

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE Al ESASLI PARÇACIK
TAKVİYELİ METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ**

Uğur GÖKMEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2009
ANKARA**

Uğur GÖKMEN tarafından hazırlanan TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE AL ESASLI PARÇACIK TAKVİYELİ METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç.Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İbrahim USLAN

Makine Mühendisliği A.D. Gazi Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ.

Metal Eğitimi A.D. Gazi Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Halil ARIK

Metal Eğitimi A.D. Gazi Üniversitesi

.....

Tarih: 03/06/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Uğur GÖKMEN

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE Al ESASLI PARÇACIK TAKVİYELİ METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Uğur GÖKMEN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2009

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, toz metalürjisi (T/M) tekniği ile metal matrisli kompozit (MMK) metalik köpük üretim parametrelerini araştırmaktır. Matris malzemesi olarak saf alüminyum ve ön alaşımlı Alumix 231[®] metal tozları kullanılmıştır. Köpürtücü madde (TiH₂) miktarı (%0,5, %1, %1,5 ve %2) ve köpürtme sıcaklığının (650°C, 670°C, 690°C ve 710°C), metalik köpüğün gözenek dağılımına, lineer genişleme oranına ve yoğunluğa etkisi incelenmiştir. Al₂O₃ parçacık takviyeli kompozit metalik köpük üretimde Al₂O₃, Al / Alumix ve TiH₂ tozları üç boyutlu turbulada 30 dakika karıştırılmıştır. Karışım tozlar 600 MPa basınçta preslenmiş, 550°C’ de 3 saat sinterlenmiş ve sonra % 50 oranında sıcak deforme edilmiştir. Deforme edilen MMK malzemeler 10 dakika süreyle köpürtülmüştür. Her bir matris malzemesiyle üretilen numuneler deformasyon doğrultusunda köpürme ile lineer genişlemiştir. Artan TiH₂ oranı ve köpürtme sıcaklığıyla birlikte lineer genişleme artmış ancak yoğunluk azalmıştır. Artan Al₂O₃ oranına bağlı olarak ise gözenek duvar kalınlığı ve yoğunluk artarken lineer genişleme oranında azalma belirlenmiştir. %1 TiH₂ oranı ve 690°C - 710°C sıcaklıkta 10 dak. köpürtme süresi optimum parametreler olarak belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 710.1.092
Anahtar Kelimeler : Toz Metalurjisi, Metalik Köpük, Metal Matrisli Kompozit, Lineer Genişleme, Yoğunluk.
Sayfa Adedi : 86
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

**PRODUCTION OF Al BASED METALLIC FOAM REINFORCED WITH
PARTICULATE BY POWDER METALLURGY TECHNIQUE**

(M.Sc. Thesis)

Ugur GOKMEN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2009

ABSTRACT

Aim of this study was to investigate of production parameters of Metal Matrix Composite (MMC) foams produced by Powder Metallurgy (P/M) technique. In the study pure aluminium and prealloyed Alumix 231[®] based metal powders were used as a matrix material. Effects of foaming agent (TiH₂) ratio (0,5%, 1%, 1,5% and 2%) and foaming temperatures (650°C, 670 °C, 690 °C and 710 °C) on the pore morphology , linear expansion coefficient and density of metallic foam were investigated. In production of MMC foam, Al/Alumix 231, TiH₂ and Al₂O₃ powders were mixed in three dimensional turbula for 30 minutes. Mixed powders were compacted at 600 MPa, sintered at 550 °C for 2 hours and then hot deformed by 50%. Deformed MMC samples were foamed for 10 minutes. The samples produced with each matrix material linearly expanded in the deformation direction. It was found that, linear expansion ratio increased with increasing TiH₂ ratio and foaming temperature. And also, pore cell thickness and metallic foam density increased with increasing Al₂O₃ ratio in the composite. To produce MMC foam, optimum experimental parameters were determined in TiH₂ ratio of 1%, foaming temperatures of 670 °C - 710 °C and foaming time of 10 minutes.

Science Code : 710.1.092

**Key Words : Powder Metallurgy, Metallic Foam, Metal Matrix Composite,
Linear Expansion, Density.**

Page Number: 86

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Yusuf OZCATALBAS

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasının her aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Mehmet TÜRKER' e ve Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ' a teşekkür eder saygılar sunarım.

Üniversite içerisinde ve haricinde her türlü desteği sağlayan bölümümüz Araştırma Görevlilerinden Hanefi ÇİNİCİ' ye, bana iki yıldan daha fazla süre oda arkadaşlığı yapan Arif UZUN' a ve bölümümüz hocalarından Yrd. Doç. Dr. Hasan OKUYUCU' ya teşekkür ederim. Bu zamana kadar hiçbir maddi ve manevi fedakârlıktan kaçmayan aileme teşekkürü borç bilir saygılar sunarım.

Bu çalışmaya bilimsel araştırma kapsamında 106M513 numaralı Proje ile destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ	1
2. GÖZENEKLİ MALZEMELER VE METALİK KÖPÜKLER.....	3
3. METALİK KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	7
3.1. Sıvı Durumdaki Metal İçerisine Gaz Enjektisi ile Metalik Köpük Üretimi	11
3.2. Sıvı Durumdaki Metal İçerisine Köpürtücü Madde İlavesi ile Metalik Köpük Üretimi	15
3.3. Ergitme-çözünürlük-filtrasyon yöntemi ile metalik köpük üretimi	18
3.4. Sıvı Metal Yolu ile Köpükleşebilen Öncü Üretimi (FORMGRIP)	20
3.5. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Metalik Köpük Üretimi	22
4. METALİK KÖPÜKLERİN KULLANIM ALANLARI	27
4.1. Otomotiv Sektöründe Metalik Köpük.....	33
4.2. Yapısal Uygulamalarda ve Uzay Sanayisinde Metalik Köpük	36
4.3. Metalik Köpük Alanında Teknolojiye Paralel Olarak Meydana Gelen Gelişmeler	39

	Sayfa
5. MATERYAL VE METOT	42
5.1. Malzeme	42
5.2. Deneysel Metot	42
5.2.1. Tozların karıştırılması	42
5.2.2. Karışım tozlarının preslenmesi	43
5.2.3. Preslenmiş toz metal blok numunelerin sinterlenmesi	44
5.2.4. Sinterlenmiş numunelerin sıcak deformasyonu	44
5.2.5. Köpürtme işlemi	44
5.3. Üretilen Metalik Köpüklerin Karakterizasyonu	45
5.3.1. Yoğunluk ölçümü	45
5.3.2. Lineer genişleme oranının belirlenmesi	46
5.3.3. Makro ve Metalografik muayene	46
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	47
6.1. Ön Alaşımli Alümix 231 Esaslı Metalik Köpük Üretimi	47
6.1.1. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının lineer genişlemeye etkisi	47
6.1.2. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının yoğunluğa etkisi	49
6.1.3. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının gözenek yapısına etkisi	50
6.2. Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretimi	55
6.2.1. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının lineer genişlemeye etkisi	55
6.2.2. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının yoğunluğa etkisi	57

Sayfa

6.2.3. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının gözenek yapısına etkisi	58
6.3. Alüminyum Matrisli Al_2O_3 Parçacık Takviyeli Kompozit Metalik Köpüğe Takviye Miktarının Etkisi.....	63
6.4. Alumix 231 Matrisli Al_2O_3 Parçacık Takviyeli Kompozit Metalik Köpüğe Takviye Miktarının Etkisi.....	69
6.5. Al ve Alumix 231 Matrisli Al_2O_3 Parçacık Takviyeli Kompozit Metalik Köpüklerin Kıyaslanması.....	75
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	86

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Alüminyum köpüklerinin 3 ailesinin bazı tipik özellikleri.....	14
Çizelge 5.1. Karışım tozlarının fiziksel özellikleri	42
Çizelge 5.2. Kullanılan tozların karışım oranları	43
Çizelge 5.3. Köpürtme sıcaklıkları.....	44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Metalik köpüklerin soy ağacı.....	10
Şekil 3.2. Sıvı durumdaki metal içerisine gaz enjekte edilerek köpürtme işlemi ...	11
Şekil 3.3. Parçacık boyutu ve parçacık hacim oranı arası problemler	12
Şekil 3.4. Sıvı durumdaki metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme..	15
Şekil 3.5. Al eriyiğinin viskozitesinin Ca oranına bağlı değişimi	16
Şekil 3.6. Açık gözenekli metalik köpüğün GASAR yöntemi ile üretimi	19
Şekil 3.7. FORMGRIP yöntemi	21
Şekil 3.8. IFAM üretim şeması	22
Şekil 3.9. Al içerisindeki TiH_2 zamana bağlı genişleme davranışı	24
Şekil 3.10. Net bir şekle sahip parça elde edilmesi.....	25
Şekil 4.1. Metalik köpükleri uygulamanın faydaları.....	27
Şekil 4.2. Fonksiyonel olarak metalik köpüklerin kullanım biçimleri.....	31
Şekil 4.3. Metalik köpüğün evrim sürecinin şematik gösterimi.....	40
Şekil 4.4. X-Ray analiz düzeneğinin şematik gösterimi	41
Şekil 6.1. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Alumix köpüğün lineer genişlemesine etkisi	47
Şekil 6.2. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Alumix köpüğün yoğunluğuna etkisi	49
Şekil 6.3. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Alumix köpüğün gözenek boyutuna etkisi.....	50
Şekil 6.4. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Alumix köpüğün gözenek duvar kalınlığına etkisi	51
Şekil 6.5. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Al köpüğün lineer genişlemesine etkisi	55

Şekil	Sayfa
Şekil 6.6. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Al köpüğün yoğunluğuna etkisi	57
Şekil 6.7. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Al köpüğün gözenek boyutuna etkisi	58
Şekil 6.8. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Al köpüğün gözenek duvar kalınlığına etkisi	59
Şekil 6.9. Al+Al ₂ O ₃ Kompozitinde parçacık oranına bağlı lineer genişleme oranında meydana gelen değişim	64
Şekil 6.10. Al+Al ₂ O ₃ Kompozitinde parçacık miktara bağlı yoğunluk da meydana gelen değişim	65
Şekil 6.11. Al+Al ₂ O ₃ Kompozitinde parçacık miktarına bağlı gözenek boyutunda meydana gelen değişim	66
Şekil 6.12. Al+Al ₂ O ₃ Kompozitinde parçacık miktara bağlı gözenek duvar kalınlığında meydana gelen değişim	66
Şekil 6.13. Alümix 231+Al ₂ O ₃ Kompozitinde parçacık oranına bağlı lineer genişleme oranında meydana gelen değişim	69
Şekil 6.14. Alümix 231+Al ₂ O ₃ Kompozitinde parçacık oranına bağlı yoğunluk da meydana gelen değişim	70
Şekil 6.15. Alümix 231+Al ₂ O ₃ Kompozitinde parçacık oranına bağlı gözenek boyutun da meydana gelen değişim	71
Şekil 6.16. Alümix 231+Al ₂ O ₃ Kompozitinde parçacık miktarına bağlı gözenek duvar kalınlığın da meydana gelen değişim	72
Şekil 6.17. Matris malzemeler içerisindeki Al ₂ O ₃ oranındaki artışa bağlı olarak lineer genişlemelerin karşılaştırılması.....	76
Şekil 6.18. Matris malzemeler içerisindeki Al ₂ O ₃ oranındaki artışa bağlı olarak yoğunluğun karşılaştırılması	77
Şekil 6.19. Matris malzemeler içerisindeki Al ₂ O ₃ oranındaki artışa bağlı olarak gözenek duvar kalınlıklarındaki değişimin karşılaştırılması.....	78
Şekil 6.20. Matris malzemeler içerisindeki Al ₂ O ₃ oranındaki artışa bağlı olarak gözenek boyutundaki değişimin karşılaştırılması	79

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Alüminyum esaslı metalik köpük	4
Resim 2.2. Farklı tip hücresel metaller.....	4
Resim 2.3. Lotus tipi gözenekli bakır yapı... ..	5
Resim 3.1. Metalik köpük hücre yapısı.....	7
Resim 3.2. Açık hücreli köpük metal.....	8
Resim 3.3. Kapalı hücreli köpük metal.....	9
Resim 3.4. Ergiyik metal içerisine gaz enjektisi ile üretilen metalik köpük	12
Resim 3.5. Sıvı durumdaki metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile üretilmiş metalik köpüğün gözenek morfolojisi.....	17
Resim 3.6. Tipik gözenek yapıları	18
Resim 3.7. Gasar yöntemi ile üretilmiş köpüğün gözenek yapısı	19
Resim 3.8. FORMGRIP yöntemi ile üretilmiş köpük yapı.....	21
Resim 3.9. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş Al köpüğün gözenek yapısı.....	24
Resim 3.10. IFAM tarafından T/M yöntemi ile üretilmiş Al köpük parçalar... ..	26
Resim 3.11. Bükülmüş Al sandviç köpükler.....	26
Resim 4.1. Al köpük dolu alüminyum tüp	29
Resim 4.2. Karmaşık şekilli alüminyum sandviç köpük kesiti	29
Resim 4.3. Alüminyum sandviç köpük panel	29
Resim 4.4. Karmann, (Almanya) tarafından üretilmiş alüminyum köpük sandviç(AFS)	31
Resim 4.5. Metalik köpüklerin arabalarda uygulanması.....	32

