyonlar ortaya çıkar. Toz yüzeyindeki oksit-hidrit karışımı, köpürtücü gaz oluşumuna imkan verir. %85'in üzerinde gözenekliliğe sahip oldukça düzgün yapıda köpük elde edilir. (Babcsan vd., 2003)

2.3. Kompozit Metal Köpük Malzemelerin Kullanım Alanları

Pek çok özelliği bünyesinde barındırması sayesinde metalik köpükler çok çeşitli uygulamalarda kullanım alanı bulmuştur. Büyük deformasyonlar için sabit gerilmede, yüksek pik gerilmeler üretmeden mevcut kinetik enerjiyi sönmüleyecek şekilde darbe yükleri için tasarlanabilirler. Otomobil endüstrisinde, metalik köpükler araç gövdesinde çarpma darbelerindeki kinetik enerjiyi sönmlemek ve yolcuların yaralanma riskini minimize etmek için düşünülmüştür. Bal peteği yapılar, yıllardır aracın ön ve arka tamponunu destekleyen iç içe geçen kolonlarda enerji sönmleme yapıları olarak

kullanılmaktadır. Bu yapılar güvenlikte büyük gelişmeler sağlarken, bölünmüş tampon ve destek kolonları karmaşık, pahalı ve ağırdır. Sadece darbe direk ön veya arkadan geldiğinde en iyi etkinliği gösterirler. Metalik köpükler mekanik olarak izotropiktirler ve darbe yönü ne olursa olsun aynı miktarda enerji sönümlerler. Bu nedenle bal peteğinde olduğu gibi kolon yapılarını bölmeye gerek kalmaksızın gövde-parça yapılarının içine doğrudan dahil edilebilirler. Bu nedenle darbe doğrultusu ne olursa olsun tüm araç gövdesinin çarpma enerjisini sönümlemesine olanak verir. Düşük maliyetli sürekli üretilebilir kapalı hücre alüminyum köpükler bu tür uygulamalarda büyük potansiyele sahiptir. (Banhart, 2003)

Metal köpükler hafif yapılarda, enerji sönümlenme cihazları, akustik veya termal kontrol için çekici özelliklere sahiptirler. İlk keşfedildiğinden bu yana metal köpüklerle fazlasıyla ilgilenen otomotiv endüstrisi için ayrıca önemlidir. (Banhart, 2003)

Transport uygulamalarında alüminyum köpüklerin aşağıdaki özellikleri önem kazanır:

- Kapalı gözeneklilik
- Düşük özgül ağırlık
- Plastik deformasyon sırasında yüksek enerji sönümlenme yeteneği
- Yüksek özgül katılık



Şeki 2.6 Otomobiller için köpük dolgululu motor montaj kelepçesi prototipleri (Banhart, 2005)

- Azaltılmış termal ve elektriksel iletkenlik
- İyi mekanik ve akustik sönümleme
- Yanıcı olmama
- Geri dönüştürülebilir olma
- İyi işlenebilirlik (Baumeister, vd., 1997)

Gerilme malzemenin basma dayanımı ile sınırlandırıldığında, yüksek gözeneklilikleri sayesinde köpükler deforme olduklarında büyük miktarda mekanik enerji sönümlerler. Köpükler ayrıca darbe enerjisi sönümlemede de etkilidirler, çarpma durumunda aracın ivmelenmesini sınırlarlar. Metal köpüklerin çökme dayanımları polimer tabanlı köpüklerden daha yüksektir, polimer, seramik ya da cam köpüklerin erişilebilir olmadığı uygulama alanlarında kullanılabilirler. (Banhart, 2003)

Köpükler titreşimleri sönümleyebilir ve belirli durumlarda sesi soğurabilirler. Dahası termal iletkenlikleri düşüktür. Bu özellikleri pek göze çarpmamıştır ancak köpüğün diğer özellikleriyle kombinasyonunda kullanışlı olabilir. (Banhart, 2003)

İki veya daha fazla özellik bir arada kullanılmak istendiğinde metal köpükler daha cazip hale gelir. Örneğin bir otomobil kazasında hafif yapıya ek olarak enerji soğurma ve gürültüyü azaltma özelliklerini aynı anda içeren çok fonksiyonlu malzemeler istenebilir. (Banhart, 2003)

Pek çok durumda tek başına köpük mevcut problem için en uygun çözüm olmayabilir. Katılık optimizasyonu gerektiren sandviç paneller yoğun yüzey tabakalarıyla basit köpük panellerden daha çok tercih edilirler. Yoğun metalik yüzeyli bölümlerle çevrelendiğinde veya içi boş döküm parçalar için takviye olarak kullanıldığında köpükler çok verimli performans gösterir. Alman araba üreticisi Karmann'ın alüminyum sandviç köpük teknolojisi buna örnek olabilir. Bu sandviç paneller üç boyutlu, çok katı ve görece hafiftir. Köpürebilir ön malzemeleri köpürmeden önce derin çekme veya eğme ile karmaşık şekilli olarak üretilebilir. Bu bal peteği veya waffle yapılar gibi rakip teknolojilere göre önemli bir avantajdır. Yeni yapı temelleriyle birleşiminde alüminyum sandviç köpükler arabalardaki geleneksel çelik parçaların yerini alabilir ve ağırlıkta büyük azalma sağlayabilirler. Aynı zamanda sandviç paneller düşük ağırlıklarına ilaveten titreşim sönümleyici gibi de davranırlar bu yüzden araba

gövdesindeki parça sayısının azalmasını, bununla beraber montajın kolaylaşması ve performansı arttırırken maliyetin düşmesini sağlayabilir. (Banhart, 2003)

Alüminyum köpük ve sandviç köpük panellerden üretilen hafif katı yapılar araç ağırlığını azaltır ve tokluğu arttırır. Tokluk ve ağırlık, motor blokları, bagaj kapakları, açılır tavan gibi yapılarda temel bir sorundur. Sandviç köpük paneller, çelik panellerden 10 kat daha fazla tokluğa sahiptir. Metal köpükler enerji sönümlenme konusunda da öne çıkmışlardır. Otomobil ve trenlerde çarpma bölgelerinde maksimum darbe enerjisi sönümlenme sağlanarak deformasyonu kontrol etmek mümkündür. Muhtemel uygulamalar ön ve yan darbe koruma parçaları olabilir. (Yu, vd., 1998)

Başka bir örnek ise çarpışma sırasında yolcuları korumak ve araç hasarlarını minimize etmek için kullanılan çarpışma kutuları fikridir. Bu çarpışma kutuları darbe kırımları ile arabanın ön tırabzanı arasına yerleştirilir ve 15 km/saat'lik bir çarpışmanın tüm enerjisini soğurarak deforme olur, öndeki pahalı parçaları, araç gövdesini ve yolcuları korur. Çarpışma kutuları için bir seçenek plastik çökmeye uğrayan ve enerjiyi sönümleyen içi boş tüptür. Bu tüpler hasara uğradığında tüpün uzunluğu boyunca düzenli aralıklarla plastik kıvrımlar oluşur. Tüpün merkezine alüminyum köpük öz ekleyerek enerji sönümlenme yeteneğinde artış elde edilebilir. Dış tüp yine uzunluk boyunca kıvrılır fakat kıvrım sayısının artmasıyla boş halinden daha fazla enerji sönümler. Enerji köpük öz tarafından da soğurular ve toplam soğurulan enerji miktarı köpük özün ve boş tüpün yalnız başlarına soğurduğundan daha büyüktür. Fiat ve Norwegian Bilim ve Teknik Üniversitesi'nin bir çalışması aksel enerji sönümlenme yeteneğindeki gelişmenin yanında izotropik köpüklerin bütün yönlerden enerji soğurması sayesinde aksel olmayan çarpışmalarda da enerji sönümlenmede büyük gelişmeler sağlandığını ortaya koymuştur. (Banhart, 2003)

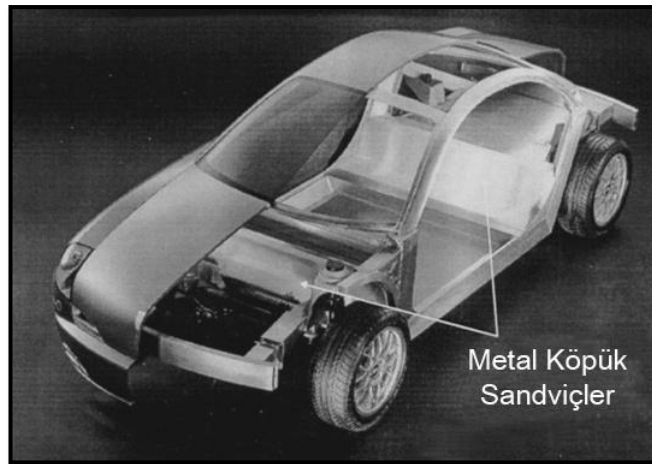
Hafif yapıları, katlıkları ve yangına dayanıklı olmaları metal köpüklerin inşaat sektöründe de kullanım alanı bulmasını sağlamıştır. Aynı özellikleri bünyesinde barındıran bal petek yapılar metal köpüklere göre çok daha pahalı ve ağırdırlar. Modern asansörlerde hafiflik ve hızlı ivmelenme önemli problemlerdir. Asansörlerde köpürtülmüş sandviç yapılar kullanmak gövde ağırlığını azaltmanın yanında enerji tüketiminin azaltılmasına da yardımcı olur. (Yu, vd., 1998)

Sandviç metal köpük paneller uzay havacılık endüstrisinde kullanılan pahalı bal petek yapıların yerini almaya adaydır. Metal köpükler izotropik bir yapıya sahiptirler ve yapının bütünlüğünü koruyarak tutuşmayı geciktirme özellikleri nedeniyle bu sektörde giderek önem kazanmaktadır. (Yu, vd., 1998)

Kurşun ve nikel köpükler pillerde, altın veya gümüş köpükler mücevherlerde kullanılabilirler. Açık hücreli köpükler ise ısı değiştirgeçleri, filtreler ve katalizör taşıyıcıları gibi uygulamalarda kullanılabilirler. Titanyum ve nikel gibi yüksek sıcaklık alaşımlarının köpürtülmesi özellikle uzay ve biyomedikal endüstrisinde köpük metallerin uygulama alanlarının gelişmesine yardımcı olur. (Yu, vd., 1998)



Şekil 2.7 Alüminyum köpük sandviçlerden üretilmiş prototip roket başlığı (Banhart vd., 2008)



Şekil 2.8 Alüminyum sandviç paneller kullanılarak üretilmiş konsept otomobil

(Yu, vd., 1998)

2.4 Kompozit Metal Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Alüminyum ve alaşımlarından üretilen köpük malzemelerin dayanımları pek çok ticari uygulama için uygun değildir. Dayanım karakteristiklerini iyileştirmek için çeşitli yöntemlere başvurulur. Örneğin oksijen içeren bir kalınlaştırıcı ajan üretilen köpük içine karıştırılarak metal oksit oluşumu sağlanır ve bu sayede alüminyum köpüğün dayanımı artırılır. Cu, Mg ve Zn içeren alaşımlara uygulanan ısıtma işlemi dayanımın artmasına yardımcı olur. Bununla beraber dayanımın artırılmasında en etkili yöntem alüminyum köpüğe takviye malzemesi eklemektir. (Gui, 2000)

Seramik parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitler, takviyesiz matris malzemelerine göre çok daha yüksek dayanım ve elastiklik modülüne sahiptirler. SiCp takviyeli alüminyum matrisli kompozitler yüksek katılık ve akma dayanımlarının yanında yüksek enerji sönümlenme yeteneğine ve basma dayanımına sahiptirler. Teorik köpük modellerinin temelinde köpüğün dayanımının köpük oluşturulan ana malzemenin dayanımı ile doğrudan orantılı olduğu yatmaktadır. Kompozit malzemelerden köpük üretilmesi ile dayanımdaki arzu edilen artış sağlanabilir. (Gui, 2000)

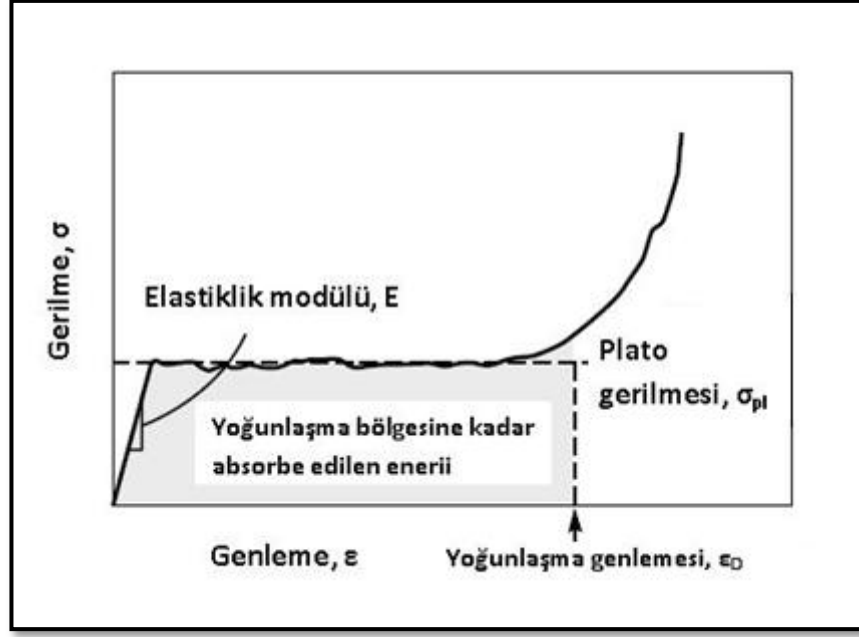
Metal köpük üretiminde genellikle ergiyiğin viskozitesini arttırmak için kalınlaştırıcı ajanlar kullanılır, bu ajanların eklenmesi kabarcıkların ergiyik dışına kaçmasına engel olur. Ergimiş haldeki kompozitlerin, alüminyum alaşımı ergiyiklerden çok daha büyük bir viskoziteye sahip olduğu bilinmektedir ve bu özellikleri köpürme sürecinde bir avantaj sağlar. (Gui, 2000)

Metalik köpüklerin mekanik özellikleri büyük oranda yoğunlukları ile belirlenir. Buna ilaveten mekanik özelliklerin belirlenmesinde düzgün hücre dağılımı, hücre boyutu ve yapısı kadar önemli bir faktördür. Farklı proseslerle üretilen metal köpüklerin hücre karakteristikleri farklı olacağından mekanik özellikleri de farklılık gösterir. Buna karşın aynı hücre duvar malzemesine sahip olsalar da farklı proseslerle üretilen köpüklerin mekanik özelliklerinin doğrudan karşılaştırılması uygun değildir. (Gui, 2000)

Alüminyum köpükler basma yükü altında farklı deformasyon davranışı sergilerler. En önemli farklılık gerilmenin artan deformasyonla sabit kaldığı plato bölgesinde görülür. Bu plato gerilmesi, köpük yapısında deformasyon bantlarının başlaması ve yayılmasına sebep olur. Bantlar hücrelerin çökmesine ve büyük bir hacim değişikliğine sebep olurken deformasyon eksenine dik yönde ihmal edilebilir bir deformasyon ortaya çıkar. Bu bantlarda genellikle deformasyonun yerini hücre duvar ve kenarlarındaki plastik burkulma alır. Büyük genlemelerde plastik Poisson oranı neredeyse sıfırdır. (Motz vd., 2001)

Aynı yoğunluktaki köpüklerde basmadaki elastiklik modülünün, çekmedeki elastiklik modülünden 2-4 kat daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Her iki durumda da elastiklik modülü artan genlemeyle birlikte azalmaktadır. Bu düşüş çekmede basma durumundan daha küçüktür. Basma durumunda hücre yüzey ve kenarları basma gerilmesi ile birlikte eğilmeye de maruz kalır, bu da burkulmayı ortaya çıkarır. Bu köpüğün katılığını büyük oranda düşürür. Çekme durumunda yüzey ve kenarlardaki burkulma daha düşüktür ve deformasyon mekanizmasında baskın değildir. Köpüğün elastiklik modülü, yani köpük yapısının katılığı tamamen yapının kendisine bağlıdır. Deformasyon bu yapıyı değiştirdiğinden dolayı katılıkta değişecektir. (Motz vd., 2001)

Alüminyum köpük malzemeler basma süresince 3 adımda deforme olurlar. Birinci adım Hooke yasasına uyan lineer elastikliktir. İkinci adım çökme plato bölgesinde görülür. Burada plastik deformasyon ve hücre duvar kırılmaları ilerleme gösterir. İkinci adımda ortaya çıkan gerilme akma noktasına ulaştıktan sonra daha fazla artış göstermez. Bu bölge çökme plato bölgesi olarak adlandırılır. Diğer yandan alüminyum köpüğün mekanik özelliklerinin hücre tipine, hücre en-boy oranına, boyutlarına, hacimsel oranına ve dağılım derecesine bağlı olduğu bilinmektedir. Buna karşın pratikte malzemenin köpürmesi sırasında kusurlar oluşur, gerilme düşer ve gerilme-genleme eğrisinde periyodik bantlar ortaya çıkar. Deformasyonda son adım yoğunlaşmadır ve bu bölgede köpükteki deformasyon katı malzemelerdeki gibidir.