Resim	Sayfa
Resim 4.6. Metalik köpüklerin otomobillerde fonksiyonel kullanımı	33
Resim 4.7. Deforme olmuş köpük dolu tüp	34
Resim 4.8. Araç sistemleri için tramvay çarpışma enerjisi sönümleyici	35
Resim 4.9. LKR Ranshofen(Avusturya) tarafından üretilmiş BMW motor montaj desteği.	35
Resim 4.10. Al köpük ile polimer köpüğün enerji emilimi için kullanılması.....	36
Resim 4.11. AFS sandviç panellerinden yapılmış kaldırıcı kolu	37
Resim 4.12. Alüminyum köpük sandviç (AFS) ile yapılmış prototip yapı.....	37
Resim 4.13. Alüminyum köpük sandviç (AFS).....	38
Resim 4.14. Yapısal uygulamalarda alüminyum sandviç köpük kesiti	38
Resim 4.15. Al köpüğün integral zırh malzemesi olarak tasarımı	39
Resim 4.16. Köpük evrimi analiz görüntüsü.....	41
Resim 6.1. 650°C de Köpürtülmüş Alumix numunelerin gözenek yapıları a) %0,5 TiH ₂ b) %1 TiH ₂ c) %1,5 TiH ₂ d) %2 TiH ₂	51
Resim 6.2. 670°C de Köpürtülmüş Alumix numunelerin gözenek yapıları a) %0,5 TiH ₂ b) %1 TiH ₂ c) %1,5 TiH ₂ d) %2 TiH ₂	52
Resim 6.3. 690°C de Köpürtülmüş Alumix numunelerin gözenek yapıları a) %0,5 TiH ₂ b) %1 TiH ₂ c) %1,5 TiH ₂ d) %2 TiH ₂	53
Resim 6.4. 710°C de Köpürtülmüş Alumix numunelerin gözenek yapıları a) %0,5 TiH ₂ b) %1 TiH ₂ c) %1,5 TiH ₂ d) %2 TiH ₂	54
Resim 6.5. 650°C de Köpürtülmüş Al köpük numunelerin gözenek yapıları a) %0,5 TiH ₂ b) %1 TiH ₂ c) %1,5 TiH ₂ d) %2 TiH ₂	59
Resim 6.6. 670°C de Köpürtülmüş Al köpük numunelerin gözenek yapıları a) %0,5 TiH ₂ b) %1 TiH ₂ c) %1,5 TiH ₂ d) %2 TiH ₂	60
Resim 6.7. 690°C de Köpürtülmüş Al köpük numunelerin gözenek yapıları a) %0,5 TiH ₂ b) %1 TiH ₂ c) %1,5 TiH ₂ d) %2 TiH ₂	61

Resim	Sayfa
Resim 6.8. 710°C de Köpürtülmüş Al köpük numunelerin gözenek yapıları a) %0,5 TiH ₂ b) %1 TiH ₂ c) %1,5 TiH ₂ d) %2 TiH ₂	63
Resim 6.9. Değişik oranlarda Al ₂ O ₃ içeren köpürtülmüş numuneler; a) %5 Al ₂ O ₃ b) %7 Al ₂ O ₃ c) %5 Al ₂ O ₃ d) %7 Al ₂ O ₃	67
Resim 6.10. Al ₂ O ₃ içeren Al kompozit köpüklerin SEM görüntüleri a) Gözenek duvarı b) Matris malzeme parçacık ara yüzeyi	68
Resim 6.11. Al ₂ O ₃ içeren Al kompozit köpüklerin EDX analiz görüntüsü	69
Resim 6.12. Değişik oranlarda Al ₂ O ₃ içeren köpürtülmüş numuneler; a) %5 Al ₂ O ₃ b) %7 Al ₂ O ₃ c) %5 Al ₂ O ₃ d) %7 Al ₂ O ₃	72
Resim 6.13. Al ₂ O ₃ içeren Alumix 231 kompozit köpüklerin SEM görüntüleri a) Gözenek duvarı b) Matris malzeme parçacık ara yüzeyi	74
Resim 6.14. Al ₂ O ₃ içeren Alümix 231 esaslı kompozit köpüklerde Al ₂ O ₃ partükülleri	74
Resim 6.15. Al ₂ O ₃ içeren Alümix 231 esaslı kompozit köpüklerin EDX görüntüleri.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
d	Yoğunluk (g/cm^3)
m	Ağırlık
V_y	Yaş ağırlık (g)
V_s	Su içerisindeki ağırlık (g)
L_i	Köpürtme öncesi numune yüksekliği (mm)
L_s	Köpürtme sonrası numune yüksekliği (mm)
Kısaltmalar	Açıklama
AFS	Alüminyum sandviç köpük
IFAM	Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü
MMK	Metal Matrisli Kompozit
T/M	Toz Metalurjisi

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisine bağlı olarak gelişen malzeme bilimi, endüstrideki gelişmelere paralel olarak önemli bir yer tutmaktadır. İmalatçılar, daha hafif ve daha mukavemetli yapılar elde etmek için maliyeti yüksek araştırmalar yapmaktadırlar. Bu durumun ışığında metalik köpük (hücreli) malzemeler önemli bir çözüm kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Hücreli yapıya sahip, köpükler ve yüksek gözenekli malzemeler, ilginç mekanik ve fiziksel özelliklerin kombinasyonuna sahip olmalarıyla bilinirler; çok düşük özgül ağırlıklı olmaları, yüksek sıcaklığa dayanıklılık veya yüksek termal iletkenliğe bağlı yüksek gaz geçirgenliği gibi. İnsan yapımı hücreli malzemeler arasında, son zamanlarda en önemlisi polimerik köpüklerdir; çünkü bu köpükler teknolojinin hemen hemen her sektöründe kullanılırlar, geniş bir uygulama ve kullanım alanına sahiptirler [1]. Metalik köpük malzemelerin çeşitli mekanik özellikleri polimerik köpük malzemelere kıyasla çok üstündür. Yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek sıcaklarda yapısını koruması buna örnek olarak verilebilir [2].

İlk kez 1950'lerde geliştirilen metal köpüklerin birkaç çeşidi üretilmiştir. 1990'larda, sıvı durumda ucuz metal köpüklerin, doğrudan veya dolaylı olarak metal tozlarının sıkıştırılmasından elde edilmesi bulunmuştur [3]. Hücreli katılar ve bunların özellikleri Ashby ve Gibson tarafından detaylı şekilde tanımlanmıştır. Bu metaller hakkında en sık alıntı yapılan yayın 1983 yılında basılmıştır. Bu tarihten sonra ise, metal köpüklerin üretimi, karakteri ve uygulamaları ile ilgili olarak çok sayıda yeni gelişmeler vuku bulmuştur. Gözenekli malzemeler üzerine genel değerlendirmeler, yapılan çalışmalar, konferans tutanakları; genel olarak bu malzemelerin mekanik özellikleri, üretim konusundaki değişik bakış açıları ve bu gibi malzemelerin uygulanması noktalarında yoğunlaşmıştır [1]. Metalik köpükler on yıllardır araştırılmaktadır. Araştırmalar büyük oranda gözenek içeren metalik köpüklerin üretim yollarının çeşitliliğini ve bunların uygulanmasını içeren bir girişle başlamaktadır. Birçok malzeme ağırlığın azaltılması ile iyi mekanik özellikler ile kombine edilebilir. Metalik eriyikler üç yolla köpürebilirler; dışarıdan bir kaynaktan sıvı metal içine gaz püskürterek, gaz salgılayan maddeler kullanarak sıvı içinde

istenilen yerde tabi durumda gaz oluşumunu sağlayarak veya daha önce sıvı içinde çözünmüş gazları çökelterek [4, 5].

Hemen hemen bütün metaller köpükleştirilebilir. Fakat bunlar içinde alüminyum büyük bir öneme sahiptir. Yakın zamanda yapılan araştırmaların ana amacı homojen hücre yapısını, tekrar üretilebilirliği ve köpük yapısını kontrol etmeyi başarmaktır [6]. Alüminyum esaslı metalik köpükler, çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir [7]. Alüminyum köpükler; ısı değişimi, ses yalıtımı, ses emilimi ve enerji emilimi gibi özellikleri ile bilinirler [8]. Profiller içerisine dolgu malzemesi olarak enerji absorpsiyonu için kullanılabilirler [4]. Kullanım alanları arasında, özellikle düşük ağırlığın arandığı otomotiv ve uzay sanayi alanları başta gelmektedir [5].

Köpükleştirme teknolojisinin daha ileri gelişimi, köpük kararlılığının daha bilimsel anlayışını gerektirir. Gözenek morfolojisinin yanında, yapı içerisine ilave edilen takviye elemanlarının miktarının ve boyutunun köpük malzemenin kararlılığında ve mekanik özelliklerindeki değişmelerde etkili olduğu bilinmektedir [9].

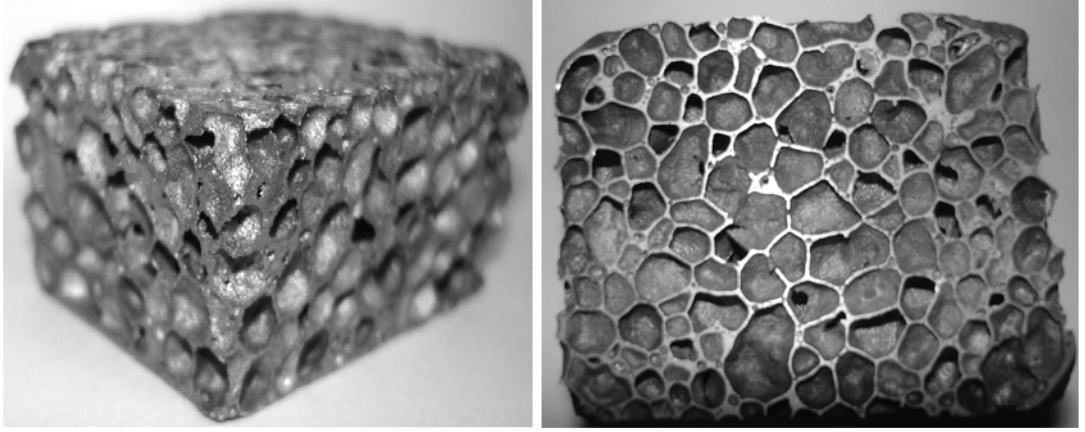
Yapılan çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle, alüminyum ve alumix 231 esaslı değişik (% 1-3-5-7) oranlarda Al_2O_3 takviyeli metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir, uygun köpürtücü madde miktarı ve köpürtme sıcaklığı belirlenerek ilave edilen takviye elemanın köpük yapının gözenek morfolojisine, lineer genişlemeye ve yoğunluğa etkisi araştırılmıştır.

2. GÖZENEKLİ MALZEMELER VE METALİK KÖPÜKLER

Gözenekli yapılar geçmişten günümüze kadar değişik uygulamalar için çok önemli malzemeler olmuştur. Filtreleme, paketlenme ve yalıtım başta olmak üzere değişik birçok ortamda kendisine uygulama alanı bulmuştur. İnsanlık tarihinin ilk çağlarından beri yüzyıllardır doğal gözenekli malzemeler değişik amaçlarla kullanılmıştır. Doğa hem yapısal hem fonksiyonel amaçlı olarak gözenekli malzemeleri kullanır (kemik, odun gibi) [1].

Zamanla insanoğlu çevresindeki doğal yapılardan etkilenererek değişik araştırmalar ve çalışmalar ışığında kendisine ait çeşitli gözenekli yapılar üretmeye başlamıştır. Bir günlük zaman dilimi içerisinde insanlar bir defa kullanılan bardaklardan güneş enerjisi jeneratörlerine kadar birçok alanda gözenekli yapıya sahip herhangi bir malzemeye karşılaşabilir. Tek kullanımlık bardağı elde etmek için kullanılan gözenekli yapı değişik uygulamalar için yetersiz dayanıma sahipken güneş enerji jeneratörünü elde etmek için kullanılan yapı çok kırılgan bir durumda olabilir. Gözenekli ve köpük yapılar taşıyacakları yük dikkate alınarak seçilmelidir. Metal köpük yapılarla diğer malzemelerin köpük yapıları arasında mekanik özellikler açısından farklar vardır. Polimer malzemeler yeterli derecede rijit değildir ve seramik malzemeler de çok kırılgan bir yapıya sahiptirler. Bu nedenle metalik köpük yapıları kullanmak doğru bir seçim olarak görülmektedir. Günümüzde bazı mühendislik problemleri gözenekli malzemeler kullanılarak çözülmüştür. Düşük ağırlıklı yapılara duyulan ihtiyaç ve emniyetin önemli yer teşkil ettiği otomotiv, tren ve uzay endüstrisi gibi alanlarda alüminyum köpük başta olmak üzere metalik köpüklerin kullanımına ihtiyaç duyulduğu gözlenmektedir [1, 10].

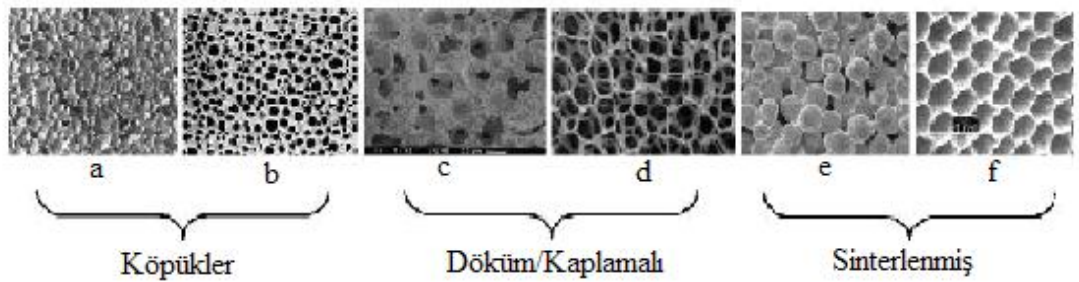
Tipik olarak metalik köpükler %80 ile %90 oranında gözenekli yapıya sahip, gaz ve katı halde bulunan maddelerin bileşimidir (Resim 2,1). Gözenekli yapı şeklini alabilmesi için değişik fonksiyonel malzemeler kullanmak gerekmektedir. Özellikle üretiminde homojen gözenek dağılımının ve dolayısı ile yeteri kadar gaz kabarcığının oluşturulması amaçlanır [11].



Resim 2.1. Alüminyum esaslı metalik köpük

Katı metalik köpüklerin, birçok mühendislik uygulamalarında dikkat çekici olmalarını sağlayan mekanik ve fiziksel olarak alışılmadık kombinasyon sergilemeleridir. Örneğin, yapısal sandviç panellerde dolgu malzemesi olarak kullanıldıklarında düşük ağırlıkla yüksek mukavemet gösterirler. Enerji emiş cihazlarında kullanımları ise neredeyse sabit gerilmelerde yüksek deformasyona uğrayabilme kapasitelerinin kullanımı sonucudur [12].