Şekil 2.9 Metal köpük malzemeler için gerilme genleme diyagramı (Ashby vd., 2000)

Değişen bağıl yoğunlukla basma dayanımının eğilimini bilmek için yoğunluğun bilinmesi gereklidir. Yoğunluk (1) eşitliğinde görüldüğü gibi görüntü analizinden elde edilen gözeneklerin hacimsel oranının bir fonksiyonudur. Fakat bu eşitlikte alüminyum köpükteki gözenek boyutu sabit ve dağılımı homojen kabul edilmelidir. P_f gözeneklerin hacimsel oranı olmak üzere yoğunluklar oranı aşağıdaki gibi hesaplanabilir. (Jeon vd., 2009)

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 1 - \frac{P_f}{100} \quad (1)$$

İdeal kapalı hücre metal köpüklerin mekanik davranışını incelemek için çeşitli modeller ortaya atılmıştır. Köpüğün karmaşık hücre geometrisinden dolayı kesin bir model oluşturmak çok zordur. Literatürde çeşitli yaklaşımlar tanımlanmıştır. En basit teknik, hasar ve deformasyon mekanizmalarının boyutsal parametreler kullanarak modellenmesidir. Sonuçlar hücre duvarı özellikleri ve bağıl yoğunluğa bağlı olurken hücre geometrisinden bağımsızdır. Sabitler, model eşitliklerini deneysel sonuçlara uydurarak bulunan hücre geometrileriyle ilişkilidir. İkinci bir metot ise yapısal mekanik veya sonlu elemanlar kullanılarak tekrarlayan birim hücreleri analiz etmektir. Bu metot

birim hücre geometrisinin özelliklerine bağlıdır ve köpük mikro yapısının geometrik sabitlerini tahmin etmek için kullanılabilir. Üçüncü yaklaşım ise sonlu elemanlar analizinde periyodik uzayda rastgele dizilmiş Voronoi hücreleri kullanmaktır. Bu yaklaşımın avantajı, köpüğün hücre geometrisinin en iyi temsili olmasıdır ancak oldukça yoğun hesaplamalar gerektirir. (Gibson, 2000)

Köpüğün bağıl yoğunluğu ve hücre duvarına bağlı özelliklerini kapsayan boyutsal parametreler yaklaşımında kullanılan birim hücre ve sonlu elemanlar modeli, hücre geometrisi ile ilişkili sabitlerin büyüklüğünü hesaplar. (Gibson, 2000)

Açık hücreli köpüklerde hücre kenarlarında öncelikle eğilme hasarı görülür. Elastiklik modülü eğilme boyutsal analizi ile hesaplanabilir. Bağıl modül (E^* , köpüğün elastiklik modülü, E_s katının elastiklik modülüne bölünür) bağıl yoğunluğun karesi ile doğru orantılıdır. (Gibson, 2000)

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2)$$

C_1 hücre geometrisi ile ilgili bir sabittir. Plato sınırlarıyla tanımlanan tetrakaidekahedral birim hücrenin hücre kesit alanı ile analizi sonucu $C_1=0.98$ bulunmuştur. Bu değer pek çok açık hücre polimer köpük için yaklaşık $C_1=1$ kabul edilmiştir. Kayma halinde hücre kenarları yine eğilirler bu sebeple,

$$\frac{G^*}{G_s} = C_2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (3)$$

C_2 yaklaşık 3/8 olarak kabul edilir. Poisson oranı iki genlemenin birbirine oranıdır ve bağıl yoğunluktan bağımsızdır, pek çok köpük için ölçülen değer yaklaşık 1/3'tür. (Gibson, 2000)

Kapalı hücreli köpüklerde durum daha karmaşıktır. Köpük üzerine yük uygulandığında hücre kenarlarında oluşan eğilmeye ek olarak düzlemsel hücre yüzeylerinde uzama görülür. (Gibson, 2000)

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + C'_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (4)$$

Kapalı hücre köpük için sonlu elamanlar analizi yapıldığında Voronoi kapalı hücre yaklaşımı $C_1 = C'_1$ yaklaşık olarak 0,32 kullanılmasını önerir. Düşük yoğunluklu köpükler için yüzey uzamaları ihmal edilir. (Gibson, 2000)

$$\frac{E^*}{E_s} \approx 0.32 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (5)$$

Kapalı hücre izotropik köpükler için kayma modülünün, elastiklik modülünün $3/8$ 'i ve Poisson oranı yaklaşık $1/3$ olması beklenir. (Gibson, 2000)

Elastik-plastik malzemelerden yapılmış köpükler için plato gerilmesine hücreler plastik olarak çöktüğünde ulaşılır. Uzamış hücre yüzeylerindeki akma kapalı hücreli köpüklerin dayanımına katkı sağlar. Köpüğün plato gerilmesi σ_{pl}^* , katının akma dayanımı σ_{ys} ve C_3 hücre geometrisi ile bağıntılı sabit olmak üzere aşağıdaki bağıntı geçerlidir. (Gibson, 2000)

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C'_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (6)$$

Tetraikadekahedral (ondört yüzlü) birim hücrenin sonlu elemanlar analizi sonucunda denklem aşağıdaki hali alır. (Gibson, 2000)

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = 0.33 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + 0.44 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (7)$$

Düşük yoğunluklu köpükler için ilk terim ihmal edilir. (Gibson, 2000)

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} \approx 0.44 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (8)$$

Kayma dayanımı akma kriterlerinden elde edilebilir. Kayma dayanımının tek eksenli dayanımın 0.69 katı olduğu kabul edilir. (Gibson, 2000)

$$\tau_{pl}^* = 0.69\sigma_{pl}^* \quad (9)$$

Kapalı hücre köpükler için bağıntı aşağıdaki hali alır. (Gibson, 2000)

$$\frac{\tau_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = 0.23 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + 0.30 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (10)$$

Tablo 2.1’de kapalı hücreli köpük yapıların mekanik özellikleri ile ilgili formüller bulunmaktadır. Bu formüller teorik modeller temel alınarak oluşturulmuştur ve tasarım sürecinde köpük yapıların mekanik özelliklerini yaklaşık olarak belirlemede kullanılabilir. (Ashby vd., 2000)

Tablo 2.1 Kapalı hücreli köpükler için formüller (Ashby vd., 2000)

Mekanik Özellik	Kapalı Hücre Köpükler İçin Formülasyon
Elastiklik Modülü (GPa)	$E = (0.1 - 1.0)E_s \left[0.5 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 + 0.3 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \right]$
Kayma Modülü(GPa)	$G \approx \frac{3}{8}E$
Yığılma Modülü (GPa)	$K \approx 1.1E$
Esneklik Modülü (GPa)	$E_f \approx E$
Poisson Oranı	$\nu = 0.32 - 0.34$
Basma Dayanımı (MPa)	$\sigma_c = (0.1 - 1.0)\sigma_{c,s} \left[0.5 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{\frac{2}{3}} + 0.3 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \right]$
Çekme Dayanımı (MPa)	$\sigma_t \approx (1.1 - 1.4)\sigma_c$
Sertlik (MPa)	$H = \sigma_c \left(1 + 2 \frac{\rho}{\rho_s} \right)$

3.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Esmaelzadeh ve arkadaşları (2006), yaptıkları bir çalışmada SiC takviyesinin AlSi7 metal köpüklerin köpürme davranışı ve basma özelliklerine etkisini incelemiştir. Al, Si, SiC ve TiH₂ saf tozları karıştırılmış, sıcak olarak preslenmiş ve 750–810°C arasında köpürtülmüştür. Hacimsel oranı %10'un üzerinde SiC ve (3, 8, 16µm) parçacık boyutunun etkisi incelenmiştir. AlSi7 alaşımının köpürme davranışları hakkında, maksimum köpük lineer genleşmesinin ve stabilitesinin SiC parçacık boyutuna ve hacimsel oranına bağlı olduğu bulunmuştur. Seramik parçacık miktarını arttırmak ve/veya seramik parçacık boyutunu düşürmek ergiyikteki drenajı azaltmasına rağmen hücre yapısı üniformluktan uzaklaştığı görülmüştür. Bu seramik parçacıkların alüminyum ergiyiğin viskozitesi üzerindeki etkisine ve hücre duvar kalınlıkları oranına bağlanmıştır. Ayrıca SiC ilavesinin etkisinin köpürme sürecinde kullanılan sıcaklıkla yakından ilişkili olduğu fark edilmiştir. Bunun yanında basma yükü altındaki mekanik özelliklerde az miktarda düşüş gözlenmiştir. İyileşen köpük stabilizasyonu ile birlikte en iyi köpürme ve uygun mekanik özellikler hacimce %3 SiC (3µm) oranına sahip ve 810°C de köpürtülen prekursorlardan elde edilmiştir.

Yu ve arkadaşlarının (2008) yaptıkları bir çalışmada SiC partikül takviyeli AlSi9Mg kompozit metal köpük, köpürtücü ajan olarak CaCO₃ kullanılarak ergiyik köpürtme yöntemiyle üretilmiştir. Statik ve dinamik basma davranışları incelenmiştir. Deneysel sonuçları, SiCp/AlSi9Mg kompozit köpüğün akma gerilmesi deformasyon hızı arttıkça arttığını, yüksek deformasyon hızlarında basma sırasında deformasyon sertleşmesi ortaya çıktığını ve SiCp/AlSi9Mg kompozit metal köpüğün deformasyon hızına alüminyum ve alaşımlarından daha duyarlı olduğunu göstermiştir. Yüksek deformasyon hızlarında, farklı hacimsel oranlarda SiC takviyesinde, takviye oranı arttıkça SiCp/AlSi9Mg kompozit köpüğün akma gerilmesinin arttığı görülmüştür.

SiCp/AlSi9Mg kompozit metal köpük üretimi için 44µm %99.5 CaCO₃ ve 28µm SiC AlSi9Mg ergiyiği içine karıştırılmıştır. SiC parçacıklarının ergiyik içinde daha iyi ıslanabilirliğini sağlamak için 900°C'de 1 saat ve ardından 600°C'de 2 saat, ergiyik

içinde homojen dağılımından emin olabilmek için CaCO_3 tozlarına da 200°C 'de 1 saat ısıl işlem uygulanmıştır. Alaşım 610°C 'de bir bulamaç haline getirildikten sonra CaCO_3 ilave edilmiş karıştırıldıktan sonra çelik kalıplara alınmış $700-720^\circ\text{C}$ ve farklı bağıl yoğunluklar elde etmek için farklı köpürme süreleri denenmiştir.

SiCp/AlSi9Mg kompozit köpüğün akma gerilmesinin, bağıl yoğunluk ve deformasyon hızına bağlı olduğu görülmüştür. Bağıl yoğunluk ve deformasyon hızı arttıkça akma gerilmesinin yükseldiği gözlenmiştir. 10^{-2} s^{-1} 'nin altındaki deformasyon hızlarında akma gerilmesindeki artışın daha yavaş olduğu, 600 s^{-1} üstündeki hızlarda ise çok hızlı yükseldiği tespit edilmiştir. Deformasyon hızının akma gerilmesi üzerindeki etkisi bağıl yoğunluğun etkisinden daha belirgindir. SiCp/AlSi9Mg kompozit köpüğün deformasyon hızına duyarlılığı alüminyum ve alaşımlarından daha fazladır. Kompozit köpüğün deformasyon hızına duyarlılık karakteristiği metal matrisli köpükle çok benzerdir.

AlSi9Mg köpük ile karşılaştırıldığında SiCp/AlSi9Mg kompozit metal köpük aynı deformasyon hızında daha yüksek akma gerilmesine sahiptir. Aynı bağıl yoğunluğa sahip olduklarında, kompozit köpüğün akma gerilmesi SiC takviyesinin hacimsel oranının artmasıyla yükselmektedir. (Yu, vd., 2008)

Gui ve arkadaşları(2000) yaptıkları çalışmada %20 SiCp takviyeli AlSi7Mg0.4 alüminyum alaşımını TiH_2 kullanarak köpürtmüşlerdir. Elde edilen kompozit metal köpükten (14x14x28) mm boyutlarında basma numuneleri çıkararak 2.4mm/dk hızla basma deneyi uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda kompozit köpüğün kırılma bir basma davranışı sergilediği ve elastik bölgenin sadece düşük genleme oranlarında ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. Gerilme-genleme eğrilerinde çökme bölgesinde inişli çıkışlı bir eğri yapısı göze çarpmıştır. Kompozit köpüğün mekanik özelliklerinin bağıl yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Deneyler sonucunda elastiklik modülü ve basma dayanımında bağıl yoğunluğun artmasıyla doğru orantılı bir artış görülmüştür. Ayrıca kompozit köpüğün yaygın alüminyum alaşımı köpüklerden daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. (Gui vd., 2000)

Esmazelzadeh ve arkadaşları (2008) yaptıkları bir çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile köpürtücü ajan olarak %0.5 TiH_2 kullanarak hacimsel %3 SiC ($3\mu\text{m}$)

takviyeli AlSi7 metal köpük üretimini gerçekleştirmiş, köpürme davranışı ve basma özelliklerini incelemişlerdir. SiC parçacık ilavesinin ergiyik genişmesini arttırdığı ve köpük stabilitesini iyileştirdiği gözlenmiştir. Makro yapıda büyük düzensiz hücreler ve basma yükü altındaki mekanik özelliklerde bir miktar düşüş kaydedilmiştir. SiC parçacıklarının hücre duvarlarında toplandığı ve metal ergiyiğin hacimsel viskozitesini artırıp, maksimum lineer genişleme ve köpük stabilizasyonunu iyileştirdiği tespit edilmiştir. Drenaj miktarının azalmasıyla hücreler daha büyük ve düzensiz hale gelmiştir. Kompozit metal köpük, AlSi7 metal köpüğe kıyasla, daha kırılğan olmuş ve düşük enerji absorpsiyonu ile düzensiz deformasyon davranışı sergilemiştir.

Jeon ve arkadaşları (2009) tarafından yapılan bir çalışmada AlSi12CuFe alüminyum köpük, köpürtücü ajan olarak %1 TiH₂ ve viskozite artırıcı ajan olarak Ca ve SiCp tozları kullanılarak kompleks karıştırma yöntemi ile üretilmiştir. Çalışmada hücre boyutunun basma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üretilen köpükten 50mm çapında ve 50mm boyunda basma numuneleri çıkarılmış ve 0.05mm/s ilerleme hızı ve 0.01 s⁻¹ deformasyon hızında basma deneyi uygulanmıştır. Ergiyiğin aşırı ısıtılması sonucu TiH₂'nin homojen olmayan dağılımı ve karıştırıcının kaplaması nedeniyle alüminyum köpük malzeme içinde çeşitli kusurlar ortaya çıkmıştır. Bu kusurlardan bazıları büzülme, az büyüyen gözenekler ve TiH₂'nin yanmasıdır. Gözenek boyutu ve hacimsel oranı ergiyik metalin sıcaklığı arttıkça artmıştır. Karıştırma sırasında karıştırıcının hızı arttıkça gözenek oluşumu ve dağılımında iyileşme görülmüştür. Ancak hızın belli bir seviyenin üzerine çıkması durumunda matris içine hava akışı olması nedeniyle gözenekler hızlı bir şekilde büyüyerek malzeme özelliklerinin bozulmasına yol açmıştır. Karıştırma hızı arttıkça gözenek boyutu ve hacimsel oranı yükselmiştir. Basma dayanımının hücre boyutuyla ters orantılı olduğu görülmüştür. 2mm ve altındaki hücre boyutlarında akma dayanımı kademeli olarak değiştiği, ancak 2mm'nin üzerindeki boyutlarda hücre şeklinin küresel yapıdan polihedral yapıya doğru değişmesinden dolayı akma dayanımı şiddetle düştüğü tespit edilmiştir.

Elbir ve arkadaşları (2003) yaptıkları çalışmada köpürtücü ajan olarak ağırlıkça %0.5 TiH₂ kullanarak toz metalürjisi yöntemiyle hacimce %8.6 SiC takviyeli kompozit metal köpük üretmişler ve partikül takviyesinin köpüğün basma davranışına etkisini

incelemişlerdir. SiC ilavesinin lineer genişmeyi arttırdığını ve drenaj ile hücre kabalaşma oranını azalttığını gözlemlemişlerdir. SiC parçacıklarının köpüğün basma dayanımını arttırdığını fakat daha kırılğan basma davranışına sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

Luo ve arkadaşları (2008) yaptıkları çalışmada farklı hacimsel oranlarda SiCp takviyeli SiCp/AlSi9Mg kompozit köpüğü, köpürtücü ajan olarak CaCO₃ kullanarak ergiyikten direk köpürtme yöntemiyle üretmişlerdir. Ürettikleri köpük malzemedan (15×15×35) mm ebatlarında basma numuneleri çıkararak köpüğün basma davranışlarını incelemişlerdir.

Hacimce %5 takviyeli SiCp/AlSi9Mg kompozit metal köpük ve AlSi9Mg metal köpüğün basma deneyleri sonucunda gerilmenin bağıl yoğunluğun bir fonksiyonu olduğunu tespit etmişlerdir. Çökme bölgesindeki gerilme, bağıl yoğunlukla artış göstermiş ve kompozit köpüğün daha yoğun olan numunelerinde yoğunlaşma oranı daha yüksek olmuştur. Aynı bağıl yoğunluğa sahip kompozit ve metal köpük kıyaslandığında kompozit köpüğün hücre duvar malzemesinin akma gerilmesi daha yüksek olduğundan metal köpüğe göre akma gerilmesi daha yüksek çıkmıştır. Hücre duvarlarındaki SiC parçacıkların, gerilme çok büyük değerlere ulaşip hasar oluşana kadar destek sağlayabildiği görülmüştür.

Diğer kapalı hücre metalik köpüklerde olduğu gibi SiCp/AlSi9Mg kompozit metal köpük ve AlSi9Mg metal köpük karakteristik gerilme-genleme eğrilerine sahip olduğu görülmüş ve eğrinin üç belirgin bölgeye ayrıldığı gözlenmiştir. Kompozit ve metal köpüğün lineer elastik deformasyon bölgesi, çökme plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi yalnızca düşük genlemelerde ortaya çıkmıştır. 0.31 bağıl yoğunluğa sahip metal köpüğün plato gerilmesi 5.7MPa iken kompozit köpüğün plato gerilmesi 10.5MPa bulunmuştur.