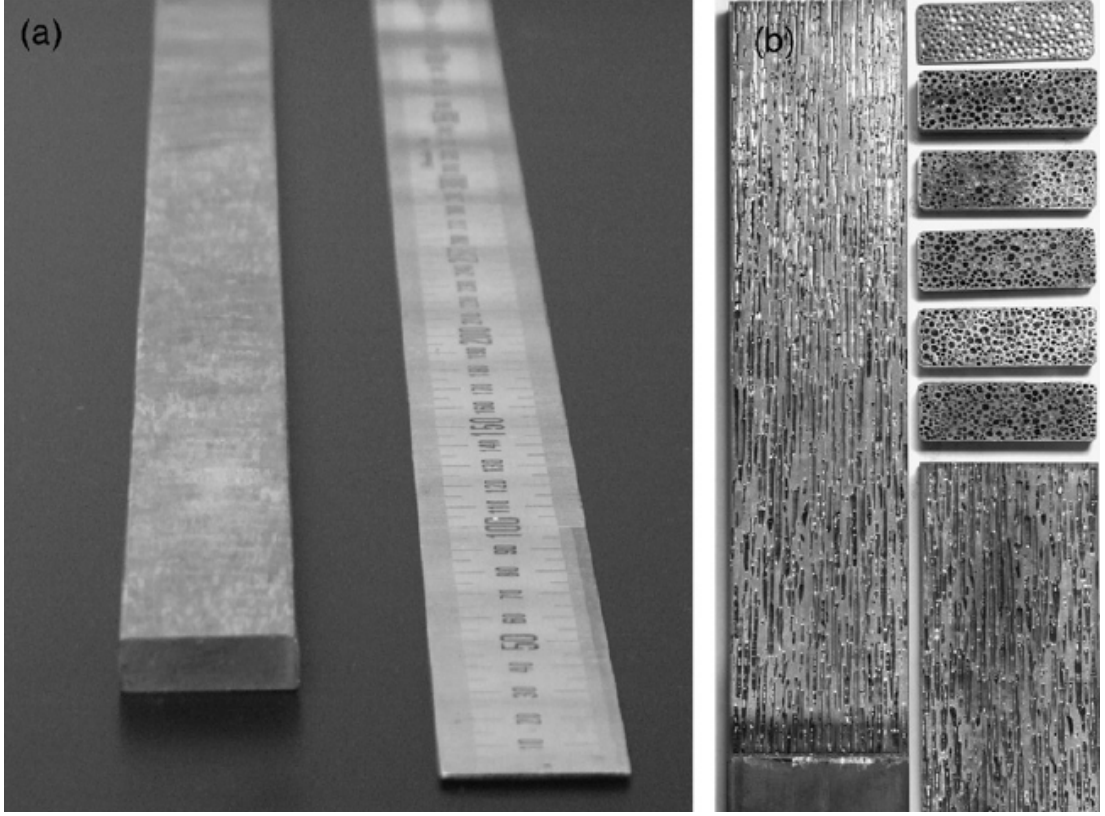
Resim 2.2’de günümüzde gittikçe popüler olan metalik köpüklerden birkaç değişik malzeme varyasyonlarının, alaşımlarının ve morfolojik özelliklerinin geniş aralığı gösterilmektedir.



Resim 2.2. Farklı tip hücreli metaller

- (a) Alüminyum köpük
- (b) Bakır lotus yapısı
- (c) A1 sünger
- (d) Açık hücreli nikel yapısı
- (e) Sinterlenmiş bronz tozu
- (f) T/M yöntemi ile yönlendirilmiş hücreli malzeme [12, 13]

Gözenekli yapılar üzerine yapılan araştırmaların gelişmesi üzerine değişik tipte ve boyutta gözenek elde etme eğilimi ve farklı yapılar ortaya çıkarmıştır. Resim 2.3’ de lotus tipi bakır yapı görülmektedir.



Resim 2.3. Lotus tipi gözenekli bakır yapı a) üretim sonrası görüntü b) üretim sonrası paralel ve düşey kesit görüntüleri 2007 [14]

Köpük terimi her zaman uygun anlamda kullanılmaz ve işte bu durumda köpük teriminin daha net bir tanımlaması yapılmalıdır. Köpükler hem sıvı hem katı içinde düzenli homojen dağılımlar gösteren gaz fazlarıdır. Bu nedenle, hücreler bütünüyle sıvı veya katı halde bulunurlar ve birbirine bağlı değildirler. Eğer köpük terimini orijinal anlamı içinde ele alırsak, sıvı içindeki gaz baloncuklarının dağılımı olarak ifade edilir

Metalik köpüklerden bahsederken, genellikle katı köpükten bahsedilir. Sıvı metalik köpük terimi ise sadece malzeme üretimi esnasında bir aşama için kullanılır. Katı köpükler ise ekseriye hücreli katı olarak adlandırılan yapıların özel bir durumunu ifade eder. Bir sıvı içinde, yüzey enerjisini minimize etmek bazı belirlenmiş köpük

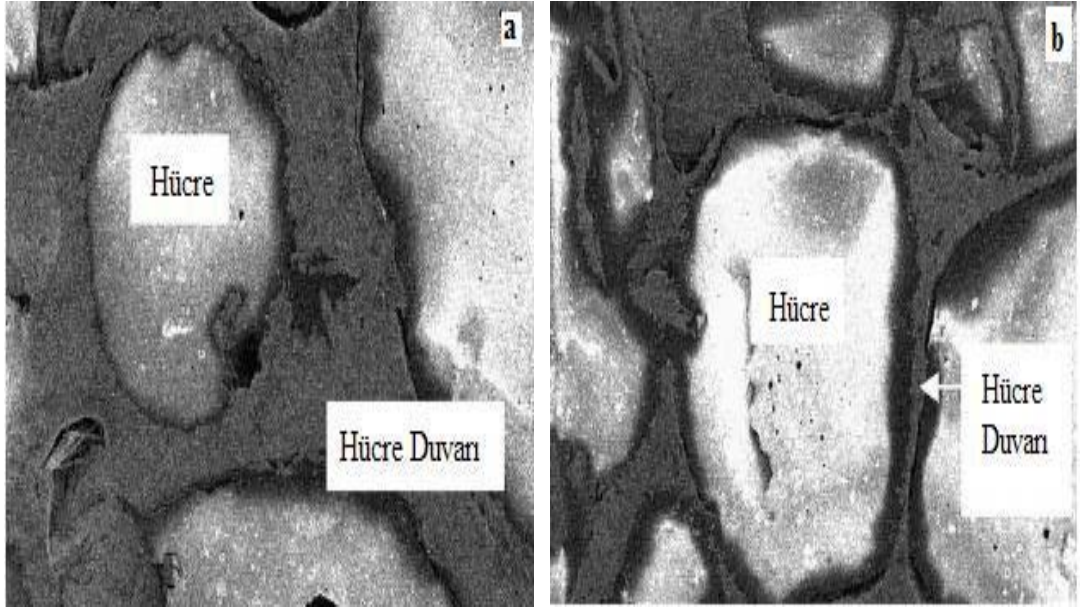
morfolojilerine izin verir sadece. Sıvı durumdaki suretinin bir benzeri olan katı köpükte; aynı yolla sınırlandırılmıştır. Bunun tam tersi olarak hücreli katılar sıvı koşullardan meydana gelmek zorunda değildir ve bundan dolayı her morfolojide oluşabilir. Mesela, tipik açık yapıya sahip sinterlenmiş tozlar. Bu gözenekli yapılar için sünger terimi daha uygun olsa bile genellikle bu yapılar köpük olarak adlandırılır [1].

Metalik köpük yapılar polimerik olanlarına kıyasla daha katı bir yapıya sahip, yüksek sıcaklıklarda iç yapısını daha iyi koruyabilen (stabil), sıcaklık direnci yüksek olan ve yüksek sıcaklıklarda tok sit gaz oluşturmeyen yapılardır. Tamamen geri çevrilebilen malzemeler olup çevreye herhangi bir zarar vermezler. En önemli avantajları ise özgül ağırlıklarının düşük olmasıdır. Bunun yanında yönden bağımsız olarak darbe ve titreşim sönümleyebilmesi, olumlu özellikleridir [15].

Endüstriyel anlamda iyi kalitede köpük metal üretebilmek yüksek maliyet gerektirdiğinden pazardaki köpük metaller hala sınırlıdır. Dünyada ve ülkemizde çeşitli üniversitelerde daha düşük maliyette ve yüksek kalitede köpük metal üretebilmek için çeşitli çalışmaların devam etmekte olduğu bilinmektedir.

3. METALİK KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Yaygın olarak kullanılan köpük teriminin anlamı üzerine bir tarif yapılacak olursa; bir sıvı içerisinde gaz kabarcıklarının dağılmasıyla oluşan yapılar olarak tarif edilebilir, bu yapılarda sıvı katılaşmasına izin verilerek gözenek morfolojisi korunmuştur, elde edilen yapının son hali katı köpük halini almıştır. Alüminyum veya Nikel esaslı köpükler olarak adlandırılan malzemeler aslında katı köpük yapılardır. Benzer tanımlamalar araştırmacılar tarafından yapılmaktadır. Yapısında içerisinde dağılmış küçük boyutlu gaz kabarcıkları bulunan sıvılar, sıvı köpük olarak tanımlanır. Sıvı metal köpük, katılaşma noktasının altında bir sıcaklığa getirilirse katı metal köpük oluşur. Metal köpükte her bir gaz kabarcığının oluşturduğu hacim “hücre”dir (Resim 3.1). Hücre, hücre duvarları ve hücre köşelerinden oluşur. Hücre duvarı iki gaz kabarcığının oluşturduğu sınır, hücre kösesi ise üç gaz kabarcığının kesiştiği yerdir. Hücre kösesi hücre duvarından daha kalındır [16].



Resim 3.1. Metalik köpük hücre yapısı

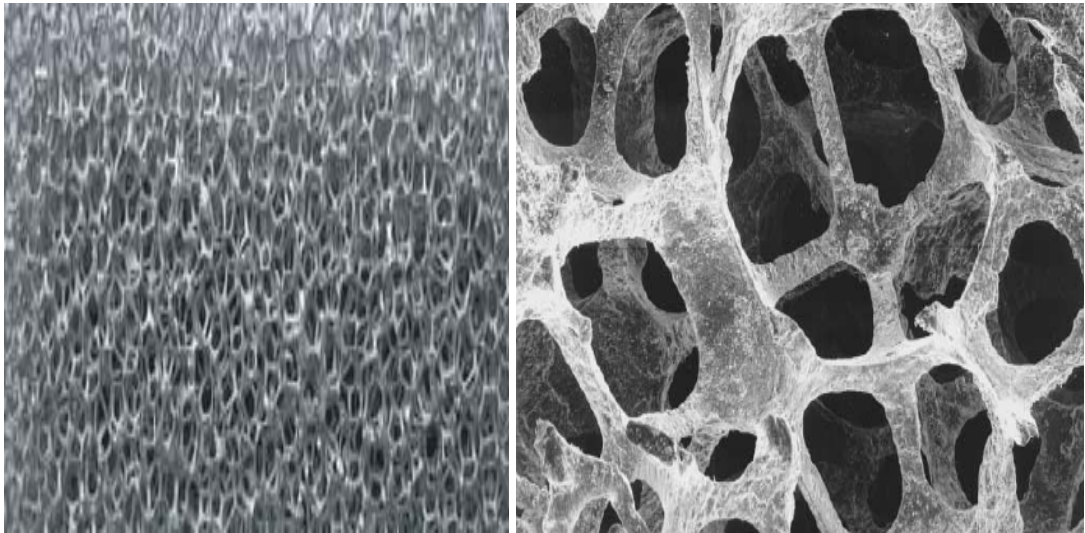
a) 675 °C köpürtülmüş

b) 685 °C köpürtülmüş [17]

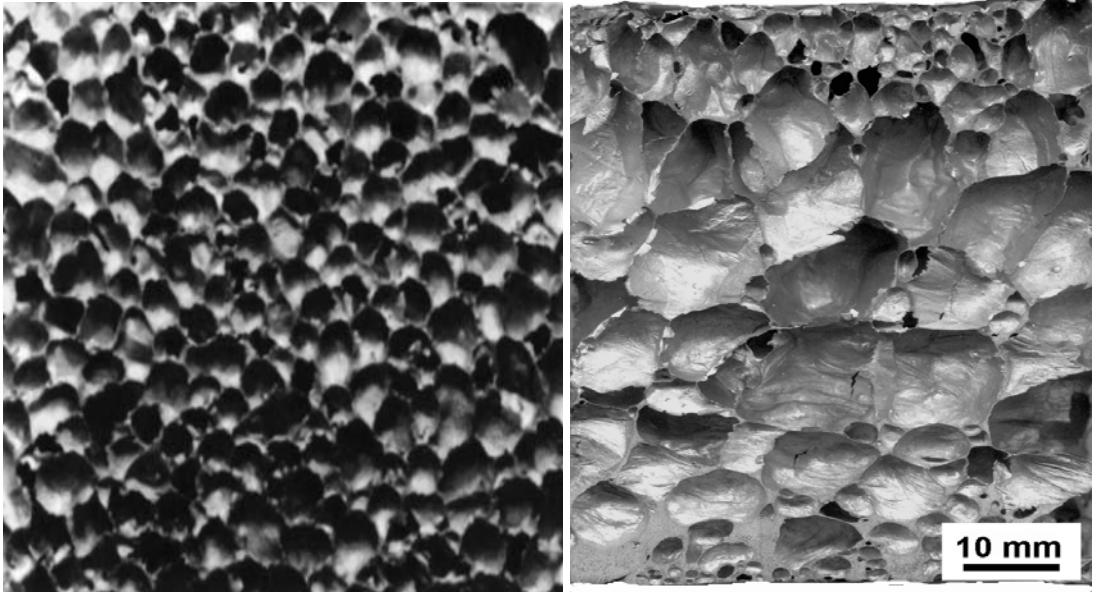
Gözenekli metal malzemelerin yapısal kullanım alanları arasında otomotiv, demiryolu ve inşaat endüstrileri, uzay araçları, gemi ve spor malzemeleri yapımı ve biyomedikal uygulamalar; işlevsel kullanım alanları arasında ise filtreleme ve

ayırma, ısı dönüştürücü, soğutma sistemleri, elektrokimyasal uygulamalar, su arıtma, sıvı muhafaza ve iletimi gibi uygulamalar söylenebilir [1, 12].

Yukarıda bahsedilen kullanım alanlarında gözenekli hale getirilerek fonksiyonel olarak kullanılacak metaller ve alaşımlar arasında alüminyum, bakır, çelik, nikel bazlı süper alaşımlar, kurşun, çinko ve kalay sayılabilir [12,18]. Son zamanlarda metalik köpükler yukarıda bahsedilen birçok alanda kendisine uygulama sahası bulabilmiştir. Özellikle Alüminyum köpüklerin hem fiziksel hem de mekanik özellikleri sadece kompozisyonla kontrol edilmez [9]. Buna paralel olarak fonksiyonel olarak kullanılmaları üretilen metalik köpüğün gözenek yapısına bağlı olarak tercih edilmektedir. Metalik köpüklerin “açık hücreli” ve “kapalı hücreli” olmak üzere iki çeşidi vardır. Metalik köpüklerin %80-90’ı gözeneklerden meydana gelmektedir. Baloncuklar birbiriyle bağıntılı bir halde bulunuyorsa bu yapıya *açık hücreli köpük metal* denilmektedir. *Kapalı hücreli metalik köpükler* ise hücrelerin her birinin içerisinde gaz boşlukları mevcuttur ve birbirinden izole edilmiş bir halde bulunur [11]. Resim 3.2’ de ve Resim 3.3’de açık ve kapalı köpük metallerin hücre yapıları görülmektedir.



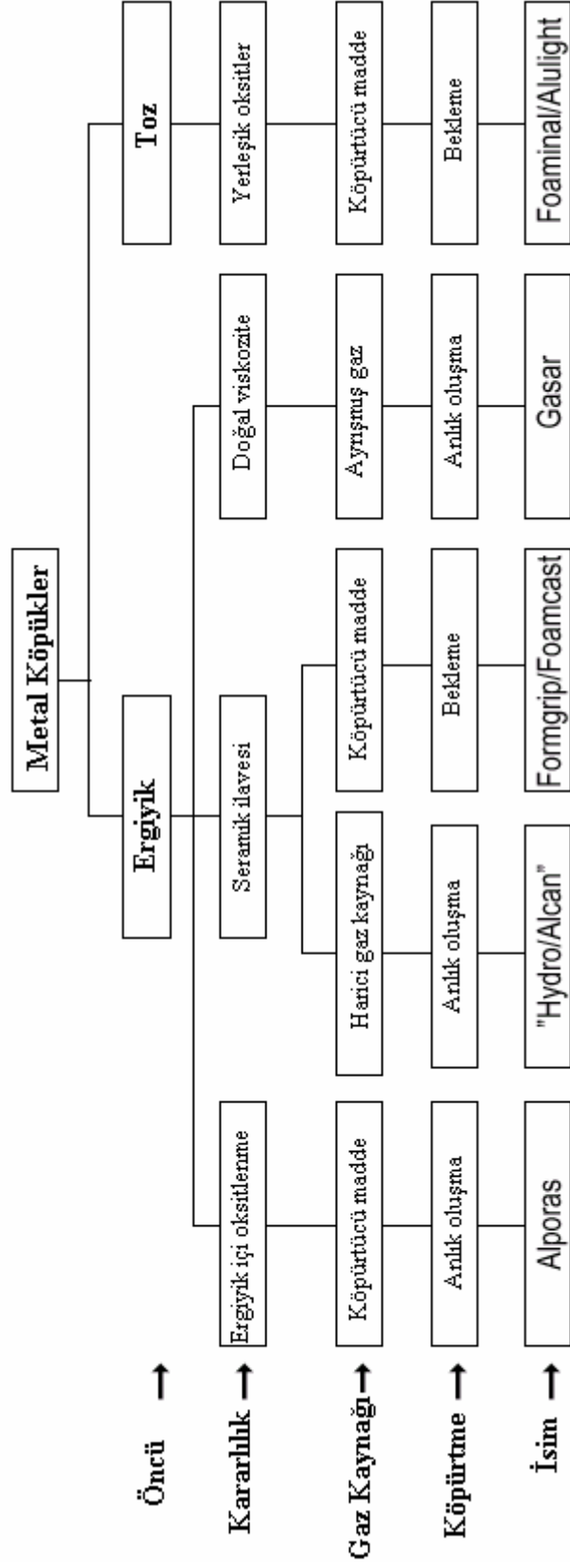
Resim 3.2. Açık hücreli köpük metal a) açık hücreli yapı b) açık hücreli yapı SEM görüntüsü [1, 19]



Resim 3.3. Kapalı hücreli köpük metal a) kapalı hücreli yapı b) kapalı hücreli yapı SEM görüntüsü [2, 11]

Metalik köpüklerin üretim yöntemleri bazı araştırmacılar tarafından köpüğün gözenek yapısına göre tanımlansa da genel olarak imalatçı tarafından belirlenen bazı adlar ile bilinirler. Toz Metalürjisi, çökeltme (ayırıştırma) ve eritme gibi bazı yollarla metalik köpükler elde edilebilir. Bu işlemlerden bazıları erimiş kütle içine gaz enjekte etme ya da köpürtücü madde kullanarak ayırıştırma esasına dayanır. Genel de köpürtücü madde olarak titanyum hidrat tozları kullanılmaktadır (TiH_2) [1, 5]. Son zamanlarda ise metalik köpük elde edilmesinde kalsiyum karbonatın çökeltmesi sonucu elde edilen karbonat köpükler adı verilen yeni yapılar üzerine çalışmalar yapılmaktadır [20].

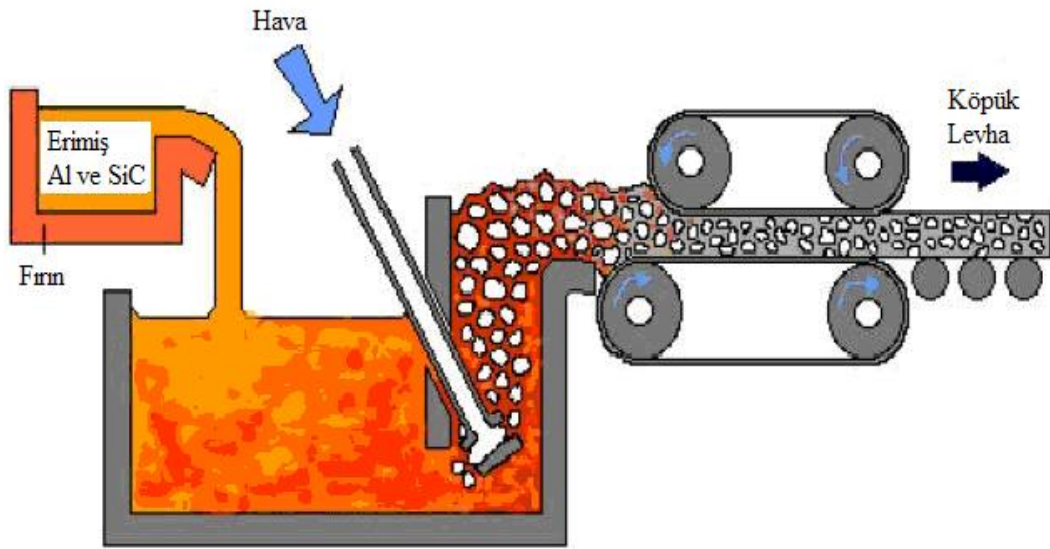
Metalik köpüklerin geçmişten günümüze kadar üretim yöntemleri ve bazı ticari isimleri ile ilgili grafik Şekil 3.1' de verilmiştir.



Şekil 3.1. Metalik köpüklerin soyağacı [21]

3.1. Sıvı Durumdaki Metal İçerisine Gaz Enjektisi ile Metalik Köpük Üretimi

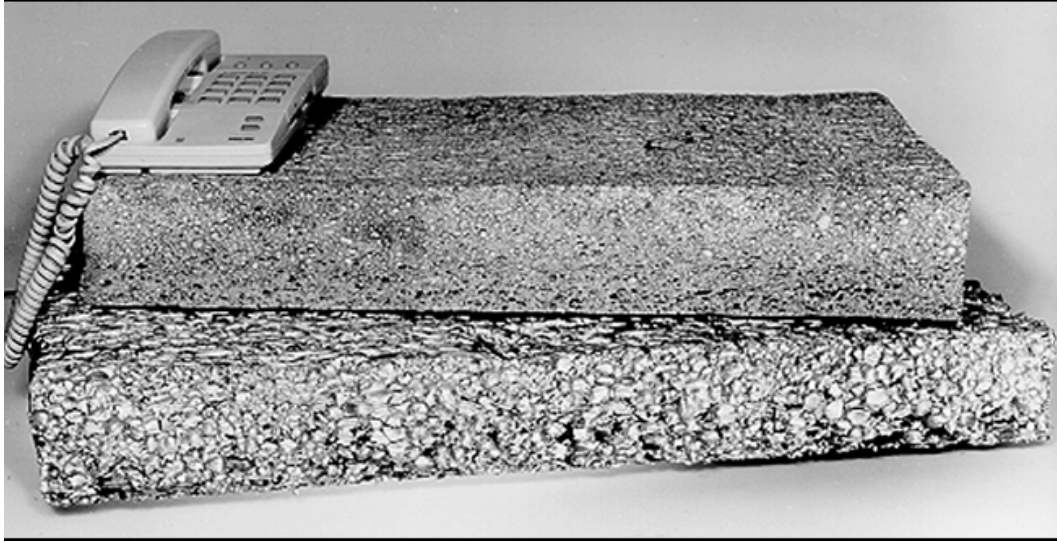
En basit metot erimiş alüminyum dolu bir kabın zemininde havayı kabarcıklaştırmak ve tepede oluşan baloncukları soğutmaktır. Sıvı durumdaki metal içerisine gaz enjektisi yöntemi ile alakalı şema Şekil 3.2’ de verilmiştir [22].



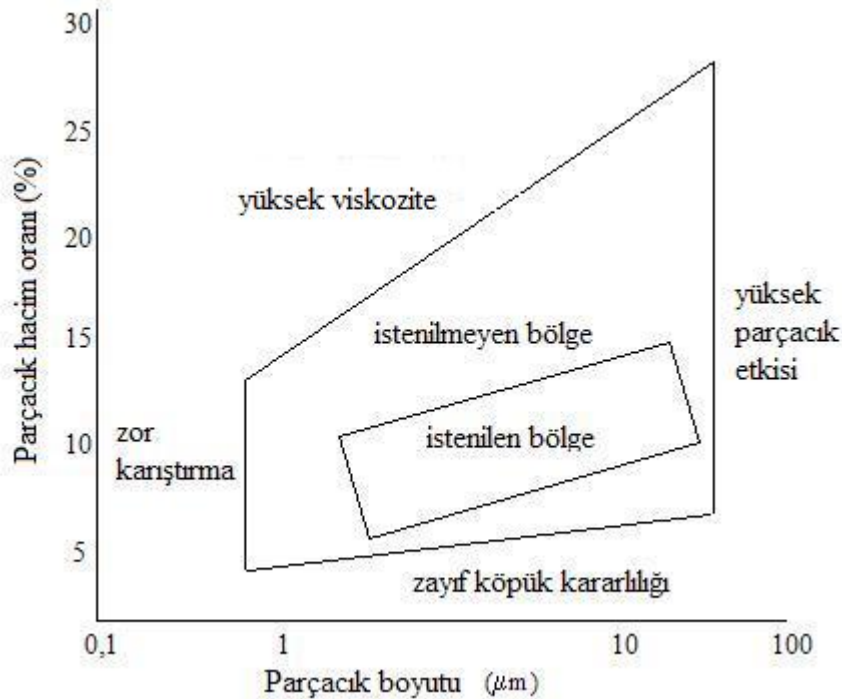
Şekil 3.2. Sıvı durumdaki metal içerisine gaz enjekte edilerek köpürtme işlemi [22]

Kullanılan gaz sıvı durumdaki metal içerisine direk ilave edilirse kabarcıklar kolayca oluşur. Oluşan bu kabarcıkların homojen dağılımını, gözenek yapısını ve gözenek duvar kalınlığını kontrol etmek zordur Bu yöntemle göre metalin daha kararlı bir yapı halini alabilmesi için seramik parçacıklar ilave edilmesi gerekmektedir. Kararsız oluşan gözenek yapıları sonucu gözeneklerin dış yüzeyinin tepesinde oluşan baloncuklar köpüklenmeden kaçabilir [11]. Sıvı durumdaki metal içerisine viskoziteyi ayarlamak amacıyla Silisyum-karbür, alüminyum oksit veya magnezyum oksit gibi seramik partiküller (SiC , Al_2O_3 , veya MgO_2) ilave edilir ve karıştırılır [1, 12, 23]. İkinci aşamada metal matrisli kompozit içersine dönel bir pervane yardımı ile gaz üflenir (hava, nitrojen, argon). Basınçlı havanın etkisi ile oluşan kabarcıklar yüzeyde yüzmeye başlar. Yüzeyde yüzmekten olan kabarcıklar bir bant yardımı ile dışarı doğru aktarılır. Son bölümde ise elde edilen köpük katılaşmaya bırakılır. Üretilen alüminyum köpüğün yoğunluğu $0,069 \text{ g/cm}^3$ ile $0,54 \text{ g/cm}^3$ arasında

değişmekte, ortalama gözenek ebatları 3-25 mm ve gözenek duvar kalınlığı 50-85 μm arasında olmaktadır [1]. Kanada da ALCAN firması bu yöntemi kullanarak köpürtülmüş alüminyum plakalar üretmektedir. Resim 3.4' de Norveç de bulunan Hydro - Aluminium firması tarafında bu yöntem ile üretilmiş metalik köpük görülmektedir [1, 21].