SiCp hacimsel oranının SiCp/AlSi9Mg kompozit köpüğün basma davranışlarına etkisi incelendiğinde, bağıl yoğunluk sabit tutularak takviye oranı artırıldıkça akma gerilmesinin yükseldiği görülmüştür. SiCp parçacık ilavesinin köpüğün basma özellikleri üzerinde güçlendirici bir etkisi olduğu belirlenmiştir. (Luo vd.,2008)

Metal köpüklerin mekanik basma testi, deformasyon davranışının köpüğün yoğunluğuna ve yükleme yönüne bağlı olduğunu göstermiştir. Basma dayanımı ile köpük yoğunluğunun arasında bağıl olarak lineer bir ilişki olduğu görülmüştür. Yüksek yoğunluklu köpükler basma etkisi altında yüksek gerilmeye dayanmıştır ancak hafif yapı uygulamalarında kullanılma ihtimalleri düşmüştür. Ayrıca Mg gibi alaşım elementlerinin ilavesinin köpük dayanımını önemli oranda arttırdığı tespit edilmiştir. (Yu vd., 1997)

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kompozit metal köpük malzeme üretiminde deneysel çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada farklı boyutlarda ve oranlarda SiCp parçacık takviyeli kompozit metal köpük ve takviyesiz alüminyum metal köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada üretilen metal köpük malzemelerden deney numuneleri çıkarılmış ve takviye boyutu ve oranındaki değişikliğin malzeme üzerindeki etkileri incelenmiştir.

4.1. Kompozit Metal Köpük Üretimi

4.1.1 Malzeme Seçimi

Kompozit metal köpük üretimi için matris malzemesi olarak EN AW 5083 (AlMg4.5Mn0.7) alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Alaşımın mekanik özellikleri Tablo 4.1 ve kimyasal kompozisyon limitleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1 AlMg4.5Mn0.7 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri (2)

Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	Uzama %	Kayma Modülü	Elastiklik Modülü (GPa)
290	145	22	170	70

Tablo 4.2 AlMg4.5Mn0.7 alüminyum alaşımın kimyasal kompozisyon limitleri (2)

Ağırlık %	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti
En az	-	-	-	4	0,1	0,05	-	-
En çok	0,4	0,4	0,1	4,9	1	0,25	0,25	0,15

AlMg4.5Mn0.7 alüminyum alaşımı çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Gemicilik sektöründe kaynaklanmış parçalar halinde gemi yapımında, gemi direği ve platformlarda yapısal eleman ve ekipman olarak kullanılmaktadır. Kimyasal cihazlar ve depolama tankı yapımında, basınçlı kaplarda, boru ve tesisat malzemesi olarak kullanım alanı bulmaktadır. Otomotiv sektöründe depo gövdelerinde, raylı ulaşımda depo ve yapısal eleman olarak kullanılır. Askeri araç gövde ve ekipmanlarında, zırh tabakaları ve portatif köprülerde, makine gövde ve aksamalarında, bina ve yol yapımında ve yapı iskelelerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar. (1)

AlMg4.5Mn0.7 alaşımı çok iyi kaynak edilebilme özelliğine sahiptir. Tuzlu su ve deniz atmosferine karşı korozyon direnci çok yüksektir. Yorulma dayanımı yüksektir ve soğuk şekillendirilebilirliği iyidir. İnce veya karmaşık şekillerde üretilmesi zordur ancak iç gerilmesiz kalın plakalar halinde üretilebilirler. Üretim formları plaka, levha, çubuk, tel, tüp ve profil şeklinde olabilir. (1) Tablo 4.3'te AlMg4.5Mn0.7 alaşımının fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.3 AlMg4.5Mn0.7 alaşımının fiziksel özellikleri (3)

Fiziksel Özellik	Değer
Yoğunluk	2.65 g/cm ³
Ergime noktası	570°C
Direnç	0.058x10 ⁻⁶ Ωm
Termal iletkenlik	121 W/mK
Termal genleşme	25x10 ⁻⁶ /K

SiCp takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit metal köpük üretimi için iki farklı boyda SiCp toz kullanılmıştır. Ortalama 1µm (1200 mesh) ve 12µm (500 mesh) boyutlarındaki SiCp tozları herhangi bir işleme tabi tutulmadan, matris içine farklı oranlarda (%0, 5, 10, 15, 20) karıştırılmıştır. Tablo 4.4'te SiCp boyut dağılımı ve Tablo 4.5'te SiCp kimyasal bileşimi görülmektedir.

Tablo 4.4 SiCp Boyut dağılımı

Gridler	Ortalama (%50)	Tolerans	%94 Limit minimum	%3 Limit maksimum
F500	12.8	± 1.0	5	25
F1200	3.0	± 0.5	1	7

Tablo 4.5 SiCp kimyasal bileşimi

İçerik	% Ağırlık Oranı
SiC	99.00
SiO ₂	0.34
Si	0.27
Fe	0.05
Al	0.04
C	0.30

Köpürtücü ajan olarak kullanılan TiH₂ tozları <44µm (325 mesh) boyunda ve %98 saflıktadır. Tozlar ısıtılma işlemi uygulanmadan kullanılmıştır. Tablo 4.6'da kullanılan TiH₂ tozlarının fiziksel özellikleri, Tablo 4.7'de ise kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Tablo 4.6 TiH₂ fiziksel özellikleri

Fiziksel özellik	Değer
Görünüm	Gri toz
Parçacık Boyutu	< 44µm
Moleküler ağırlık	49.53–49,9 g/mol
Yoğunluk	3.9 g/cm ³
Safılık	98+

Tablo 4.7 TiH₂ kimyasal bileşimi

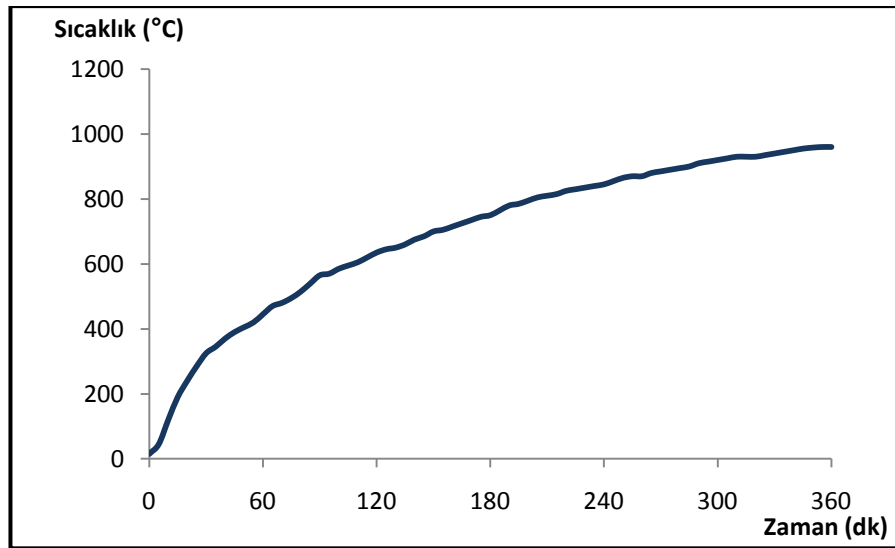
Element	H	O	N	Cl	Si	Fe	Mg	Cr	Ni	Zr
% Ağırlık Oranı	>3.85	~0.1	<0.01	<0.06	0.002	<0.04	<0.03	<0.012	<0.014	<0.006

4.1.2 Deney Düzenegi

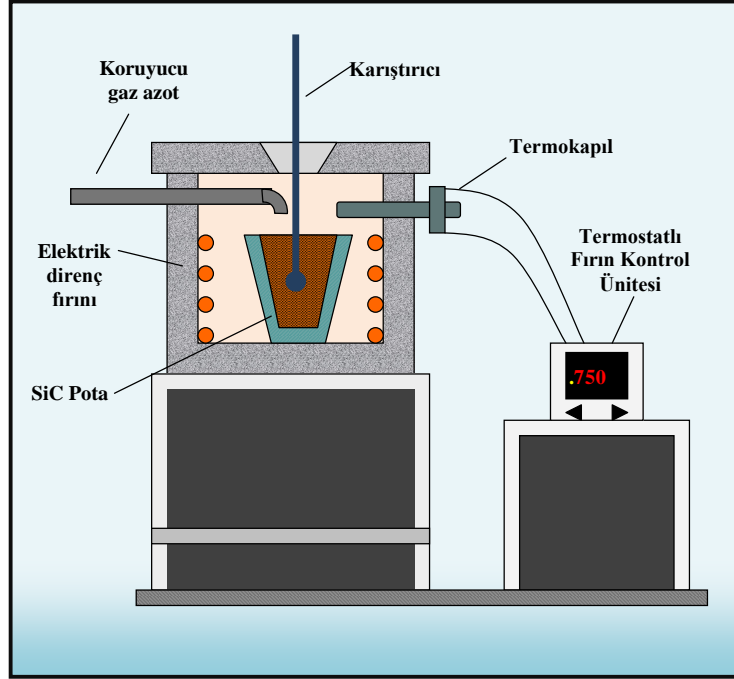
Bu çalışmada kullanılan kompozit metal köpük malzeme hazırlama ünitesi ergitme fırını, karıştırma araçları, pota, azot tüpü ve kontrol sistemlerinden oluşmaktadır. Ergitme işlemleri için sıcaklığı ve fırın içi atmosferinin kontrolünü daha kolay sağlamak amacı ile mümkün olan en küçük iç hacim ölçülerine (300x300x400mm) sahip olacak şekilde fırın imal edilmiştir. Refrakter tuğla ve refrakter harç ile hazırlanan fırın iç cidarının dışı 40mm gaz beton malzemesi ile çevrildikten sonra seramik battaniye ile kaplanmıştır. Ergitme ünitesi aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Sıcaklık kontrolü
- Ergitme hızı kontrolü
- Azot gazı koruyucu atmosferi
- Ergiyik gözetleme ve karıştırma penceresi
- 1200°C Maksimum sıcaklık
- 2 KW Güç

Fırın içerisindeki ergitme işlemi için, fırın sıcaklığının ve ergimiş metalin ergime sıcaklığının kontrolü termostat ve iki adet termokapıl (K-Tip) yardımıyla sağlanmıştır.



Şekil 4.1 Ergitme fırını karakteristik sıcaklık eğrisi



Şekil 4.2 Deney düzeneği

Deneyle sırasında AlMg4.5Mn0.7 alaşımının yarı katı sıcaklık aralığına ısıtılması, köpürtücü ajan ve SiCp takviye malzemelerinin alaşıma eklenmesi silisyum karbür döküm potalarında gerçekleştirilmiştir. Pota ölçüleri $d=19\text{mm}$, $D=25\text{mm}$ ve $H=29\text{mm}$ dir.

Kompozit metal köpük malzeme hazırlama işlemleri sırasında ergitme ve karıştırma süreçleri koruyucu azot gazı altında gerçekleştirilmiştir. Koruyucu ortam sağlanmadığı takdirde karışım ortamdan oldukça fazla gaz almakta, matris ve takviye malzemeleri oksitlenerek karışım oluşturmak güçleşmekte, topaklanmalar oluşmakta ve istenen oranda takviye sağlanamamaktadır. Koruyucu gazın sisteme verilmiş hızı da oldukça önemli olup, gereğinden az olduğunda koruma sağlayamamakta, fazla olduğunda ise yeterince ısınmayıp, kompozit karışımın sıcaklık dengesini bozarak, karıştırma süresinin uzamasına ve/veya takviye malzemesinin topaklanmasına neden olduğu bilinmektedir. (Ürkmez, 2004)

4.1.3 Kalıplar



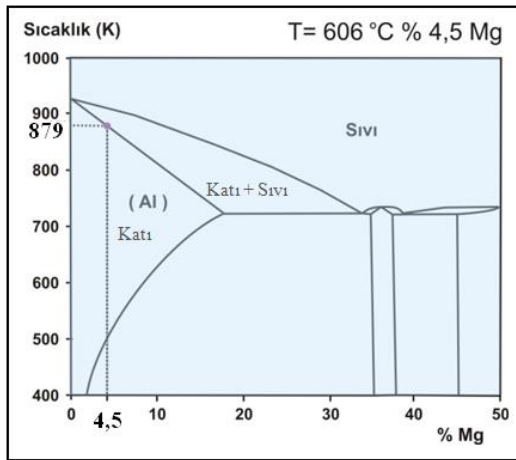
Şekil 4.3 Gaz beton kalıp

Üretim esnasında takviye ve köpürtücü ajanların alaşıma eklenmesinden sonra köpük oluşumunun düzgün bir hacimde ilerlemesi için ergiyik pota içinden alınarak kalıplara aktarılmıştır. Kalıpların iç ölçüleri (50x70x50) mm'dir ve köpürmenin sınırlandırılmaması için üst yüzleri açık olarak tasarlanmıştır. Kalıplar gaz beton malzemeden hazırlanmıştır.

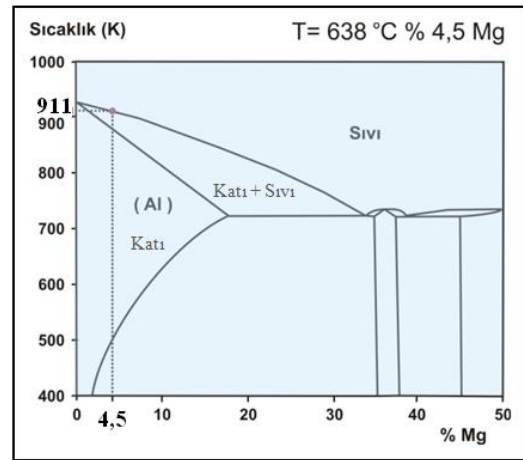
4.1.4 Köpük üretimi

Fırın iç sıcaklığı 750°C'ye ayarlanmış ve üretim boyunca bu sıcaklıkta tutulmuştur. Köpük üretimi azot gazı koruyucu atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Alüminyum alaşımı yarı katı sıcaklık aralığına (Şekil 4.4) gelinceye kadar ısıtılmış ve süreç boyunca katı alüminyum ilavesi yapılarak malzeme yarı katı aralıkta tutulmuştur. Uygun viskozite sağlandığında yarı katı haldeki malzeme içine çeşitli oranlarda SiCp

tozları eklenmiştir. SiCp tozlarının malzeme içinde homojen dağılımı sağlanıncaya kadar 4-6 dakika karıştırma işlemi yapılmış ve istenen dağılım sağlandığında köpürtücü ajan olarak kullanılan TiH_2 ağırlıkça % 0,5 oranında ilave edilmiştir. Köpürtücü ajanın ilave edilmesinden sonra yaklaşık 2 dakika karıştırma işlemi yapılmış ve malzeme kalıplara alınmıştır. Köpürtücü ajanın H_2 gazını serbest bırakması ve malzeme içinde gözenek oluşumunun gerçekleşmesi için kalıplar 9 dakika kadar $750\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta bekletilmiş ve daha sonra fırından dışarı alınarak atmosfere açık halde soğumaya bırakılmıştır. Köpük oluşumunun zamana bağlı değişimini tespit etmek ve en iyi gözenek dağılımı ve gözenek boyutunu elde edebilmek amacıyla farklı köpürme süreleri denenmiş ve 9 dakikanın en uygun süre olduğu belirlenmiştir. Üretim süreci Şekil 4.5'te gösterilen aşamaları içermektedir.

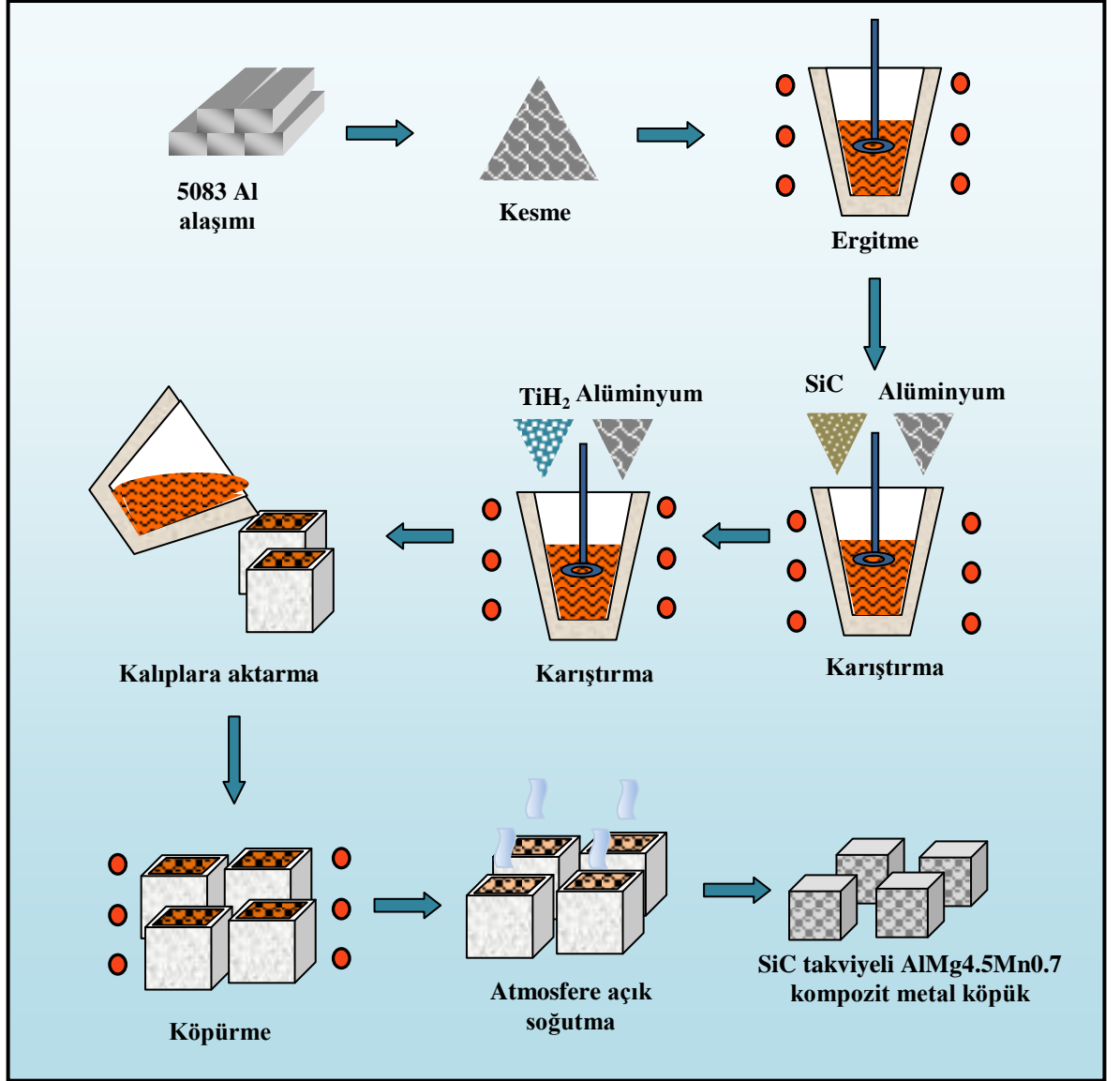


(a)



(b)

Şekil 4.4 AlMg4.5Mn0.7 yarı katı sıcaklık aralığı. (a) Katı+sıvı bölgesi sıcaklık alt sınır değeri, (b) Katı+sıvı bölgesi sıcaklık üst sınır değeri (1)



Şekil 4.5 Kompozit metal köpük üretim aşamaları

Takviye boyutu ve miktarı değiştirilerek çeşitli deneyler yapılmıştır. Tablo 4.8'de tüm denemeler görülmektedir.

Tablo 4.8 Deney matrisi

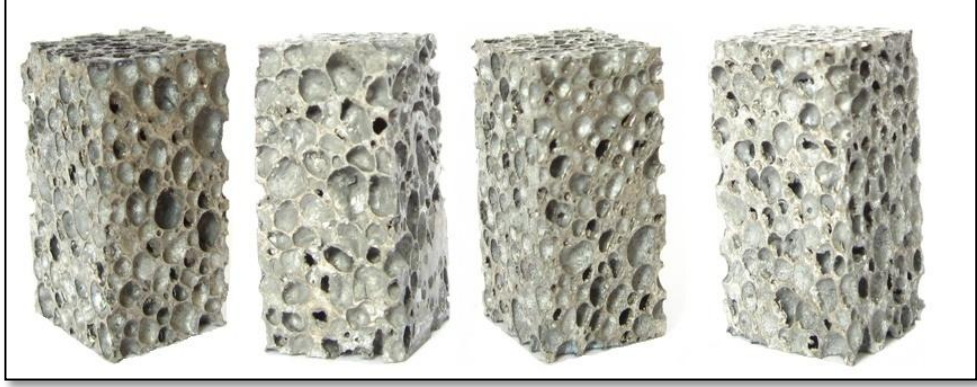
Deney No	Malzeme	Ağırlıkça % TiH ₂	SiCp boyutu	Ağırlıkça % SiCp takviye oranı
1	EN AW 5083	0,5	-	0
2	EN AW 5083	0,5	12μ	5
3	EN AW 5083	0,5	12μ	10
4	EN AW 5083	0,5	12μ	15
5	EN AW 5083	0,5	12μ	20
6	EN AW 5083	0,5	1μ	5
7	EN AW 5083	0,5	1μ	10
8	EN AW 5083	0,5	1μ	15
9	EN AW 5083	0,5	1μ	20



Şekil 4.6 Üretilen kompozit metal köpük malzemeler

4.1.5 Numune hazırlama

Basma numuneleri Metkon Micracut 200 hassas kesme cihazında hazırlanmıştır. Numune boyutları (15x15x30) mm'dir. Her deney seti için 6 adet basma numunesi çıkarılmıştır. (Şekil 4.7)



Şekil 4.7 Basma numuneleri

4.2. Karakterizasyon

4.2.1 Yoğunluk Tespiti

Üretilen kompozit metal köpüklerden elde edilen basma numunelerinin yoğunlukları Arşimed prensibine göre belirlenmiştir. 1/1000 gr hassasiyetli tartı kullanılarak havada ve saf su içindeki ağırlıklar tespit edilmiş, havadaki ağırlıklardan sudaki ağırlıklar çıkarılarak hacimler hesaplanmıştır.

4.2.2 Mikro yapı analizleri

Üretilen takviyesiz metal köpük ve kompozit metal köpük malzemelerin mikro yapı SEM analizleri, Tübitak-MAM'da Jeol JSM-6335F Field Emission Scanning Electron Microscope cihazı kullanılarak yapılmıştır.

4.2.3 Basma Deneyleri

Basma deneyleri Instron 8501 universal test makinesinde (Şekil 4.8) gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler köpürme yönünde 5 mm/dk ilerleme hızında %70 şekil değişimine kadar uygulanmıştır.

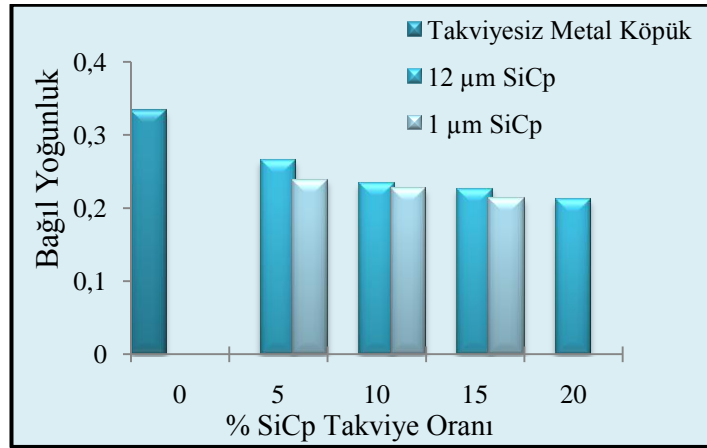


Şekil 4.8 Basma deney düzeneği

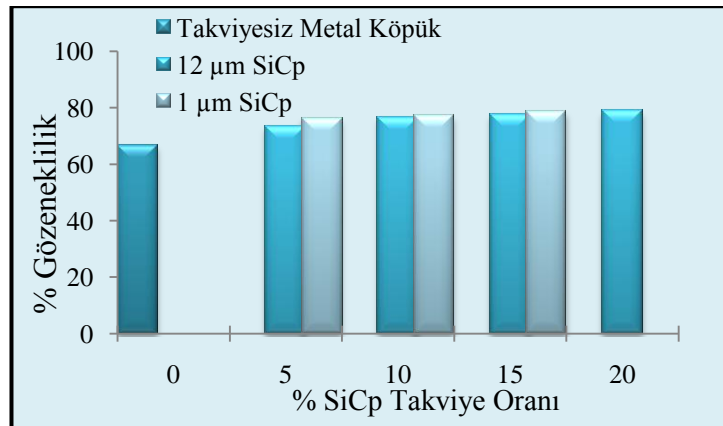
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

5.1 Yoğunluk, Hücre Boyutu ve Dağılımı

Yoğunluk köpüğün lineer genişleme miktarına, hücre yapısı ve dağılımına, gözeneklilik oranına bağlı olarak değişir. Aynı zamanda üretimin yapıldığı sıcaklık ve köpürme süresi, üretilen köpüğün yoğunluğu üzerinde oldukça etkilidir. 750 °C’de 9 dakika köpürme süresiyle üretilen farklı takviye boyutu ve oranlarında metal köpük malzemelerin Arşimed prensibine göre belirlenen yoğunluklarının takviye oranının artması ve takviye boyutunun küçülmesi ile azaldığı (Şekil 5.1) buna karşılık gözenekliliğin arttığı (Şekil 5.2) görülmüştür.



Şekil 5.1 Takviye oranı – bağıl yoğunluk değişimi



Şekil 5.2 Takviye oranı - gözeneklilik değişimi

Kompozit malzeme üretiminde takviye oranı arttıkça malzemenin yoğunluğunun arttığı bilinmektedir. (Ürkmez, 2004) Bu sebeple takviye oranı - yoğunluk grafiğinin yerine bağıl yoğunluğun değişiminin incelenmesi takviye oranının köpürme davranışına etkisini anlamada faydalı olacaktır. Takviye oranı ile gözeneklilik doğru orantılıdır ve takviye oranı arttıkça gözeneklilik artar.



(a)



(b)

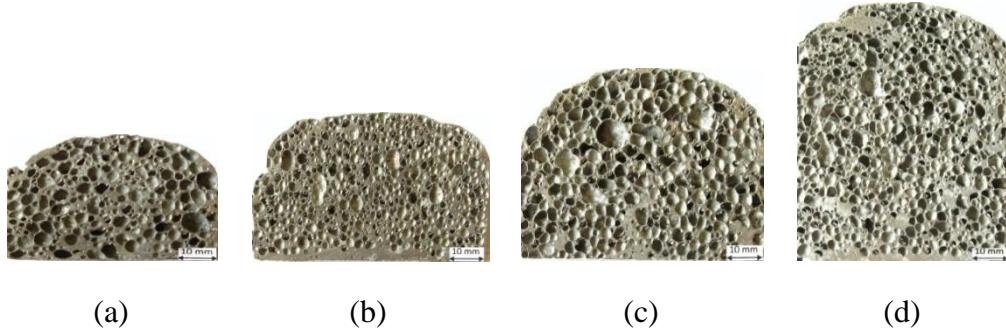


(c)

Şekil 5.3 Farklı köpürme süreleri ile üretilen %10 takviyeli kompozit metal köpük

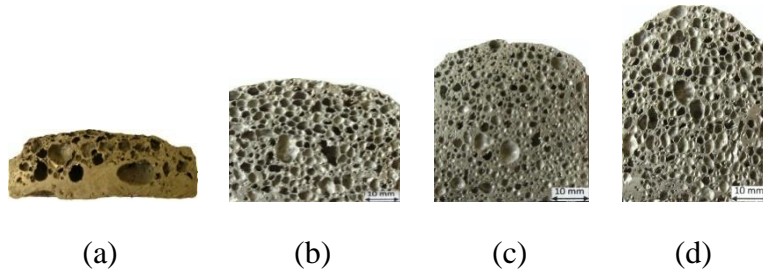
Köpürme süresinin gözenek boyutu ve dağılımına etkisini incelemek ve en iyi dağılım için gereken süreyi belirlemek amacıyla farklı sürelerde köpürtme işlemi denemiştir ve gözenek boyutu ve dağılımının köpürtme süresiyle yakından ilişkili olduğu görülmüştür. Ergiyik karışımı fırın içinde bekletme süresi arttıkça gözeneklerin büyüdüğü ve gözenekliliğin arttığı görülmüştür. (Şekil 5.3)

Yarı katı karıştırma yöntemiyle farklı oranlarda SiC takviyeli kompozit metal köpük üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Takviyesiz köpük üretiminde hücre dağılımı kontrolü sağlanamamış ve düzgün dağılıma sahip olmayan gözenek yapısı elde edilmiştir. SiC takviyesi genel olarak hücre stabilizasyonuna yardımcı olmuştur. Takviye oranı arttıkça gözenekler küçülmüş çok daha düzgün dağılımlı bir yapı elde edilmiştir. Lineer genişleme açısından bir karşılaştırma yapıldığında takviye oranındaki artışın lineer genişlemeye olumlu yönde etki yaptığı saptanmıştır. (Şekil 5.4 – Şekil 5.5)



Şekil 5.4 Farklı oranlarda SiCp (12µm) takviye ile üretilmiş metal köpükler

(a) %5, (b) %10, (c) %15, (d) %20

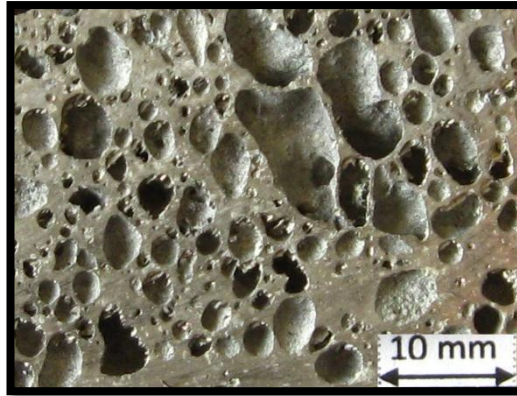


Şekil 5.5 Farklı oranlarda SiCp (1µm) takviye ile üretilmiş metal köpükler

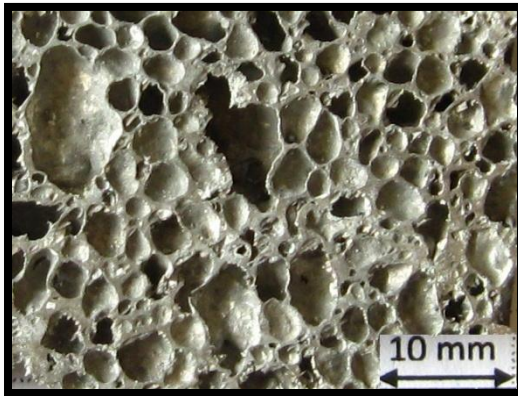
(a) %0, (b) %5, (c) %10, (d) %15

Takviyesiz olarak üretilen metal köpük malzeme (Şekil 5.6), takviyeli köpük malzemelere göre daha düşük bir lineer genişleme göstererek yaklaşık 3 kat kabarmıştır ve yapıda yer yer çok iri gözenekler oluşmuştur. Gözenek boyutlarının ve dağılımının düzensiz olduğu ve numune tabanında ve köpük yapısı içinde önemli miktarda drenaj tabakası olduğu gözlenmiştir.

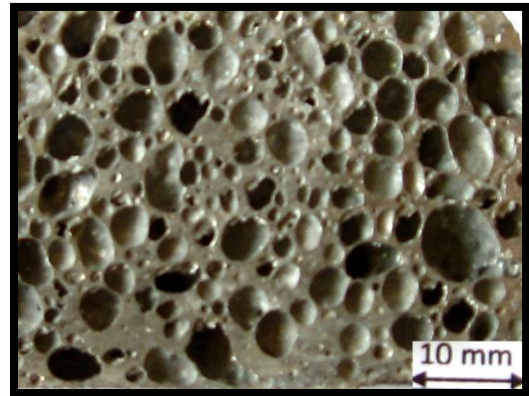
Ağırlıkça %5 SiCp takviye ile üretilen metal köpük numunelerde bazı bölgelerde fazla büyümüş hücreler saptanmış olsa da takviyesiz köpükle kıyaslandığında gözenek dağılımı daha düzenlidir. Farklı boyutta ağırlıkça %5 SiCp takviye ile yapılan deneylerde parçacık boyutu küçük ($1\mu\text{m}$) olan takviyeli metal köpük numuneler (Şekil 5.7) 4.5 kat kabarıırken, parçacık boyutu büyük ($12\mu\text{m}$) olan köpük numunelerde (Şekil 5.8) 4 kat kabarma görülmüştür. Drenaj miktarları takviyesiz köpüğe kıyasla daha azdır. $12\mu\text{m}$ boyutundaki takviye ile üretilen köpük numunelerde hücre dağılımı daha iyi ve büyük gözenek sayısı daha azdır.