Resim 3.4. Eriyik metal içerisine gaz enjektörü ile üretilen metalik köpük [21]



Şekil 3.3. Parçacık boyutu ve parçacık hacim oranını arası problemler [21]

Bu yöntem ile üretilen köpükler de parçacık hacim oranına ve parçacık tane boyutuna bağlı olarak büyük veya küçük sorunlar meydana gelebilir. Şekil 3.3' de verilen parçacık boyutu ve parçacık hacim oranı arasındaki ilişkiyi belirleyen bir grafik literatürde belirtilmiştir [1, 21].

Alüminyum ve Alüminyum alaşımlarının köpürtülmesinde birinci yol, Kanada'da ki Cymat aluminium Corp. tarafından bulunmuştur. Silisyum karbür, alüminyum oksit veya magnezyum oksit parçacıkları, genelde bir tanesi kullanılarak alüminyum alaşımlarının eriyiğini kararlı yapmak için kullanılırlar. Güçlendirilmiş partiküllerin hacim oranları tipik olarak %10'dan %20'ye kadar değişir, ortalama partikül ölçüsü 5 μm 'den 20 μm 'ye kadardır. Eriyik içine özel tasarlanmış dönen pervane veya eriyikte gaz kabarcıkları üreten ve bunları üniform dağıtan vibrasyon hortumu ile gaz enjeksiyonu (hava, nitrojen, argon) köpürtülür. Köpük, eriyikte seramik parçacıkların bulunmasından dolayı nispeten durağandır. Köpürtülen metal döküm makinesinden geldiği gibi kapalı dış yüzeye sahip olarak veya köpürtüldükten sonra gereken şekilde kesilerek kullanılır. Bu direkt köpük işleminin avantajı, sürekli üretime ve düşük yoğunluklu yapılara izin veren büyük hacimde köpük içermektedir [12].

Takviye elemanı olarak kullanılan parçacıkların köpüğü kararlı hale getirme mekanizması literatürde tartışılmaktadır. Yaygın olarak kabul gören parçacıkların hücre duvarı üzerinde yığılmasının köpüklerin kararlı hale getirilmesinde anahtar rol oynadığıdır. Öncelikle, parçacıklar yüzey viskozitesini arttırmakta bu da filmdeki drenajın hızını kesmektedir. İkinci olarak, parçacıklar eriyik tarafından kısmen ıslanmaktadır [1, 9].

Son zamanlarda, eriyik köpürtme yolu, Avusturya'da ki metalurji fabrikasında ve hafif metal yeterlilik merkezinde (LKR) çalışan fizikçiler tarafından değiştirilmiştir [24]. Önemli nokta, tam benzerlik gösteren hücre ölçüleriyle köpüklere imkan tanıyan yeni gaz enjeksiyon bileşimidir. Dahası, köpükleri kalıplara dökerek, kapalı hücreli karışık şekillendirilmiş köpük parçalar sağlanmıştır. Alüminyum köpüğün bu

tipinin ticari buluşu *Metcomb* olarak adlandırılır [25]. Çizelge 3.1' de Cymat ve Metcomb köpüklerinin tipik bilgileri verilmiştir [12].

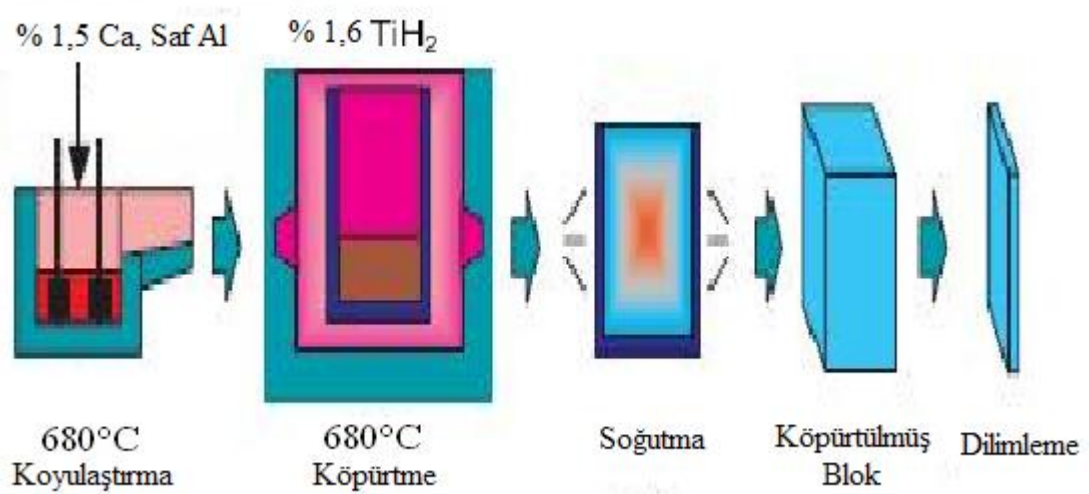
Çizelge 3.1. Alüminyum köpüklerinin 3 ailesinin bazı tipik özellikleri [12]

Özellik	Cymat veya Metcomb - tip köpükler	Alporas - tip köpükler	Alulight - tip köpükler
Tipik ürünler	Paneller: $\leq 16 \times 1 \times 0.2$ m ³ karışık şekilli kısımlar(Metcomb)	Bloklar: $\leq 2 \times 0.6 \times 0.5$ m ³ dilimler : 10 mm kalınlık	Bloklar: $\leq 1 \times 0.5 \times 0.2$ m ³ karışık şekilli kısımlar AFS-sandviç paneller: $\leq 2 \times 1 \times 0.02$ m ² 0.3-0.7 *
Yoğunluk aralığı (g/m ³)	0.069-0.54	0.18–0.24*	0.3–0.7*
Gözenek çapı (mm)	3-025	2–10	2–10
Hücre duvar kalınlığı (µm)	50-85	-	50–100
Uygun alaşım aralığı	Al alaşımları	Al, AlZnMg	Al-, Zn-, Pb-, Sn-, Au-alaşımları
Literatür	Ashby et al.(2000), Harte ve Nichol (2001), Leitlmeier et al.(2002) ve Kenny(1996)	Ashby et al. (2000) ve Miyoshi (1999)	Ashby et al.(2000) Baumgartner et al.(2000), Baumeister, (2000), Stanzick et al.(2002) Seeliger (1999,2001)
Köpük üreticilerinin ve dağıtımçıları nın web adresleri	www.cymat.com www.lkr.at www.hkb.at	www.metalfoam.co.kr www.gleich.de	www.alulight.com www.lkr.at www.alm-gmbh.de (AFS) www.ifam.fhg.de

Şu anda metalik eriyikleri köpürtmek için 3 yol vardır: Birincisi, sıvı metale gaz enjekte ederek, ikincisi, erimiş metale gaz bıraktıracı püskürtme faktörlerin karıştırılması ile sıvıda uygun gaz bırakılmasına sebep olarak, üçüncüsü, daha önce sıvıda çözünen gazın çökmesi ile [12, 26].

3.2. Sıvı Durumdaki Metal İçerisine Köpürtücü Madde İlavesi ile Metalik Köpük Üretimi

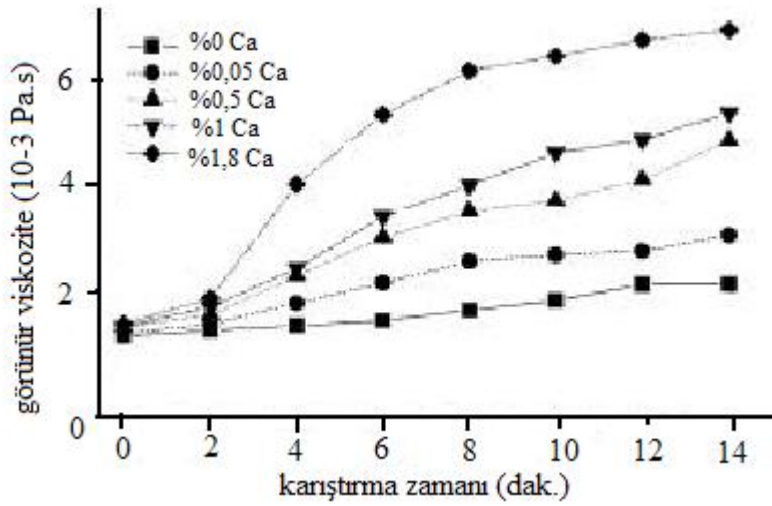
Eriyikleri köpüklendirmek için ikinci bir alternatif yol ise ergiyik içine gaz üflemek yerine direkt olarak köpürtücü madde eklemektir. Köpürtücü madde, ısı etkisi altında ayrışır ve köpüklenme işlemini devam ettirecek olan gazı salı verir. Bu yöntemin modern bir versiyonu Şekil 3.4’ de gösterilmiştir [27].



Şekil 3.4. Sıvı durumdaki metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme [27]

Küçük çaplı sanayilerde kullanılmakta olan bu metot, Japan Shinko Wire firması tarafından 1986 yılından bu yana kullanılmakta ve böylece günlük köpük üretim hacmi 1000 kg. kadar çıkmaktadır [11]. Bu teknikte alüminyum eriyiği içine 680 °C’ de kalsiyum metali eklenir ve dakikalarca karıştırılarak viskozitesi sürekli olarak beş kata kadar artırılır. CaO, CaAl₂O₄ oluşumu veya bazen Al₄Ca oluşumundan dolayı sıvı metal kıvamlı bir hal alır. Şekil 3.5’ de alüminyum eriyiğinin viskozitesinin değişik oranlarda kalsiyum eklenerek karıştırılmasından nasıl etkilendiğini gösterilmektedir. Tam bir köpük üretiminde eklenen Ca oranı genellikle ağırlıkça % 1,5 – 3 civarındadır. İstenilen viskozite değerine ulaşıldıktan sonra, sıcak koyulaştırılmış sıvı içine, hidrojen gazı salaran köpürtücü madde görevini gören TiH₂ eklenir. Eklenen TiH₂ miktarı genel olarak ağırlıkça % 1,6’ dır. Eriyik kısa süre içinde genişlemeye başlar ve kademeli olarak yavaş yavaş tankı köpük ile doldurur. Köpürme işlemi sabit basınç altında gerçekleşir. Alaşımın erime noktasının altındaki

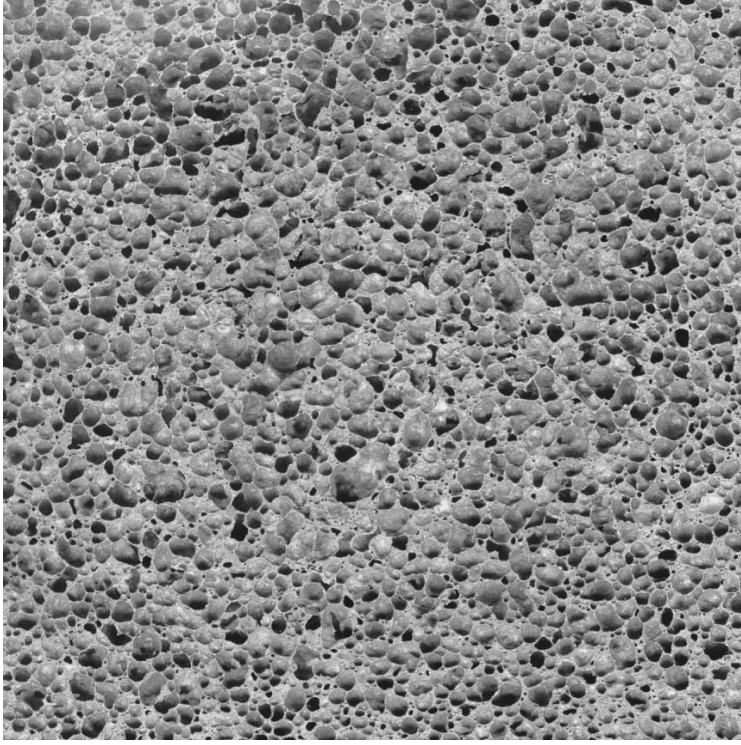
bir değere kadar tank soğutulduktan sonra sıvı köpükler katı alüminyum köpük haline dönüşmeye başlar ve daha sonraki işlemler için kalıptan çıkarılır. Tipik büyüklüğe sahip bir kısım malzemenin köpüklendirilmesi işleminin tamamı 15 dakika gibi bir süre alır. Kullanılan yöntemde ergiyik içerisinde gaz enjekte etmek yerine direkt olarak TiH_2 , ZrH_2 gibi köpürtücü madde ilave edilerek köpürtme yapılır. Zirkonyum hidrat'ın (ZrH_2) köpürtücü madde olarak kullanıldığı bilinmektedir. Fakat pahalı olduğu için tercih edilmez [1, 27].



Şekil 3.5. Al eriyiğinin viskozitesinin Ca oranına bağlı değişimi [1]

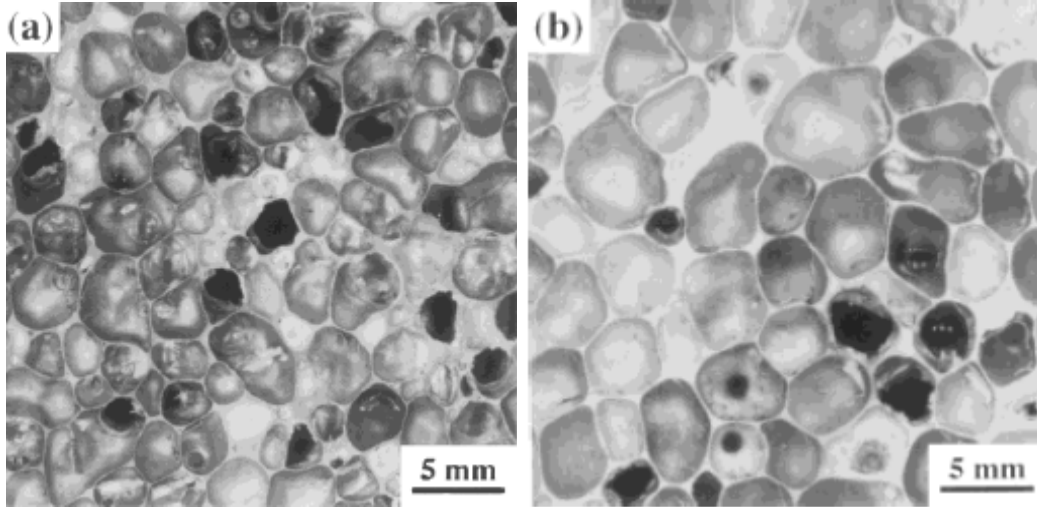
İşlem parametrelerindeki dikkatli bir ayarlama gayet homojen köpüklerin oluşmasını sağlamaktadır. Bu yolla üretilen köpüklerin ticari adı Alporas olarak bilinir. Son zamanlarda en homojen alüminyum köpüklerden biridir .