Şekil 5.6 Takviyesiz AlMg4.5Mn0.7

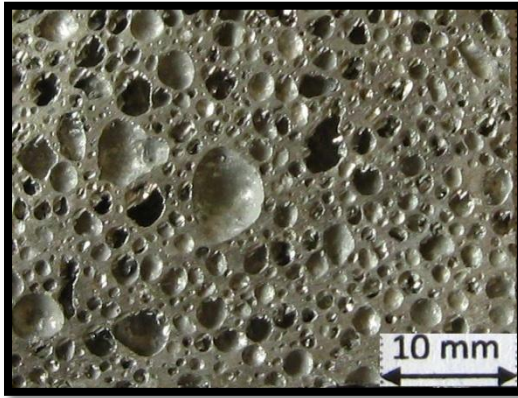


Şekil 5.7 %5 SiCp($1\mu\text{m}$) takviyeli

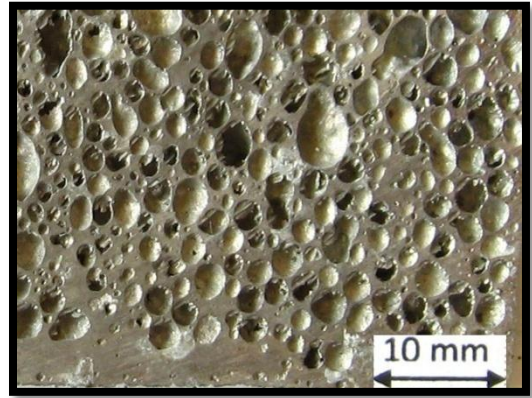


Şekil 5.8 %5 SiCp($12\mu\text{m}$) takviyeli

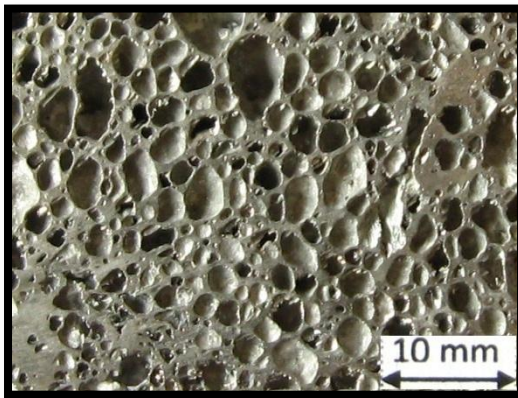
Ağırlıkça %10 SiCp takviyeli her iki grupta da gözenekler belirgin olarak küçülmüştür. 12 μ m boyutunda SiCp ile üretilen köpük numunelerde (Şekil 5.9) bir miktar drenaj tabakası gözlenirken, 1 μ m boyutunda SiCp ile üretilen köpük numunelerde (Şekil 5.10) neredeyse hiç drenaj tabakasına rastlanmamış az miktarda büyük gözenek oluşumu görülmüştür. 1 μ m boyutunda SiCp ile üretilen köpük numunelerin tane büyüklükleri daha küçük olmakla birlikte hücre duvar dayanımlarının düşük olması nedeniyle gözenek birleşmesinin ortaya çıktığı görülmüştür. 1 μ m boyutunda SiCp ile üretilen köpük numunelerde 4.5 kat kabarma görülürken 12 μ m boyutunda SiCp ile üretilen köpük numunelerde 5.5 kat kabarma olduğu görülmüştür. (Şekil 5.9 – Şekil 5.10)



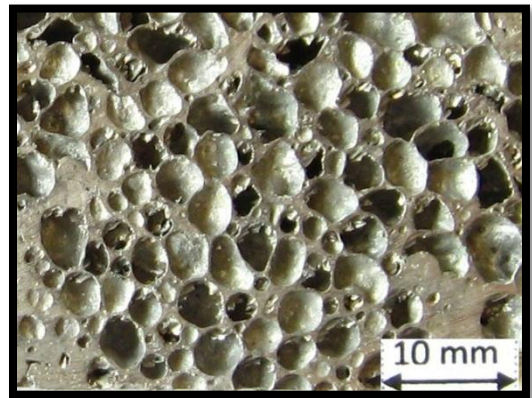
Şekil 5.9 %10 SiCp(1 μ m) takviyeli



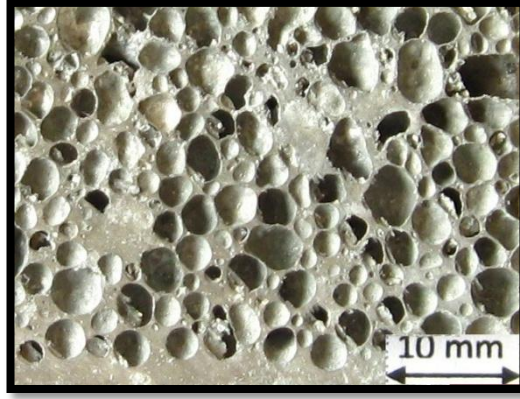
Şekil 5.10 %10 SiCp(12 μ m) takviyeli



Şekil 5.11 %15 SiCp(1 μ m) takviyeli



Şekil 5.12 %15 SiCp(12 μ m) takviyeli



Şekil 5.13 %20 SiCp(12 μ m) takviyeli

Ağırlıkça %15 takviyeli grup numuneler %10 takviyeli grup numunelere göre daha büyük gözeneklere sahiptir. Takviye miktarının artmasıyla hücre dağılımının ve boyutunun kontrol altına alınabileceği düşünülse de pratikte takviye miktarındaki artış köpüğün lineer genişmesini olumlu yönde etkilediği için ağırlıkça %10 takviyeye oranla daha büyük gözenekler oluşmasına neden olmuştur. Ağırlıkça %15 takviyeli köpüklerde her iki parçacık boyutuna ait grupta da tabanda drenaj tabakası oluşmazken köpük hacmi içinde bazı bölgelerde sıvılaşmadan kaynaklanan küçük miktarlarda drenaja rastlanmıştır. 1 μ m boyutlu takviye ile üretilen köpük numunelerde kabarma miktarı 4.5 kat iken 12 μ m boyutlularda yaklaşık 5 kattır. (Şekil 5.11 - Şekil 5.12)

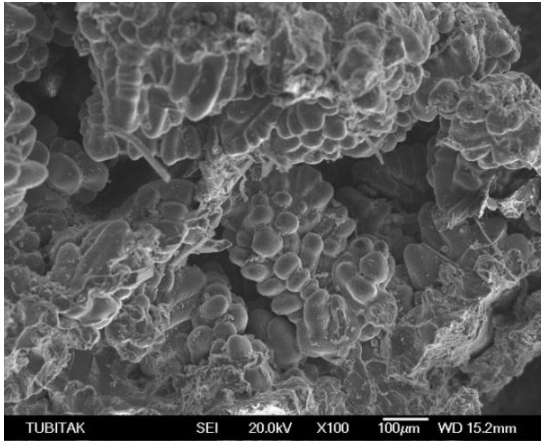
Takviye miktarının artmasıyla üretim sürecinde takviye tozlarının ergiyik içine karıştırılması zorlaşmış, 1 μ m boyutlu takviye tozları ile yüksek takviye oranlarına ulaşmak mümkün olmamıştır. Ağırlıkça %20 oranında 1 μ m boyutlu takviye ile yapılan deneylerde takviyenin topaklanması, ergiyik içine karışmaması, pota tabanında veya metalin üstünde birikmesi gibi problemler ortaya çıkmıştır. Takviye tozları ergiyik üzerinde toplanmış ve köpürtücü ajanın ergiyik içine karıştırılması sürecini de zorlaştırmıştır. Bu sebeple 1 μ m boyutunda SiCp ile ağırlıkça %20 takviye oranına sahip köpük numune üretiminde başarı sağlanamamıştır.

12 μ m boyutlu takviye kullanılarak üretilen ağırlıkça %20 takviyeli köpükte tabanda drenaj tabakası oluşmamasına karşın köpük hacmi içinde bazı bölgelerde az miktarda drenaj tabakasına rastlanmıştır. (Şekil 5.13) Gözenek boyutları, ağırlıkça %15 takviyeli grupla benzerlik göstermiş ancak genel olarak gözenek dağılımının %15

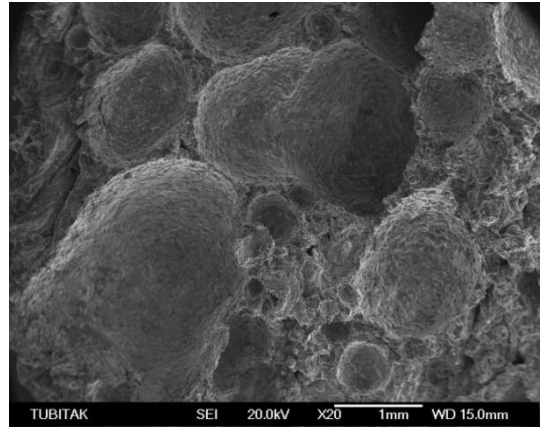
takviyeli gruptan daha homojen olduğu gözlenmiştir. Köpük yapısı içinde aşırı büyümüş gözeneklere rastlanmamış ve SiCp takviye miktarının gözenek boyutuna sınırlama getirdiği gözlenmiştir. Takviye parçacıkları gözeneklerin etrafında, hücre duvarlarında toplanarak gözeneklerin aşırı büyümesini ve birbirleri ile birleşmesini engellemiştir. (Esmaelzadeh, vd., 2006)

5.2 Mikro yapı ve görüntü analizi

Şekil 5.14' de ağırlıkça %0.5 TiH₂ kullanılarak üretilmiş 5083 alüminyum metal köpüğün elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. (a) görüntüsünde 100 büyütme ile yapılan incelemede metal içinde oluşan küçük gözenekler görülmektedir. Takviyesiz alüminyum köpüğün hücre duvarlarında oluşan küçük gözeneklerin boyutlarının yaklaşık 50-60µm olduğu görülmektedir. 20 büyütme ile elde edilen (b) görüntüsünde küçüklü büyüklü çok sayıda gözenek dikkat çekmektedir.

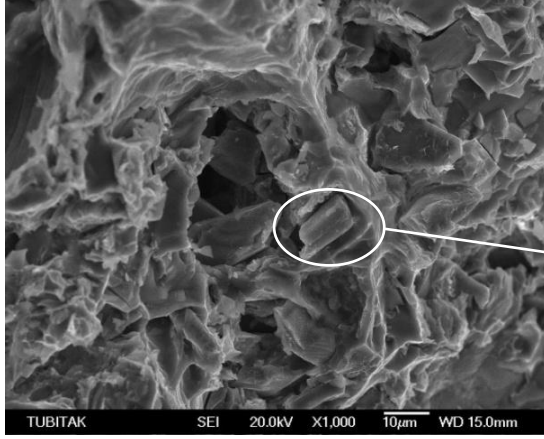


(a)

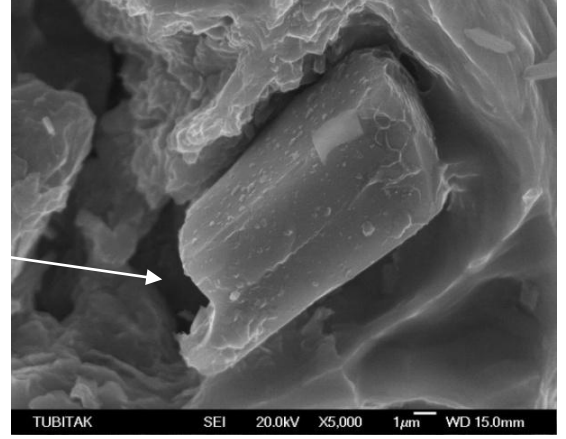


(b)

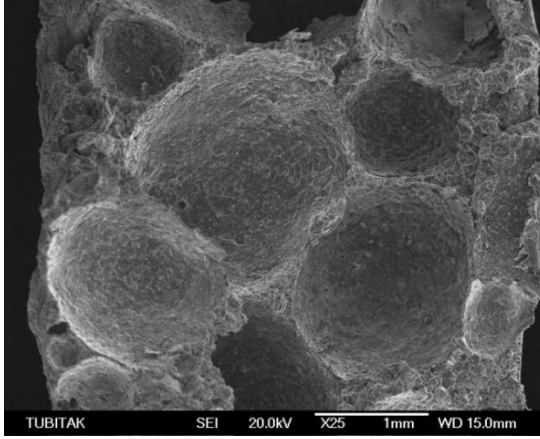
Şekil 5.14 5083 alüminyum köpük



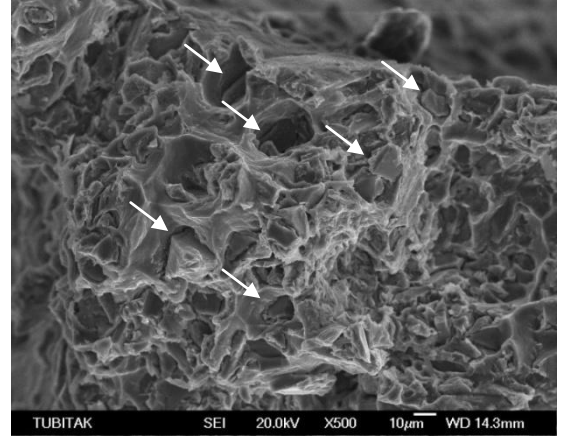
(a)



(b)



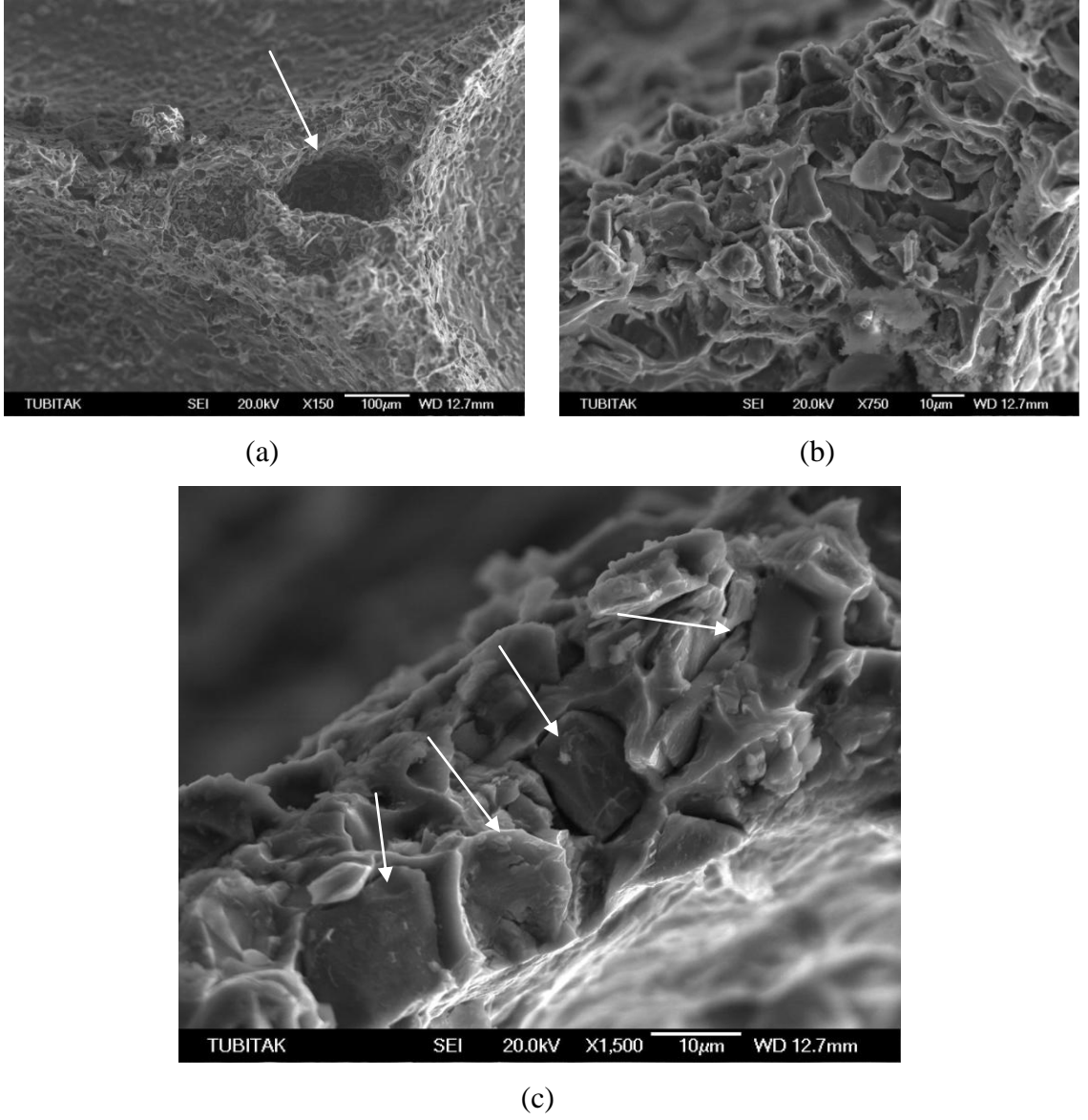
(c)



(d)

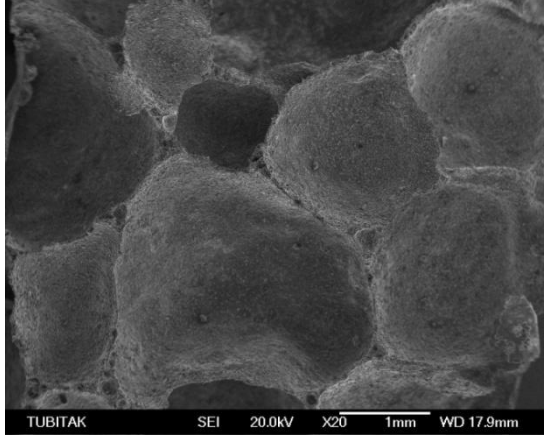
Şekil 5.15 Ağırlıkça %10 SiCp (12µm) takviyeli kompozit metal köpük

Şekil 5.15’de ağırlıkça %10 SiCp (12µm) takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit metal köpük görülmektedir. Hücre büyüklükleri takviyesiz köpüğe oranla daha düzgün bir dağılıma sahiptir, gözenek duvar kalınlıklarının yaklaşık 100µm’dir. SiCp takviye tozlarının matris malzemesi içine düzgün dağıldığı ve matris tarafından iyi bir şekilde sarıldığı görülmektedir.

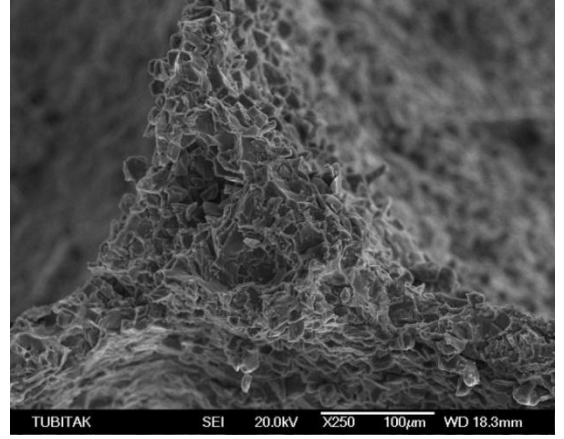


Şekil 5.16 Ağırlıkça %15 SiCp (12µm) takviyeli kompozit metal köpük

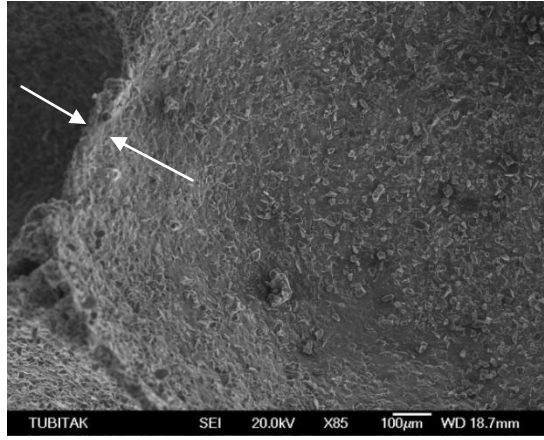
Şekil 5.16'da ağırlıkça %15 SiCp (12µm) takviyeli kompozit metal köpük görülmektedir. (a) resminde üç gözeneği birleştiren gözenek duvarı içinde oluşan küçük bir gözenek dikkat çekmektedir. Hücre duvar kalınlığı yaklaşık 60µm'dir. SiCp takviye tozları matris malzemesi tarafından tamamen sarılmıştır.



(a)



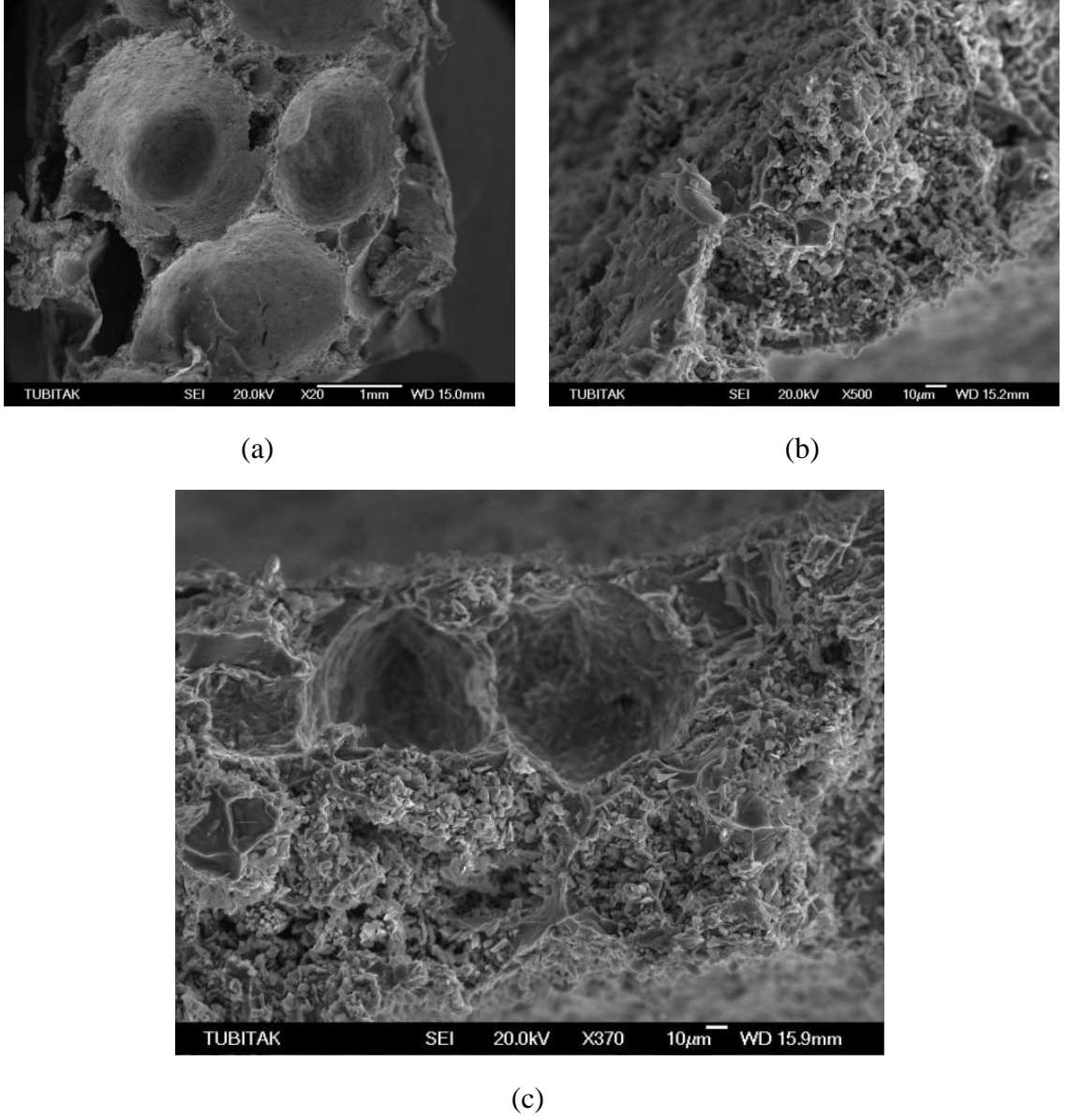
(b)



(c)

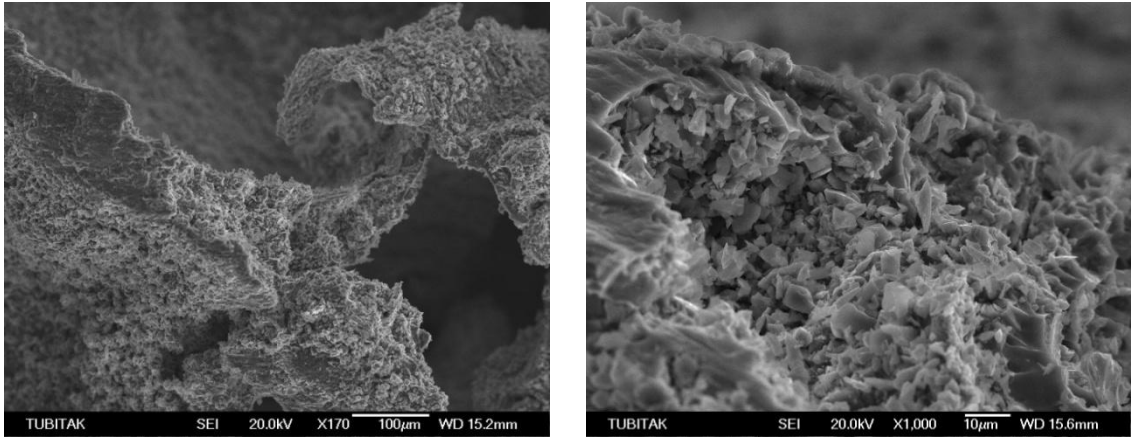
Şekil 5.17 Ağırlıkça %20 SiCp (12µm) takviyeli kompozit metal köpük

Şekil 5.17'de ağırlıkça %20 SiCp (12µm) takviyeli kompozit metal köpük görülmektedir. (c) resminde SiCp tanelerinin hücre duvarlarında daha yoğun olmakla birlikte gözenek içlerinde de düzgün dağıldığı görülmektedir. Hücre duvar kalınlığı yaklaşık 50µm'dir.



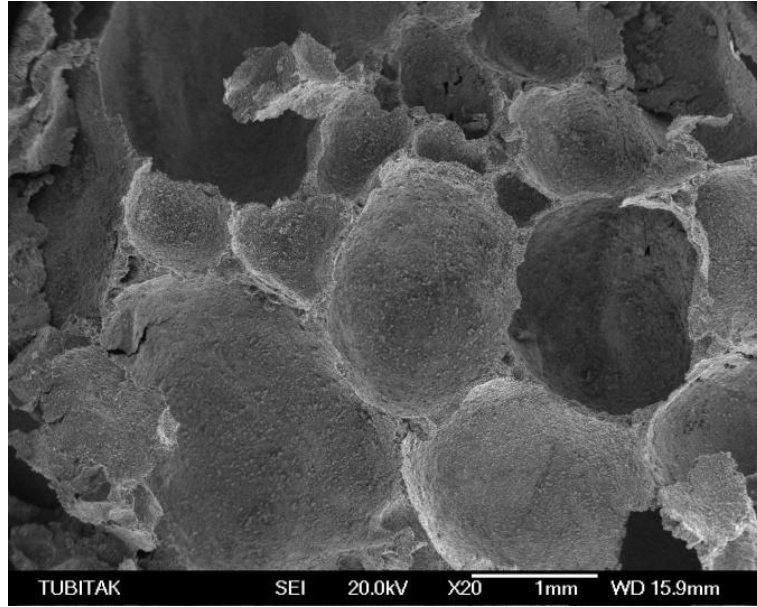
Şekil 5.18 Ağırlıkça %10 SiCp (1 μ m) takviyeli kompozit metal köpük

Şekil 5.18’de ağırlıkça %10 SiCp (1 μ m) takviyeli kompozit metal köpük görülmektedir. Hücre duvarları içinde oluşan gözenekler dikkat çekerken, ortalama 1 μ m boyutlu SiCp tozlarının 12 μ m boyutlu SiCp tozları kadar düzgün dağılım göstermediği ve matris malzemesi içine gömülmediği gözlenmiştir. Hücre duvar kalınlığının yaklaşık 120 μ m olduğu görülmektedir.



(a)

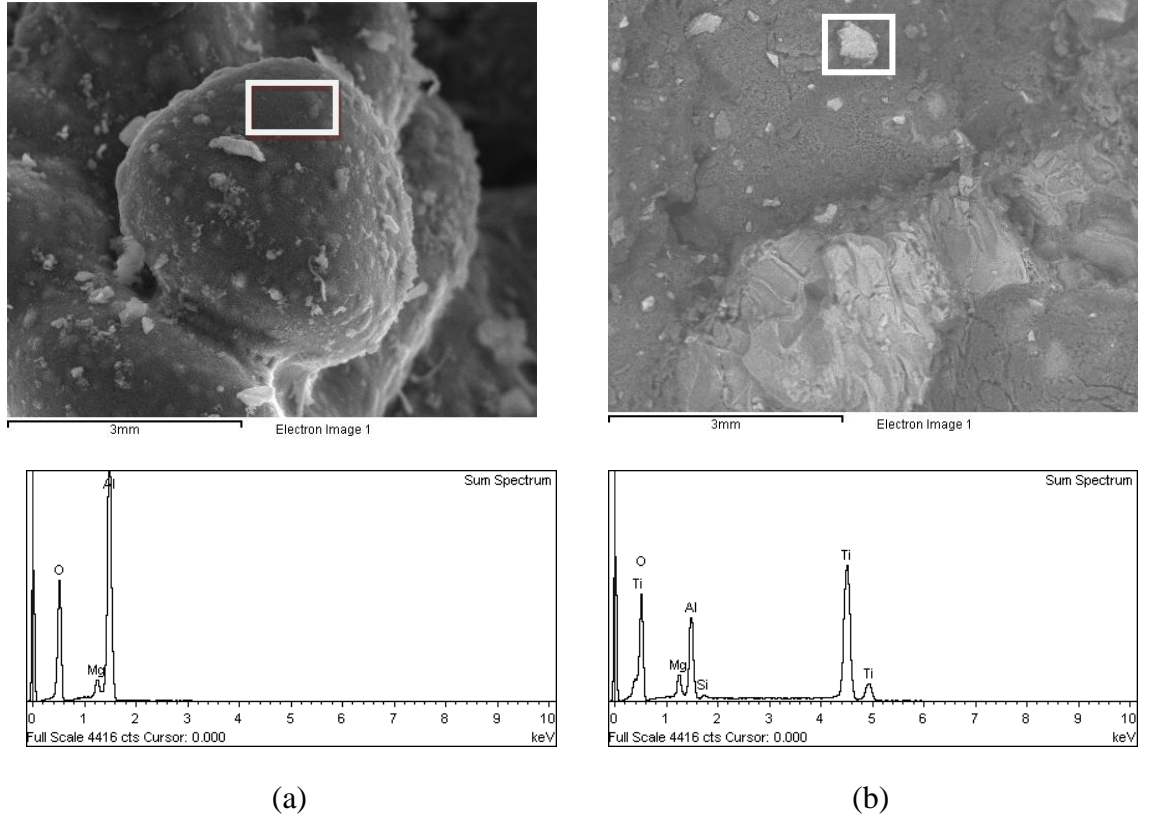
(b)



(c)

Şekil 5.19 Ağırlıkça %15 SiCp (1µm) takviyeli kompozit metal köpük

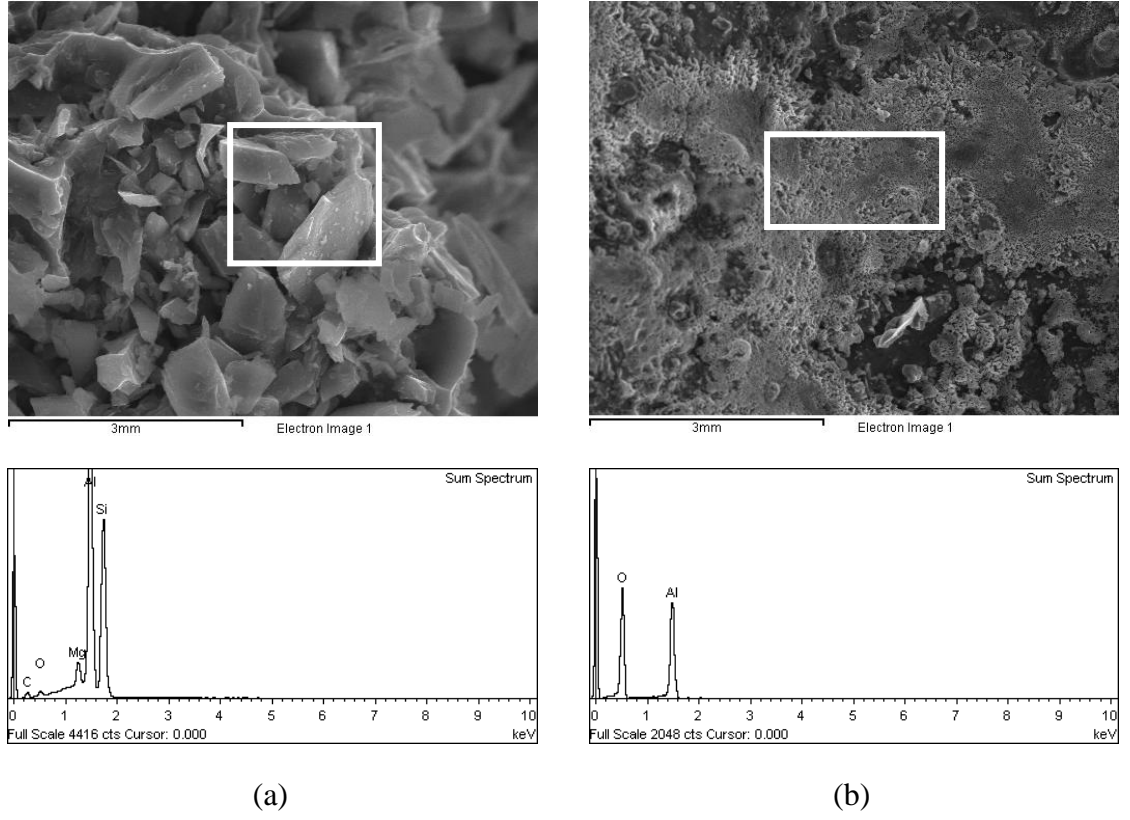
Şekil 5.19’da ağırlıkça %15 SiCp (1µm) takviyeli kompozit metal köpük görülmektedir. 1µm boyutunda %10 SiCp takviyeli numunelerde olduğu gibi SiCp tozlarının malzemenin yüzeyinde kaldığı, düzgün dağılım göstermediği gibi topaklanmalar oluşturduğu ve matris malzemesi içine gömülmediği gözlenmiştir. Hücre duvar kalınlıklarının yaklaşık 70µm olduğu görülmektedir.



	Bileşik konsantrasyonu %				
	O	Mg	Al	Si	Ti
(a)	41,16	3,48	55,36	-	-
(b)	26,05	1,49	5,73	0,22	66,51

Şekil 5.20 Takviyesiz AlMg4.5Mn0.7 alüminyum köpüğün EDS analiz sonuçları

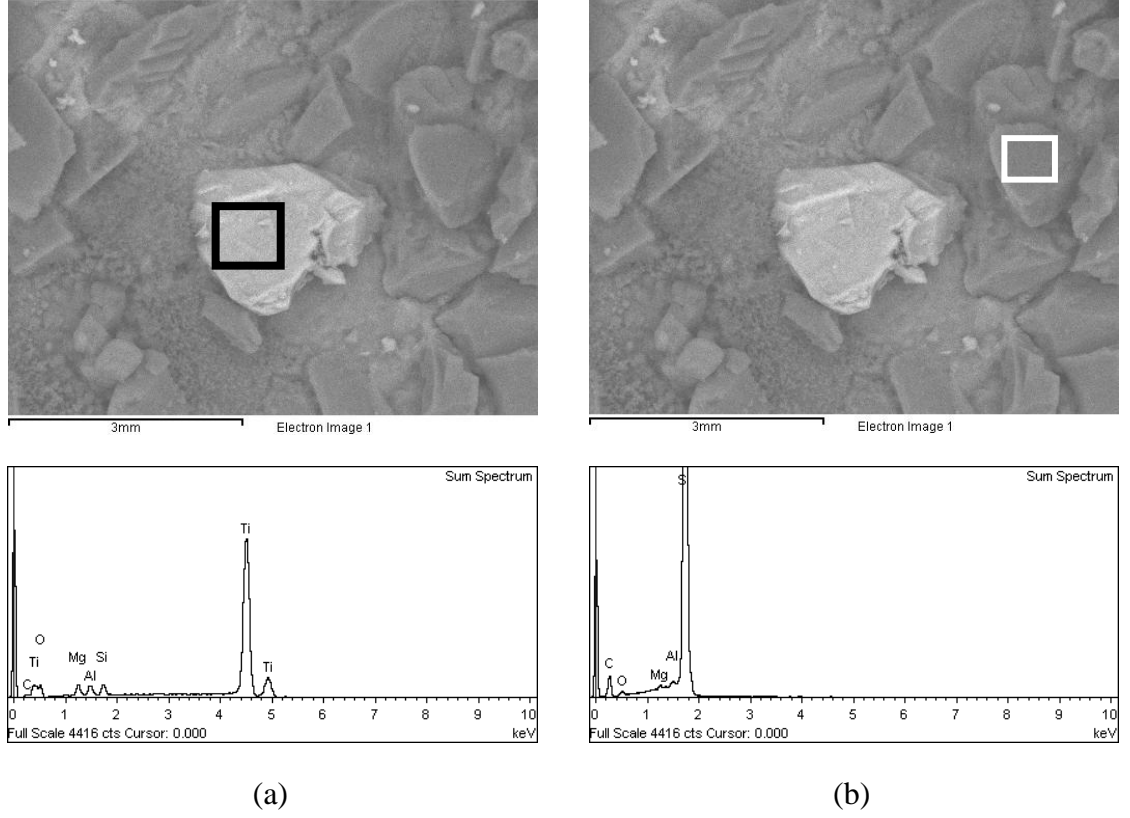
Takviyesiz AlMg4.5Mn0.7 alüminyum köpüğün EDS analiz sonuçları incelendiğinde Şekil 5.20- (a)'da oksijen yoğunluğu görülmektedir. Bu kısımda Al_2O_3 bileşiği oluşma ihtimali üzerinde durulabilir. Şekil 5.20- (b)'de görülen analizde ise seçili bölgede TiH_2 bileşiğinin hidrojen saldıktan sonra oksijenle birleşerek TiO_2 oluşturmuş olması muhtemeldir.