Bu tarz köpüklerin morfolojisi Resim 3.5' de gösterilmiştir. Sadece ortalama hücre çapı ve viskozitesi arasında değil ayrıca en son elde edilen köpük öz kütlesi ve viskozitesi arasında da deneysel bir bağ vardır. Literatürde, ağırlıkça % 0,5 ve 0,6 arasında bir konsantrasyon değeri için 670 – 705 °C arasında bir köpürtme sıcaklığında Zirkonyum Hidrat'ın (ZrH_2) köpürtücü madde olarak kullanılabileceğini tavsiye edilmiştir [1].



Resim 3.5. Sıvı durumdaki metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile üretilmiş köpüğün gözenek morfolojisi [1]

Ticari Alporas köpüğü kapalı hürse yapıları oldukça hafif bir maddedir. Özellikle Alporas köpüğü ses ve enerji emme konusunda ciddi gelişmeler kaydetmiştir. Shinko Wire firması parçacık döküm işlemini kullanarak Alporas köpüğünü üretmektedirler ve ürettikleri malzemelerin yoğunluğunu ve gözenek boyutunu kontrol edebildiklerini söylemektedirler (Resim 3.6). Shinko Wire firması tarafından üretilen köpüklerin tipik boyutu 2050*650*450 mm' dir. Bir tane köpük bloğunun ağırlığı yaklaşık 160 kg ' dır. Ortalama gözenek boyutu 2 ile 10 mm arasında değişen blokların kesildikten sonraki yoğunlukları tipik olarak 0,18 ve 0,24 g/cm³ arasında değişmektedir. Hem yatayda hem de dikeyde özkütle eğimi gözlemlenmiş ve en düşük özkütle değerinin bloğun ortasının en üstünde bir yerde olduğu belirtilmiştir. Köpük üretmek için kullanılan bu yöntemde ilave edilen köpürtücü maddelerin en büyük dezavantajı, ergiyik içerisine tozlar ilave edildikten hemen sonra gaz ayrışma reaksiyonunun başlamasıdır. Bu sebepten yüksek kalitede köpük üretimi, gözenek yapısının kontrolü ve köpürtme yönteminin kontrolü çok zordur [1, 12, 27].



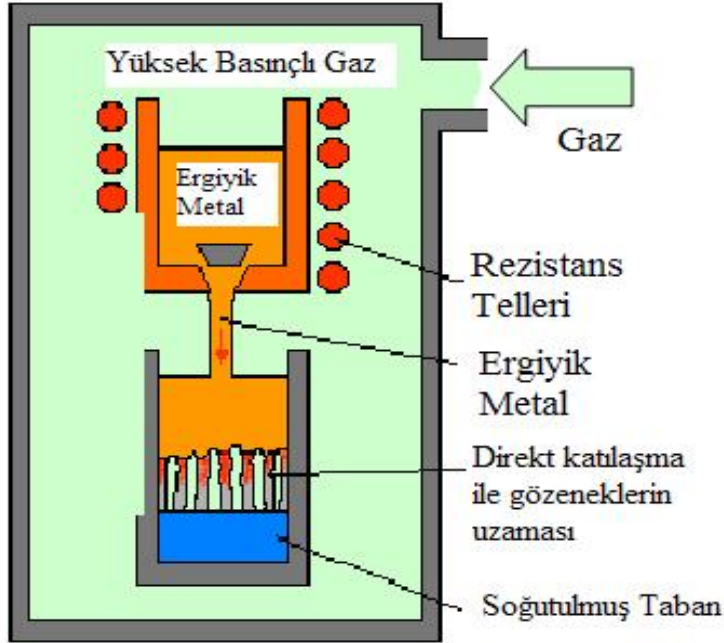
Resim 3.6. Tipik gözenek yapıları a) küçük hücre tipi b) klasik ALPORAS [27]

3.3. Ergitme-çözünürlük-filtrasyon yöntemi ile metalik köpük üretimi

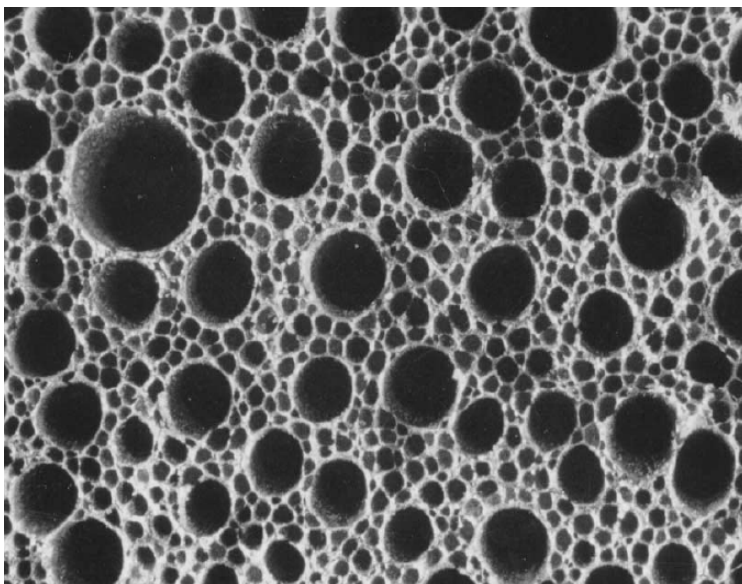
Bu yöntem yaklaşık on yıldan daha fazla bir süre önce hidrojen gazı yardımı ile ötektik sistem de bazı metalik yapıları köpürtmek için kullanılmıştır [1]. Elde edilen köpüklerin gözenek yapısı açık gözenekli metalik köpük yapılardır. GASAR yönteminde, metal üst kısımdaki tank içerisinde ergitilir. Haricen düzeneğin içine gönderilen hidrojen gazı sıvı tarafından emilir. Emilen hidrojen gazı metali bozunmaya uğratarak, sıvı durumdaki metal içerisinde gaz kabarcıkları oluşturur. Sıvı metal içerisinde mevcut olan hidrojen gazının çözme etkisi haricen uygulanan basıncın artması ile artar. Gazı sönümlemiş olan erimiş sıvı, alt kısmı soğutulmuş olan başka bir tank içine aktarılır. Sıvı durumdaki metal, tankın soğutulmuş olan tabanından yukarı doğru ilerleyerek katılaşır. Düzeneğin hemen hemen her kısmı kontrol edile bilen basınç altındaki gaz ile sarılmıştır. Tipik katılma hızı 0,05 mm/sn' den 5 mm/sn kadardır. GASAR yönteminin şematik gösterilişi Şekil 3.6'da verilmiştir [13, 28].

Bu yöntem ile üretilen metalik köpüklerin gözenekleri katılaşmaya paralel olarak şekillenir ve genel olarak küresel şekillidir. Gözenek şekli ve ebatları, kullanılan metal ve alaşımların kimyasal kompozisyonuna, eriyik sıcaklığına, gaz basıncı ve soğutma yönü ile kontrol edilebilir. Kullanılan yöntem ile köpük üretiminde

alüminyum, nikel, bakır, demir, magnezyum ve çeşitli alaşımlar kullanılmıştır. Gözenek çapları 10 μm ile 10 mm arasında, gözeneklilik oranı ise % 5-75 arasındadır [1]. Oluşan gözeneğin tipi genellikle yuvarlak ve gözenekler homojen dağılımlıdır (Resim 3.7).



Şekil 3.6. Açık gözenekli metalik köpüğün GASAR yöntemi ile üretimi [28]

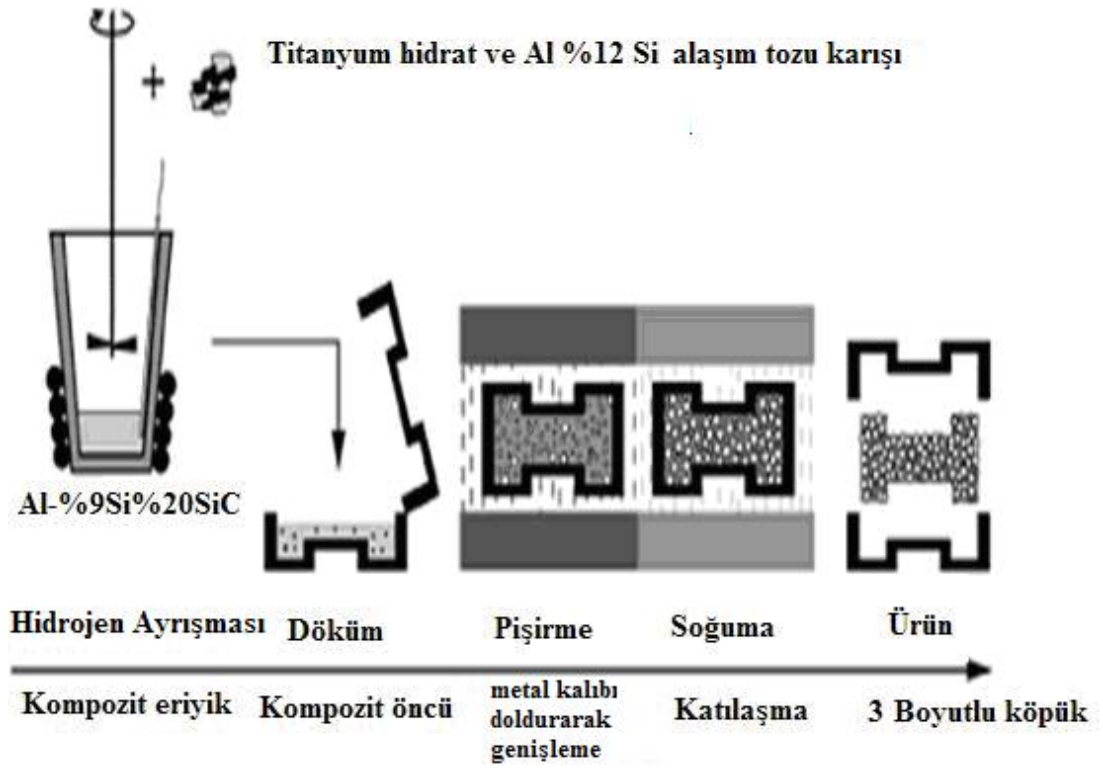


Resim 3.7. Gasar yöntemi ile üretilmiş köpüğün gözenek yapısı [1]

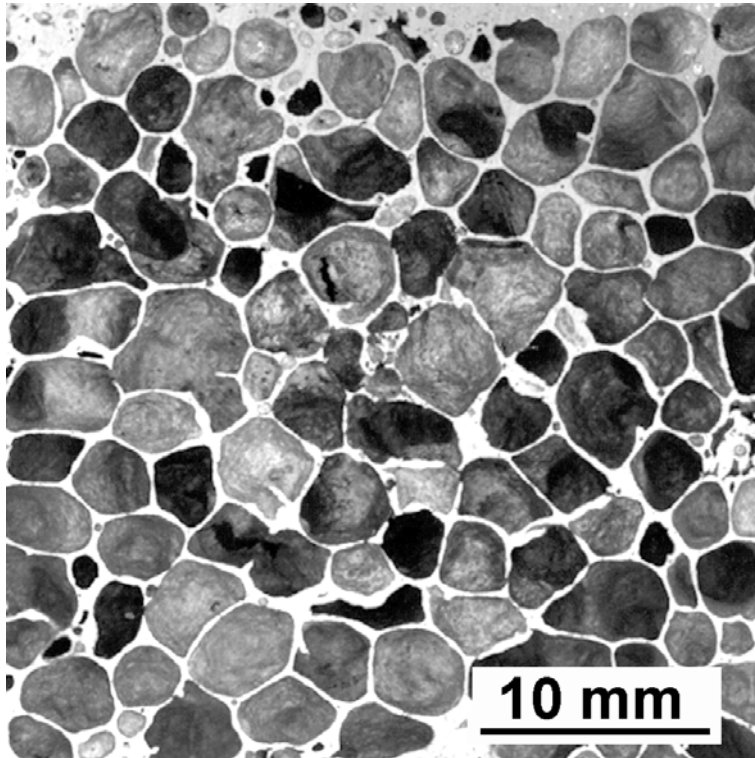
3.4. Sıvı Metal Yolu ile Köpükleşebilen Öncü Üretimi (FORMGRIP)

Eritme metodu kullanılarak köpük hücre yapısına sahip alüminyum köpük üretimi için genel olarak iki temel yaklaşım geçerli durumdadır. Bu metotlardan ilki Japonlar tarafından geliştirilmiş sıvı durumdaki yapı içine köpürtücü ilavesine dayanmaktadır. Bu işlem karıştırılmış eriyik alüminyum içine kalsiyum eklenmesine dayanır. Bir sonraki adım ise titanyum hidrat tozları ilave etmektir. Bu hidratın ayrılması eriyik içinde gaz köpüklenmesini meydana getirir. Metotlardan ikincisi de ALCAN tarafından patenti alınan aralıksız devam eden döküm tekniğidir. Bu metodun temel prensibi alüminyum içerisine seramik parçacıklar ilave edilerek eriyik durumdaki yapı içersine gaz (genelde hava) kabarcıklaşması sağlamaktır. Böylece eriyiğin yüzeyinde köpük oluşumu meydana getirilebilir. Kapalı hücre yapısına sahip alüminyum köpük üretmek için alternatif bir yolda köpürtücü madde içeren metal tozlarından elde edilmiş öncü malzemeyi fırında pişirmektir [11].