Bileşik konsantrasyonu %					
	C	O	Mg	Al	Si
(a)	6,71	1,87	3,18	47,54	40,70
(b)	-	59,80	-	40,20	-

Şekil 5.21 Ağırlıkça %15 SiCp (1 μ m) takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit köpüğün EDS analiz sonuçları

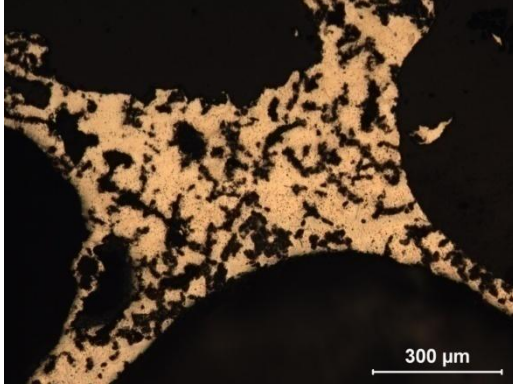
Ağırlıkça %15 SiCp (1 μ m) takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit köpüğün EDS analiz sonuçları incelendiğinde Şekil 5.21-(b)'de Al ve O varlığı fazla olduğundan Al₂O₃ oluştuğunu düşünmek mümkündür.



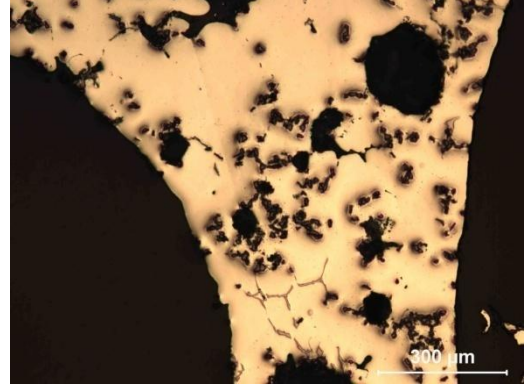
	Bileşik konsantrasyonu %					
	C	O	Mg	Al	Si	Ti
(a)	0,26	4,22	0,88	0,84	1,05	92,75
(b)	21,82	1,74	0,42	0,69	75,32	-

Şekil 5.22 Ağırlıkça %20 SiCp (12µm) takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit köpüğün EDS analiz sonuçları

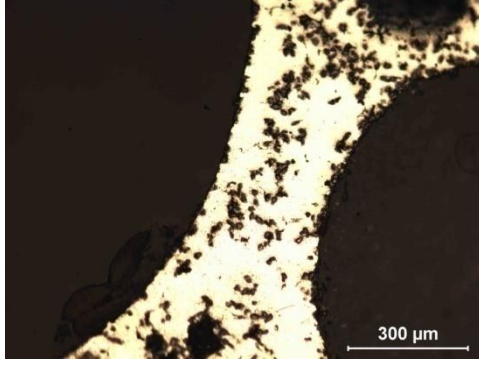
Ağırlıkça %20 SiCp (12µm) takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit köpüğün EDS analiz sonuçları incelendiğinde Şekil 5.22-(a)'da yoğun Ti varlığı ile bu bölgede TiH₂'nin bulunduğu ve Hidrojen gazı saldıktan sonra oksitlendiği tahmin edilebilir. Şekil 5.22-(b)' de ise bir SiCp taneciği görülmektedir.



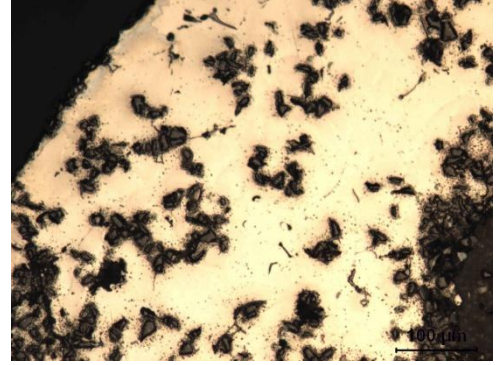
Şekil 5.23 Takviyesiz köpük mikro yapı görüntüsü



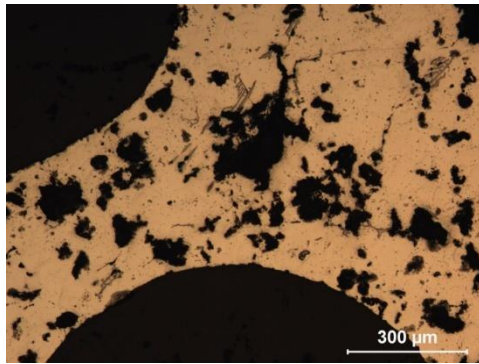
Şekil 5.24 12µm % 10 SiCp takviyeli köpük mikro yapı görüntüsü



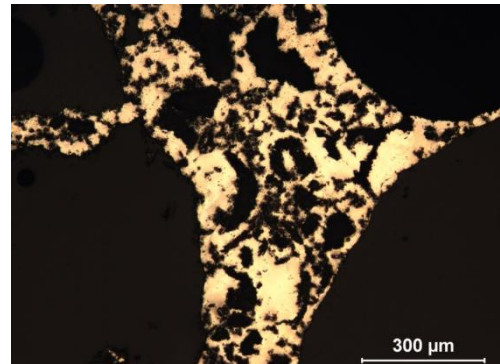
Şekil 5.25 12µm % 15 SiCp takviyeli köpük mikro yapı görüntüsü



Şekil 5.26 12µm % 20 SiCp takviyeli köpük mikro yapı görüntüsü



Şekil 5.27 1µm % 10 SiCp takviyeli köpük mikro yapı görüntüsü

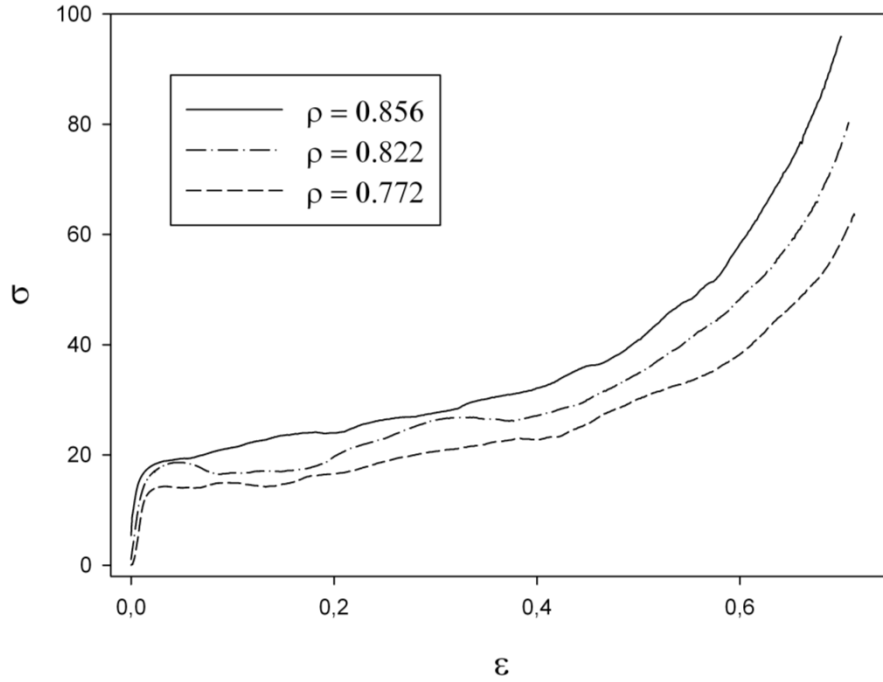


Şekil 5.28 1µm % 15 SiCp takviyeli köpük mikro yapı görüntüsü

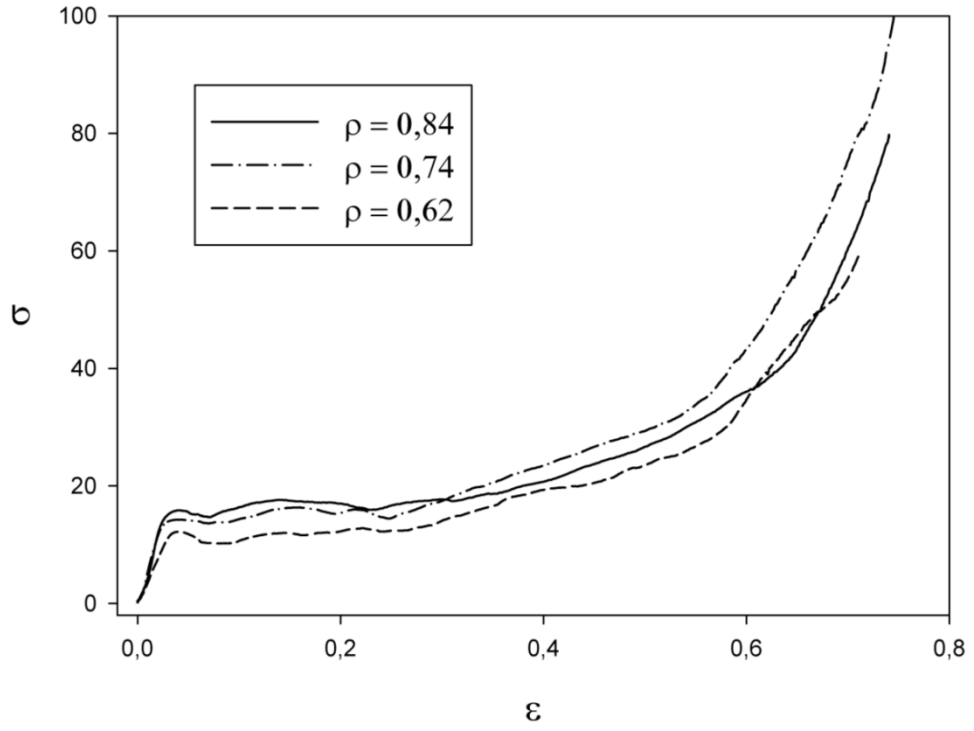
Şekil 5.23-5.28 resimlerinde farklı takviye boyutları ve oranlarında mikro yapı görüntüleri görülmektedir. Yüksek takviye oranlarında azalmakla beraber hemen hemen her takviye oranı ve boyutunda hücre duvarlarında mikro çatlaklar ve mikro boyutta gözenekler oluştuğu görülmektedir.

5.3 Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi

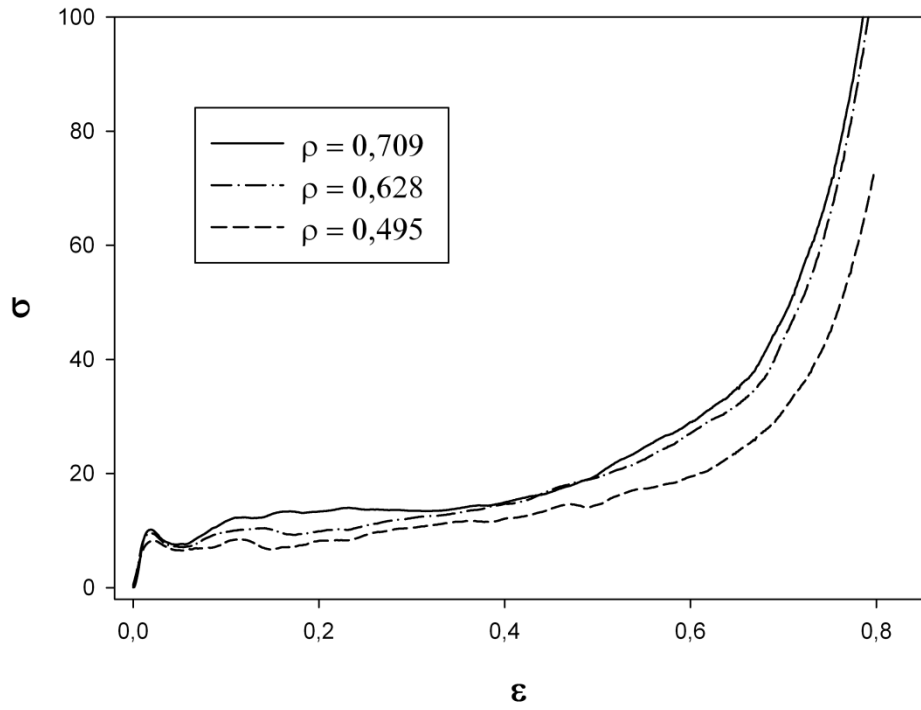
AlMg4.5Mn0.7 alüminyum alaşımından takviyeli ve takviyesiz olarak üretilen metal köpüklere uygulanan basma deneyi sonucunda, artan takviye oranıyla plato gerilmesinin azaldığı tespit edilmiştir. Takviye oranındaki artışla birlikte köpüğün yoğunluğunun azaldığı belirlenmiştir. Yoğunluğun azalması plato gerilmesinin düşmesine sebep olmuştur. Aynı bağıl yoğunluğa sahip numuneler incelendiğinde artan takviye oranıyla plato gerilmesi yükselmiştir. (Şekil 5.29 – Şekil 5.36)



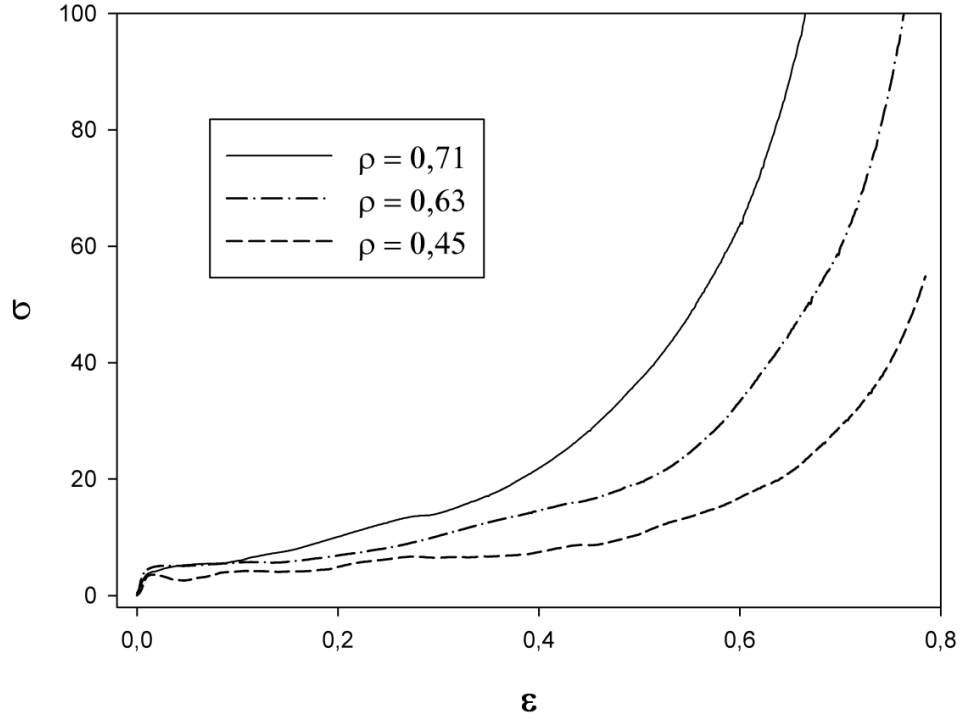
Şekil 5.29 Farklı yoğunluklarda takviyesiz AlMg4.5Mn0.7 alüminyum köpük gerilme-geçirgenleme diyagramı



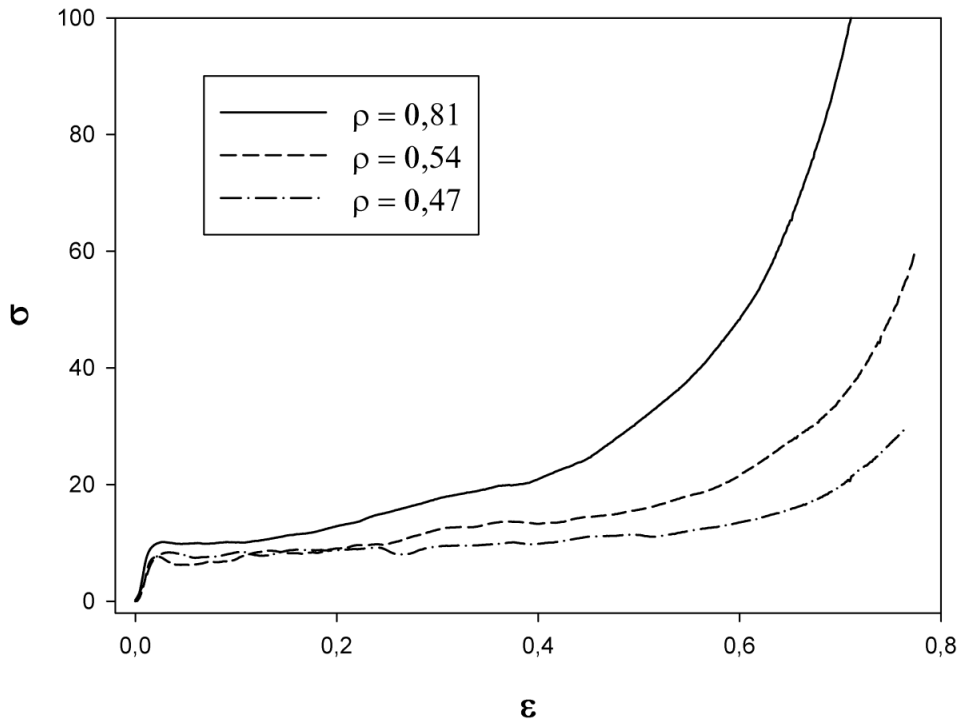
Şekil 5.30 Farklı yoğunluklarda ağırlıkça %5 SiCp (12µm) takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit metal köpük gerilme-gerilme diyagramı



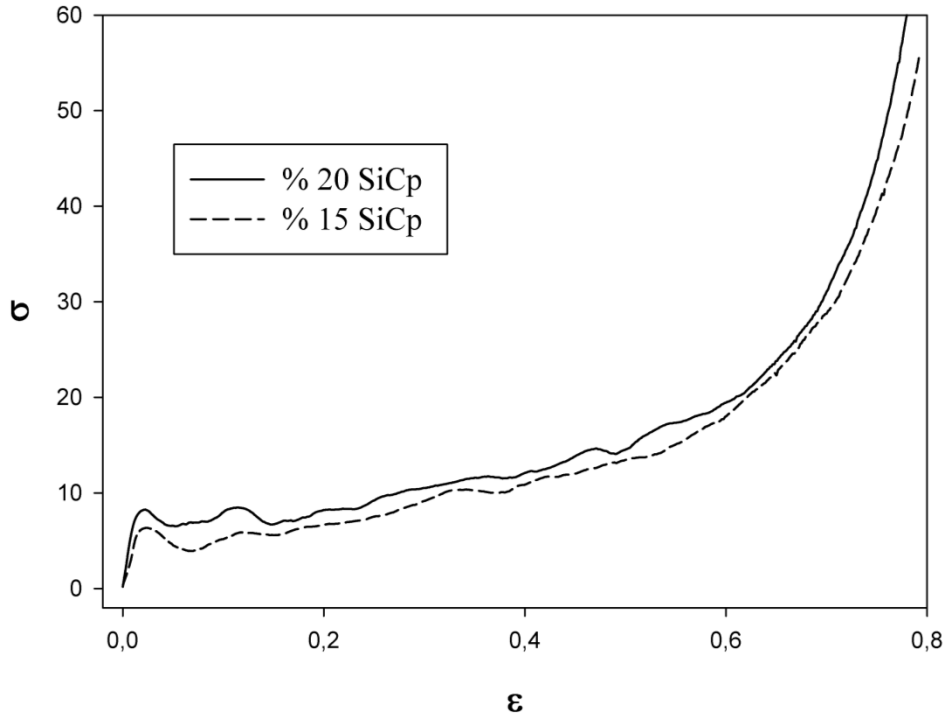
Şekil 5.31 Farklı yoğunluklarda ağırlıkça %20 SiCp (12µm) takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit metal köpük gerilme-gerilme diyagramı



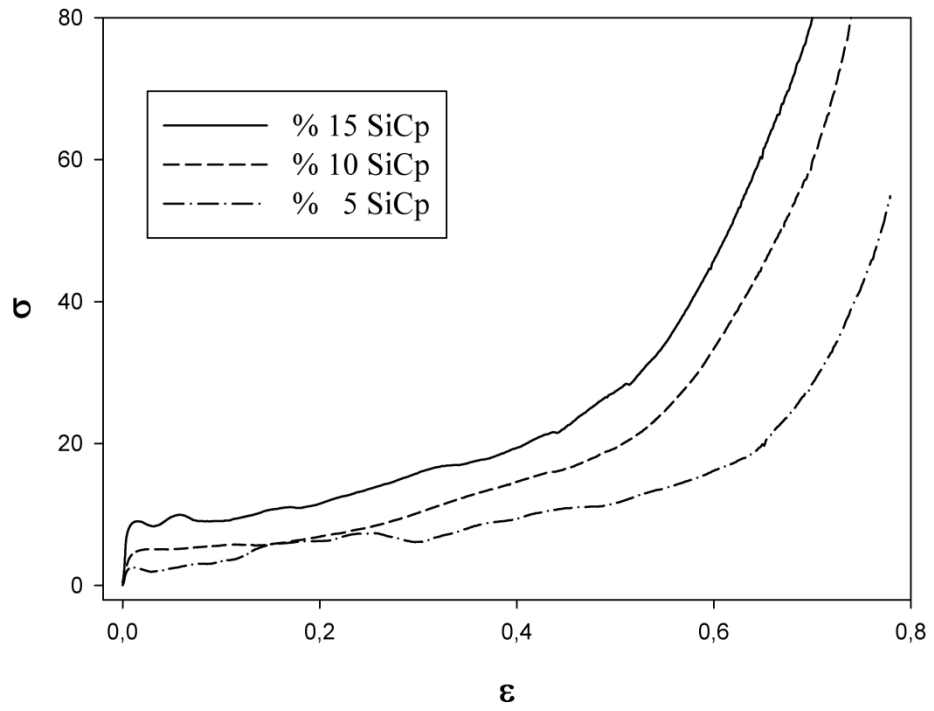
Şekil 5.32 Farklı yoğunluklarda ağırlıkça %5 SiCp (1 μ m) takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit metal köpük gerilme-genleme diyagramı



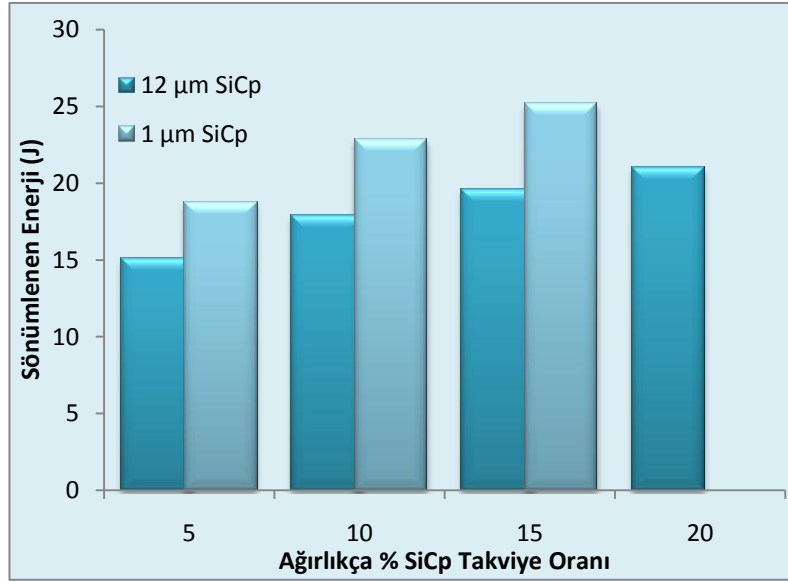
Şekil 5.33 Farklı yoğunluklarda ağırlıkça %15 SiCp (1 μ m) takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit metal köpük gerilme-genleme diyagramı



Şekil 5.34 Aynı bağıl yoğunluktaki ($\rho = 0,49$) ağırlıkça %20 ve %15 SiCp ($12 \mu\text{m}$) takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit metal köpüklerin gerilme-genleme diyagramları



Şekil 5.35 Aynı bağıl yoğunluktaki ($\rho = 0,58$) ağırlıkça %15, %10 ve %5 SiCp ($1 \mu\text{m}$) takviyeli AlMg4.5Mn0.7 kompozit metal köpüklerin gerilme-genleme diyagramları



Şekil 5.36 %40 Birim şekil değiştirme değerine kadar sönümlenen enerji

%40 şekil değişimine kadar sönümlenen enerjinin takviye oranı ile değişimi incelendiğinde takviye boyutu küçüldükçe ve takviye oranı arttıkça sönümlenen enerji miktarının arttığı görülmüştür. Küçük boyutlu takviye kullanılarak üretilen kompozit köpüklerin daha yüksek enerji sönümleme kabiliyetine sahip olduğu anlaşılmıştır. Diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi enerji sönümleme yeteneği yine köpüğün yapısı ile yakından ilişkilidir. Başta bağıl yoğunluk olmak üzere hücre boyutu ve dağılımı, hücre duvar kalınlıkları, hücre şekilleri ve gözeneklilik gibi pek çok faktör enerji sönümleme yeteneği üzerinde etkilidir.

6.SONUÇLAR

Bu çalışmada AlMg4.5Mn0.7 alüminyum alaşımı SiCp tozları ile takviye edilmiş ve köpürtücü ajan olarak TiH₂ kullanılarak kompozit metal köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Takviye boyutundaki ve takviye oranındaki değişimin metal köpüğün mekanik özelliklerine etkisi basma deneyi uygulanarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Yarı katı sıcaklık aralığında alüminyum alaşımına takviye ve köpürtücü ajan eklenerek kompozit metal köpük üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Takviye ve köpürtücü ajan tozlarının alüminyum içine karıştırılma problemi yarı katı sıcaklık aralığında sağlanan viskoz yapı sayesinde büyük oranda aşılmıştır. Gözenek yapısı ve boyutları incelendiğinde takviye tozlarının ve köpürtücü ajanın köpük içinde düzgün dağılımının sağlandığı görülmüştür.
2. Takviye oranındaki artışla birlikte metal köpüğün lineer genleşme miktarı artmıştır. Artan takviye oranıyla birlikte metal köpük yapısı içinde gözenek boyutları küçülmüş ve gözenekler köpük içinde düzgün dağılım sergilemiştir. Takviye boyutunun küçülmesi daha küçük gözenekli bir yapı ortaya çıkarmıştır. Takviye oranı arttıkça köpük yapısı içinde görülen drenaj miktarı azalmıştır. Takviye tozlarının gözenekler etrafında toplanarak, gözeneklerin aşırı büyümesine veya birleşmesine izin vermediği ortaya çıkmıştır.
3. Yoğunluğun takviye oranıyla ters orantılı olduğu görülmüş, takviye oranı arttıkça elde edilen köpüğün yoğunluğunun daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Takviye boyutu küçüldükçe yoğunluk azalmıştır.
4. Köpüğün mekanik özelliklerinin büyük oranda yoğunluğa, gözenek çapı, gözenek yapısı ve dağılımına bağlı olduğu belirlenmiştir. Yoğunluğun azalması

ile mekanik özelliklerde düşüş kaydedilmiştir. Yüksek takviye oranıyla yoğunluğun düşmesi, basma gerilmesi ve plato gerilmesinin azalmasına neden olmuştur. Aynı bağıl yoğunluğa sahip kompozit köpüklerde takviye oranındaki artışla mekanik özelliklerde iyileşme olduğu gözlenmiştir. Takviye boyutunun küçültülmesi ile plato gerilmesi düşmüştür.

5. Sönümlenen enerji miktarının takviye oranı ile değişimi incelendiğinde takviye boyutu küçüldükçe ve takviye oranı arttıkça sönümlenen enerji miktarının arttığı görülmüştür. Küçük boyutlu takviye kullanılarak üretilen kompozit köpüklerin daha yüksek enerji sönümleme kabiliyetine sahip olduğu anlaşılmıştır. Enerji sönümleme yeteneğinin bağıl yoğunlukla, gözenek boyutu ve dağılımıyla ilişkili olduğu anlaşılmıştır.

7.KAYNAKLAR

Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G., 2000, "Metal Foams: A Design Guide", Butterworth-Heinemann

Babcsan, N., Banhart, J., Leitmeyer, D., 2003, "Metal Foams – Manufacture and Physics of Foaming", Advanced Metallic Materials, 5-15

Babcsan, N., Banhart, J., 2006, "Metal Foams", Cambridge University Press, 445

Banhart, J., 1998, "Production Methods for Metal Foams", Metal Foams, Verlag Mit, 3-12

Banhart, J., 2000, "Manufacturing Routes for Metallic Foams", Journal Of Metals, December, 22-27

Banhart, J., 2000, "Metallic Foams Challenges and Opportunities", Eurofoam 2000, Mit-Verlag, 13-20

Banhart, J., 2001, "Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams", Progress In Materials Science, 46, 559–632

Banhart, J., 2003, "Aluminium Foams: On The Road to Real Applications", Mrs Bulletin, April, 290-295

Banhart, J., 2005, "Aluminium Foams for Lighter Vehicles", International Journal of Vehicle Design, 37, 114-125

Banhart, J., Seeliger, H.W., 2008, "Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications", Advanced Engineering Materials, 10, 9

Baumeister, J., Banhart, J., Weber, M., 1997, "Aluminium Foams for Transport Industry", Materials and Design, 18, 217-220

Deqing, W., Xiangjun, M., Weiwei, X., Ziyuan, S., 2006, "Effect of Processing Parameters on Cell Structure of an Aluminum Foam", Materials Science and Engineering, A420, 235–239

- Duarte, I., Banhart, J., 2000, "A Study of Aluminium Foam Formation - Kinetics And Microstructure" *Acta Materialia*, 48, 2349-2362
- Elbir, S., Yılmaz, S., Toksoy, A.K., Güden, M., 2003, "SiC-Particulate Aluminum Composite Foams Produced by Powder Compacts: Foaming and Compression Behavior", *Journal Of Materials Science*, 38, 4745 – 4755
- Esmaelzadeh, S., Simchi, A., Lehmhus, D., 2006, "Effect of Ceramic Particle Addition on the Foaming Behavior, Cell Structure and Mechanical Properties of P/M AlSi7 Foam", *Materials Science and Engineering*, A424, 290–299
- Esmaelzadeh, S., Simchi, A., 2008, "Foamability and Compressive Properties of AlSi7 - 3 Vol.% SiC- 0.5 Wt.% TiH₂ Powder Compact", *Materials Letters*, 62, 1561–1564
- Gibson, L.J., 2000, "Mechanical Behavior of Metallic Foams", *Annual Review Of Materials Science*, 30, 191–227
- Gui, M.C., Wang, D.B., Wu, J.J., Yuan, G.J., Li, C.G., 2000, "Deformation and Damping Behaviors of Foamed Al–Si–SiCp Composite", *Materials Science and Engineering*, A286, 282–288
- Haesche, M., Weise, J., Garcia-Moreno, F., Banhart, J., 2007, "Influence of Particle Additions on The Foaming Behaviour of AlSi11/TiH₂ Composites Made by Semi-Solid Processing", *Materials Science And Engineering*, 480, 283–288
- Jeon, Y.P., Kang, C.G., Lee, S.M., 2009, "Effects of Cell Size on Compression and Bending Strength of Aluminum-Foamed Material by Complex Stirring in Induction Heating", *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 435–444
- Luo, Y., Yu, S., Li, W., Liu, J., Wei, M., 2008, "Compressive Behavior of SiCp/AlSi9Mg Composite Foams", *Journal of Alloys and Compounds*, 460, 294–298
- Motz, C., Pippin, R., 2001, "Deformation Behaviour of Closed-Cell Aluminium Foams in Tension", *Acta Materials*, 49, 2463-2470
- Nakajima, H., 2007, "Fabrication, Properties and Application of Porous Metals with Directional Pores", *Progress In Materials Science*, 52, 1091–1173
- Song, Z., Zhu, J., Ma, L., He, D., 2001, "Evolution of Foamed Aluminium Structure in Foaming Process", *Materials Science And Engineering*, A298, 137–143
- Song, Z., Nutt, S.R., 2007, "Rheology of Foaming Aluminum Melts", *Materials Science and Engineering*, A 458, 108–115
- Ürkmez, N., 2004, "AlMg₃ / SiCp Kompozitlerinin Üretimi ve Mekanik Özelliklerdeki Değişimlerin İncelenmesi", Edirne

Wadley, H.N.G.,2002, “Cellular Metal Manufacturing”, Advanced Engineering Materials, 4, 726-733

Weise, J., Stanzick, H., Banhart, J., 2003, “Semi-Solid Processing of Complex-Shaped Foamable Material”, Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 169-174

Yu, C.J., Banhart, J., 1997, “Mechanical Properties of Metallic Foams”, Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, 37-48

Yu, C.J., Eifert, H.H., Banhart, J., Baumeister, J., 1998, “Metal Foaming by a Powder Metallurgy Method:Production, Properties and Applications”, Materials Research Innovations, 2, 181–188

Yu, S., Luo, Y., Liu, J., 2008, “Effects of Strain Rate and SiC Particle on the Compressive Property of SiCp/AlSi9Mg Composite Foams”, Materials Science and Engineering, 487, 394-399

- (1) <http://aluminium.matter.org.uk>
- (2) <http://www.referansmetal.com>
- (3) <http://www.azom.com>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	15.01.1982
Doğum yeri	İstanbul
Lise	1996-1999 İstanbul Bahçelievler Kocasınan Lisesi
Önlisans	1999-2001 Trakya Üniversitesi Edirne Meslek Yüksek Okulu Bilgisayar Programcılığı Bölümü
Lisans	2002-2007 Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2007- Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurumlar

2009-Devam ediyor	Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi
-------------------	--