Alüminyum temelli köpük üretimi için yukarıda bahsedilen tekniklerin avantajlarını içeren FORMGRIP (Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor) olarak bilinen metot ise değişik bir yöntemdir [29]. Bu yönetime göre; ilk etap da, önceden ısıtılma tabi tutulmuş gaz üretici titanyum hidrat tozları ile Al tozları karıştırılır. Öncül ısıtma işlemi ile yüzeyde titanyum oksit bariyer tabakası meydana getirilmektedir. Düzenli oksitlenme olayını sağlamak için periyodik olarak hidrat karıştırılır. Yavaş yavaş soğutulmuş Al/SiC kompozit eriyik içinde (620° C) klasik mekanik karıştırma işlemi (1200 rpm) uygulanarak toz karışım dağıtılır. Toz eklenmesinden sonra yaklaşık bir dakika kadar eriyik karıştırılır. Bu metotla nispeten düşük gözenek seviyesine sahip öncül kompozit materyaller üretilir. İşlemin ikinci aşamasında grafit kalıp içine (30*30*45mm) yerleştirilen öncül materyal sıvı duruma gelinceye kadar ısıtılır ki amaç hidrojeni ayrıştırarak hücreli yapı elde etmektir. Bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 3.7' de verilmiştir [11, 30]. Resim 3.8' de bu yöntem ile üretilmiş metalik köpüğün gözenek morfolojisi görülmektedir.



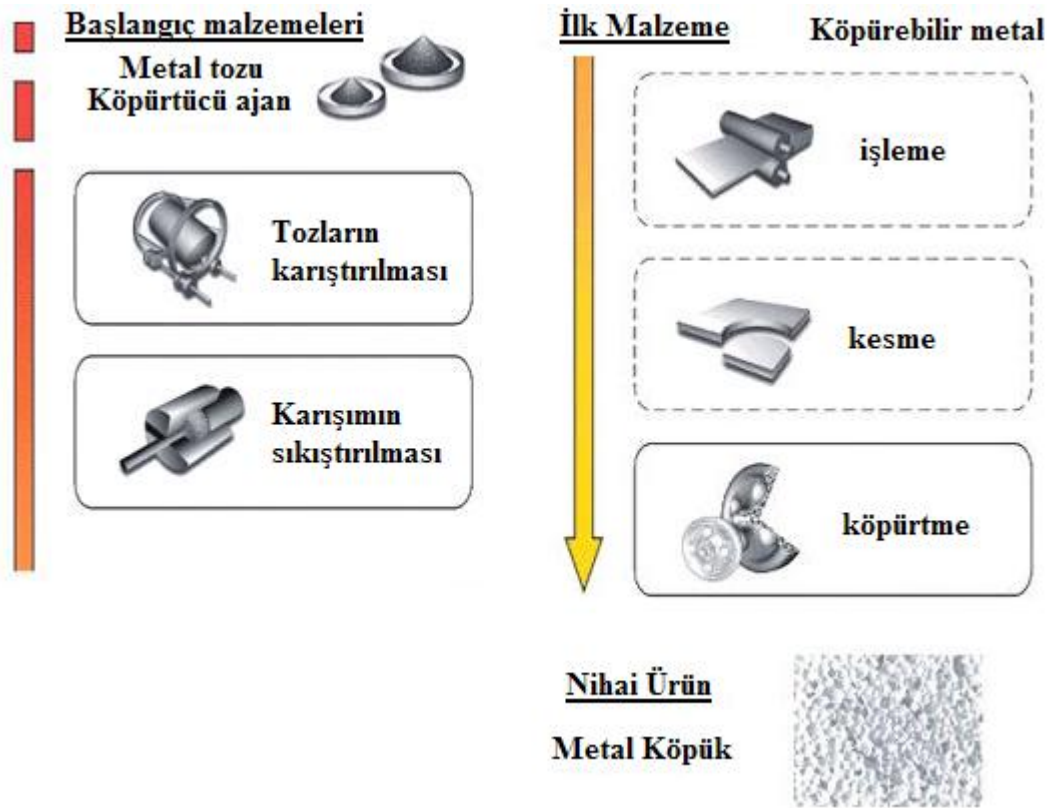
Şekil 3.7. FORMGRIP yöntemi [30]



Resim 3.8. FORMGRIP yöntemi ile üretilmiş köpük yapı

3.5. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Metalik Köpük Üretimi

Almanya (Bremen) Fraunhofer-Institute tarafından geliştirilen bir metotla köpüklü metaller elde edilebilir. Bu metotların temel düşünceleri karşılaştırılmalı olarak eskidir ancak son zamanlarda tatmin edici kaliteye sahip köpük bileşenlerinin yeni tür köpük üretimine izin vermesi dolayısıyla bu metotlar daha kapsamlı hale getirilmiştir. Başlangıç materyali olarak metal tozları kullanıldığı için bu metot için genellikle “toz metalürjisi” adlandırılması kullanılır [1] . T/M yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.8’ de verilmiştir [31].

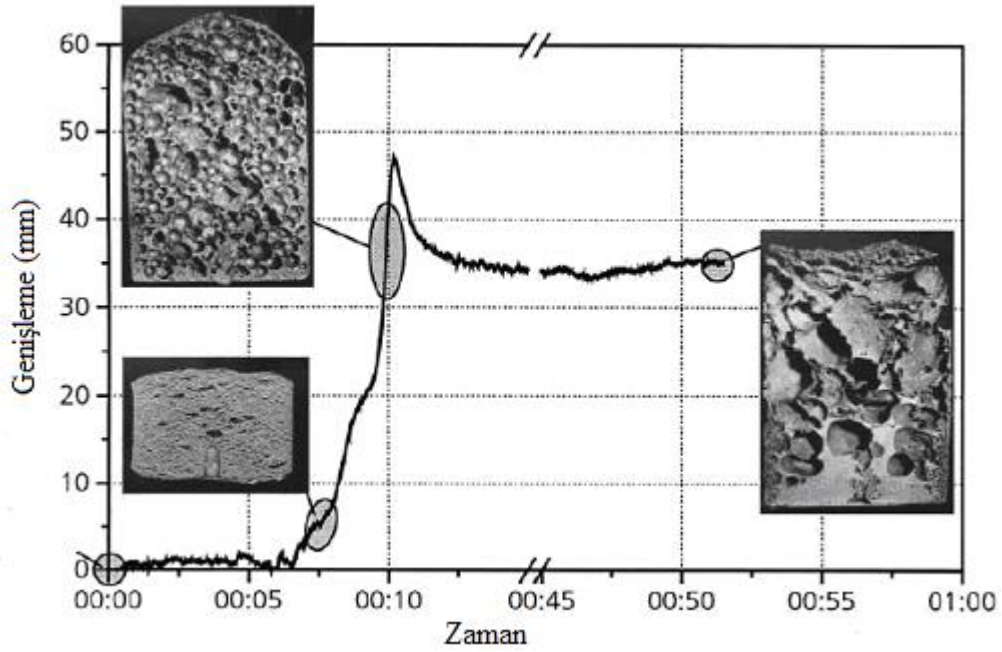


Şekil 3.8. IFAM üretim şeması [31]

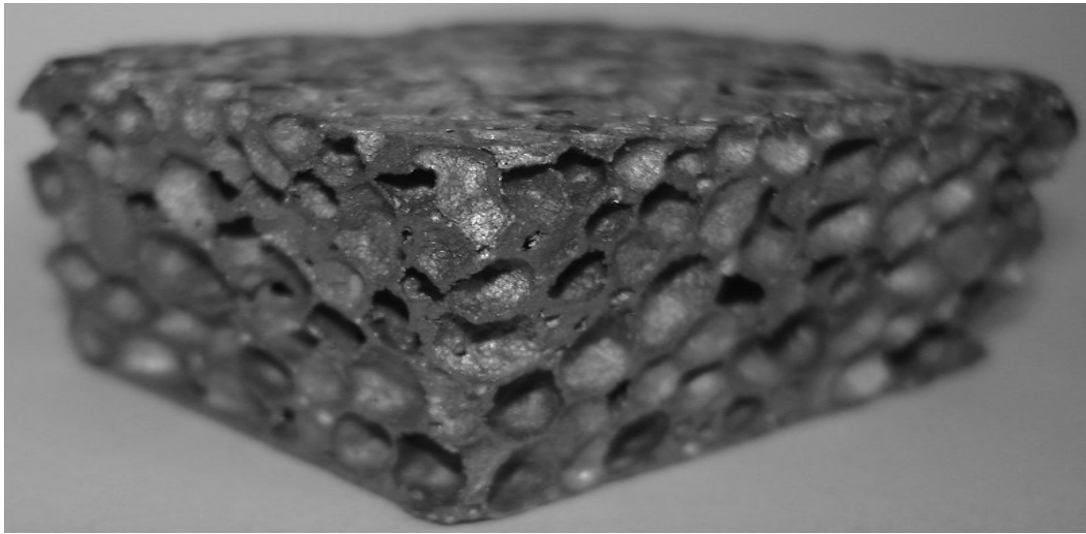
Üretim süreci metal tozların (basit metal tozlar, alaşım tozları, metal toz karışımları) köpürtücü madde tozu ile karıştırılmasıyla başlar. Bundan sonra karışıma daha katı bir hal kazandırmak için sıkıştırma (yoğunlaştırma) işlemi yapılır böylece yarı tamamlanmış ürün elde edilmiş olur. Prensipde sıkıştırma işlemi köpürtücü madde tozlarını koruyan herhangi bir teknikle yapılır. Bu sıkıştırma işlemlerine birkaç örnek

olarak; sıcak tek yönlü veya izostatik sıkıştırma, çubuk ekstrüzyonu gibi metotlar verilebilir. İstenilen öncül materyalin şekline göre, sıkıştırma metodunun seçimi yapılır. Şuanda günümüzde en ekonomik metot ekstrüzyon metodudur ve bu yüzden de tercih edilen yoldur. Öncül materyalin üretimi aşamasında çok dikkatli davranılmalıdır. Çünkü bu aşamadaki herhangi bir gözenek kalıntısı veyahut diğer bir hata devam eden süreçte istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Daha sonraki basamak ise matris malzemenin erime noktasına yakın sıcaklıkta yapılan ısıtma işlemidir. Isıtma sonrası matris malzeme içerisinde dağılmış köpürtücü madde tozları daha yoğun bir hal alır. Bir sonraki aşamada ise öncü materyal matris malzemenin ergime sıcaklığının üstünde veya yakın bir sıcaklıkta ısıtılarak matris malzeme içinde homojen bir şekilde dağılmış köpürtücü madde tozlarının ayrışması sağlanır. Salınan gaz sıkışmış öncü malzemeye bir kuvvet uygulamakta ve onu genişletmektedir, böylece yüksek gözenekli yapıya sahip malzeme elde dilmektedir. Tam anlamıyla bir genişleme zamana, sıcaklığa ve öncül malzemenin boyutuna bağlıdır ve bu zaman birkaç saniye ile birkaç dakika arasında bulunmaktadır [1, 32]. Şekil 3.9' da alüminyum ve TiH_2 öncü materyalin genişleme eğrisini göstermektedir. Şekil 3.8' da görüldüğü üzere genişleyen köpüğün hacmi, zaman ve bununla birlikte bazı morfolojilere bağlı bir fonksiyon olarak çeşitli genişleme seviyelerinde gösterilmiştir. Köpük maksimum genişlemesi ve sonraki çökme oldukça düzgün köpük morfolojisine bağlı olarak gösterilmiştir. Köpürtülecek malzemede hidrojenin Salı verilmesi TiH_2 tozunun ayrışma sıcaklığı üstündeki sıcaklıklarda başlar. TiH_2 partikülleri metal matris içerisinde var olan hidrojen çıkışını engeller. TiH_2 'nin ayrışmasıyla hidrojen gazı baloncuk şeklinde serbest kalır ve ısının etkisinin artmasıyla matris malzemenin genişlemesine sebep olur [1, 33].

Maksimum genişleme ve buna bağlı olarak katı metal köpüğün yoğunluğu köpürtücü madde miktarının ve bazı diğer köpürtme parametrelerinin oranlarının (sıcaklık ve ısıtma oranı-hızı) ayarlanmasıyla kontrol edilebilir. Çinko ve alüminyum alaşımları için, titanyum ve zirkonyum hidratlar (TiH_2 , ZrH_2) köpürtücü madde olarak kullanılır. Çelikler ise karbonatlar ile köpüklendirilebilir, $SrCO_3$ gibi. Eğer metal hidratlar köpürtücü madde olarak kullanılırsa birçok durumda köpürtücü madde oranının %1' de civarında olması uygundur [1].



Şekil 3.9. Alüminyum içindeki TiH_2 'nin zamana bağlı genişleme davranışı [1]

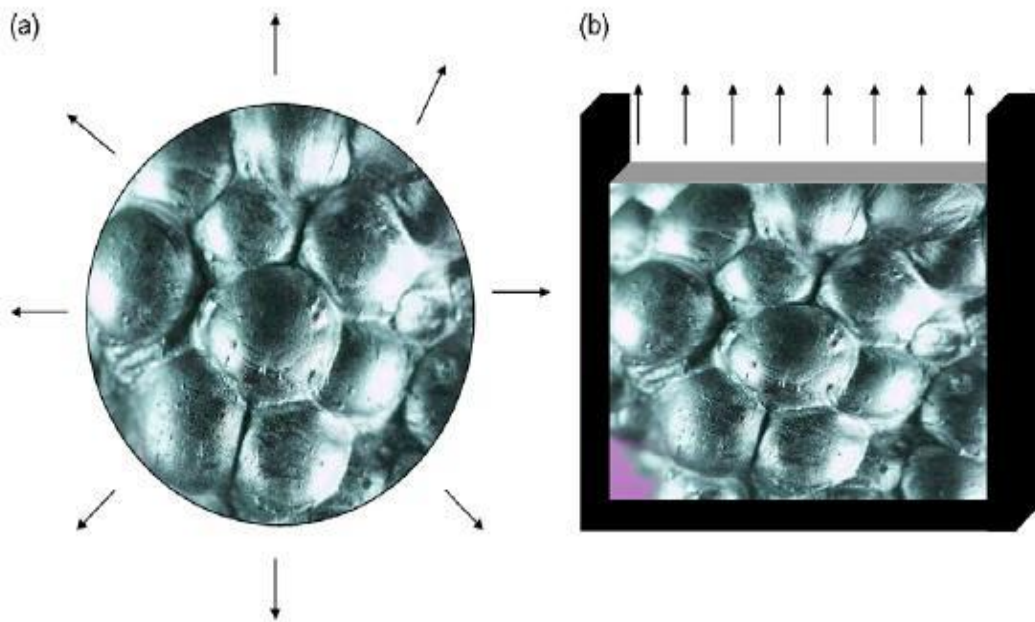


Resim 3.9. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş Al köpüğün gözenek yapısı

Bu metot sadece yalnız alüminyum ve alaşımları için sınırlandırılmamıştır; kalay, çinko, pirinç kurşun, altın ve diğer bazı metaller ve alaşımları da, uygun köpürtücü madde yöntem parametreleri seçilerek köpürtme yapılabilir. Son zamanlarda bu yöntem ile düşük karbonlu çelik tozları da köpürtülmektedir [34]. Köpüklendirme işleminde en yaygın olarak saf alüminyum ve onun işlenmiş alaşımları kullanılır.

Düşük ergime noktaları ve iyi köpürme özelliklerinden dolayı AlSi7Mg ve AlSi2 gibi bazı döküm alaşımları da sık sık köpüklendirme için kullanılır.

Bir parça öncü materyalin, fırında köpürtülmesiyle belirsiz bir şekle sahip bir parça metal köpük elde edilir. Eğer genişleme belirli bazı yönergelerle sınırlandırılmışsa durum daha farklı olabilir. Sınırlandırma işlemi ya da köpüğü yönlendirme işlemi öncül materyalin içi boş bir kalıp içine yerleştirilmesi ve ısıtılarak genişletilmesiyle yapılır. Şekil 3.10' da gözenek yönlenmesinin şematik gösterimi verilmiştir [35].



Şekil 3.10. Net bir şekle sahip parça elde edilmesi
a) serbest köpürme b) sınırlandırılmış köpürme[35]

Köpük yapı elde edilecek malzeme, eğer fırında köpürtülüyorsa matris malzemenin genişlemesi kısıtlanmadığı sürece öncü malzeme düzensiz şekilli ve yayılmacı bir tavır sergileyerek köpük haline gelecektir. T/M yöntemi ile yapılan köpürtme işleminde, öncü malzeme içi boş bir tüp ya da kalıp içerisine konulup ısıtma işlemi daha sonra uygulanırsa, öncü malzeme genişleyerek içine konulduğu yapının şeklini alır [35]. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresi dengeli olarak belirlenirse ısıtma süresince kararlı yapıya sahip düşük yoğunluklu malzemeler üretmek mümkündür. Köpürtme süresi uzun tutulursa büyük gözenekli ve çok düşük yoğunluk da yapılar

elde edilir. Hafif metallere olan ilginin artması neticesinde son yıllarda, toz metalurjisi yöntemi ile metalik köpük üretimi özellikle Almanya'da geliştirilerek Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü'nde (IFAM) tarafından çeşitli kompleks yapılara sahip köpür metaller üretilmiştir (Resim 3.10 ve Resim 3.11).



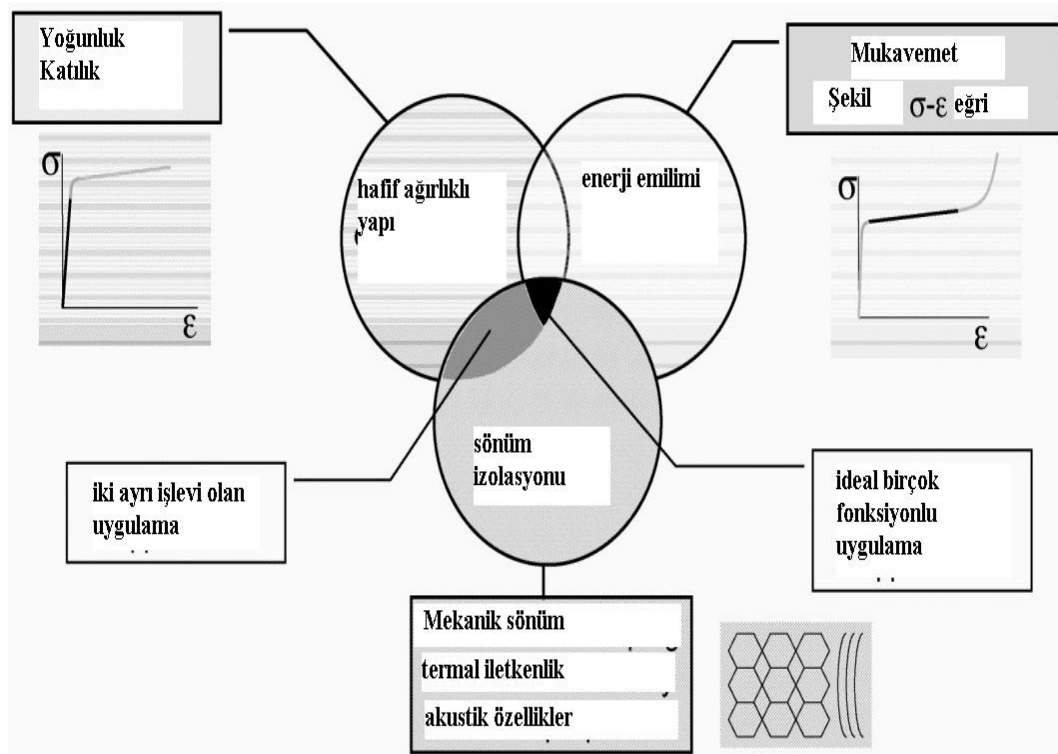
Resim 3.10. IFAM tarafından T/M yöntemi ile üretilmiş Al köpük parçalar [31]



Resim 3.11. Bükülmüş Al sandviç köpükler [31]

4. METALİK KÖPÜKLERİN KULLANIM ALANLARI

Gözenekli yapılar ve metalik köpükler ile ilgili çalışılmalar sadece bilimsel değil aynı zamanda endüstriyel uygulamalarla ilgili araştırmalarda da faydalı olmuştur. Son zamanlarda, düşük yoğunlukta olan alaşımların geliştirilmesine büyük bir talep artışı olmuştur. Günümüz teknolojisine bağlı bazı mühendislik problemleri gözenekli malzemeler kullanılarak çözülmüştür. Metal köpükler, hafifliğin arandığı yapılarda, enerji emiş cihazları, akustik ve termal kontrol bakımından dikkat çekici özelliklere sahiptirler. Metalik köpüklerin tercih edildiği bütün bu ihtiyaç alanları, ilk geliştirildiklerinden beri otomotiv endüstrisiyle bağıntılıdır. Fonksiyonel uygulamalar gemi yapım, uzay endüstrisi ve inşaat mühendisliğinde yapılmaktadır. Şekil 4.1’de otomotiv endüstrisine paralel olarak çeşitli ihtiyaç alanları verilmiştir. Kutular, daireler içerisinde verilen üç uygulama alanlarından bir tanesi için bunu kullanışlı yapan köpüğün ilgili özelliklerini içermektedir [12].



Şekil 4.1. Metalik köpükleri uygulamanın faydaları [1, 36]

Hafif yapılar: Mühendislik malzemelerinin eğilme mukavemeti ağırlık özelliğini dengelemek için kullanılabilirler. Örneğin, verilen ağırlık, genişlik ve uzunluktaki yassı köpük panellerin eğilme rijitlikleri kalınlıkları ve yoğunlukları ile yaklaşık orantılıdır. Her durumda hafif yapılarda yük-deformasyon eğrisinin tersinir ve yarı elastik kısmı kullanılır (Şekil 4.1' de küçük grafikler).

Enerji emilimi: Büyük boşluk oranları sayesinde, köpükler, malzemelerin gerilmeleri basınç mukavemeti ile sınırlandırıldığında deforme olurken büyük miktarlarda mekanik enerji emerler. Köpükler ayrıca, çarpışma durumlarında limit hızlanmalarında darbe enerjisi emicisi gibi davranabilirler. Metal köpükler polimer esaslı köpüklerden daha yüksek basma mukavemetine sahip olabilir, bugün polimer esaslı köpüklerin kullanılmadığı alanlarda uygulanma imkânı bulabilirler [12, 13].

Akustik ve termal kontrol: Bazı durumlarda köpükler ses ve titreşimi engellerler. Termal iletkenlikleri düşüktür. Bu özellikler göze çarpmazlar, polimer köpükler daha iyi ses emicidirler fakat metalik köpükler diğer özellikleriyle birlikte daha kullanışlıdır.

Metal köpük sadece bir değil iki veya daha fazla özellikleriyle kullanılırsa rekabetçi olmaktadır. Örneğin, gerçek yaşamda kullanılan çok fonksiyonlu materyaller gösterir ki hafif ağırlıktaki yapı ses ve enerjiyi çarpışmada azaltır. Çoğu durumda, basit köpük karşılaşılan mühendislik problemi için uygun değerinde çözüm üretememektedir. Tek başına kullanılan levhalar yada yalnız kullanılan basit köpük paneller ihtiyaçlara yeteri kadar cevap verememektedir [12].

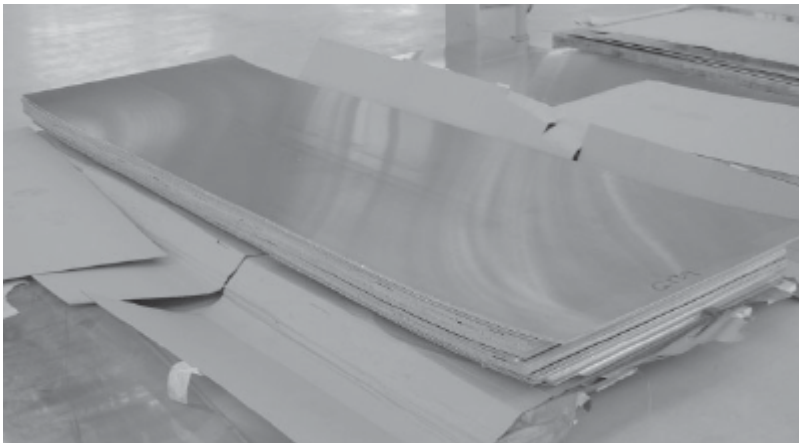
Günümüz teknolojinin enerji emilimi ve hafiflik bakımından ihtiyaç duyduğu yapılar metalik köpükler ile endüstriyel olarak kullanılan diğer plaka yapılar, içi boş profiller gibi materyallerin bir araya getirilmesiyle daha fonksiyonel bir hal almıştır (Resim 4.1, Resim 4.2, Resim 4.3).



Resim 4.1. Al köpük dolu Alüminyum tüp [31]



Resim 4.2. Karmaşık şekilli alüminyum sandviç köpük kesiti [37]



Resim 4.3. Alüminyum sandviç köpük panel [37]

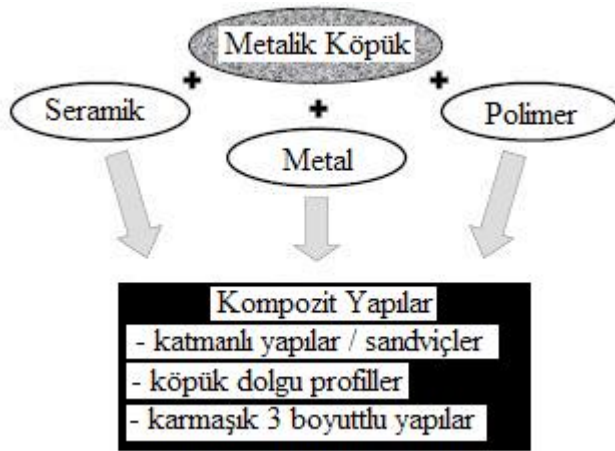
Tüpleri ve hemen hemen rast gele şekle sahip sütunları, alüminyum köpük ile doldurmanın çeşitli yolları vardır;

En kolay yol, köpüklenebilir öncül materyal bir çubuğu, sütunun içini dolduracak şekilde yerleştirmek ve bu ikisini, birlikte fırına koymaktır. Öncül materyal köpüklenmeye başlar ve sonunda bölmeyi tamamen doldurur. Bu metodun dezavantajı, köpükendirilecek materyale kıyasla, kullanılacak tüpün erime sıcaklığının mühim derecede fazla olmasının gerekliliğidir.(Eğer alüminyum köpükendirilecekse çelik tüpler kullanılmalıdır) [1].

İkinci bir alternatif ise, bir önceki metot da kullanılan çubuk yerine, bölmeyi sıkıca dolduran, köpüklenebilir, içi boş bir parça (kesit) koymak ve köpükle dolmasını sağlamaktır. Daha sonra, köpük sadece, dış bölmenin merkezine doğru genişler ve köpüklenme süresince bu yapıya mekanik destek sağlar. Bundan başka, bölme ve köpük arasındaki ısı kontak, köpüklenme süresince, bölmeyi çok sıcak hale gelmekten korur [1].

Üçüncü bir tercih ise, eş merkezli olarak düzenlenmiş iki tüpün, kompozit oluşturacak şekilde kalıptan geçirilmesidir ve böylece bu iki parça metalürjik bağla birbirine bağlanmış olur. Dıştaki tüp normal alüminyum alaşım iken içteki tüp köpüklenebilir materyal seçilmelidir. Köpükendirme basamağını takiben, içteki katman tüpün merkezine doğru genişler ve sonuç olarak içini tamamen doldurur [1].

Kompozit oluşturmak için diğer bir yöntem daha, ön-şekil verilmiş alüminyum köpük ana gövde üstüne, ısı alüminyum bileşen üretmektir, yani bir kompozit oluşturmaktır. Tabi ki, bu teknik tüplerle sınırlandırılmamıştır, hemen hemen her köpükendirilmiş ana gövde bu yolla kaplanabilir [1].



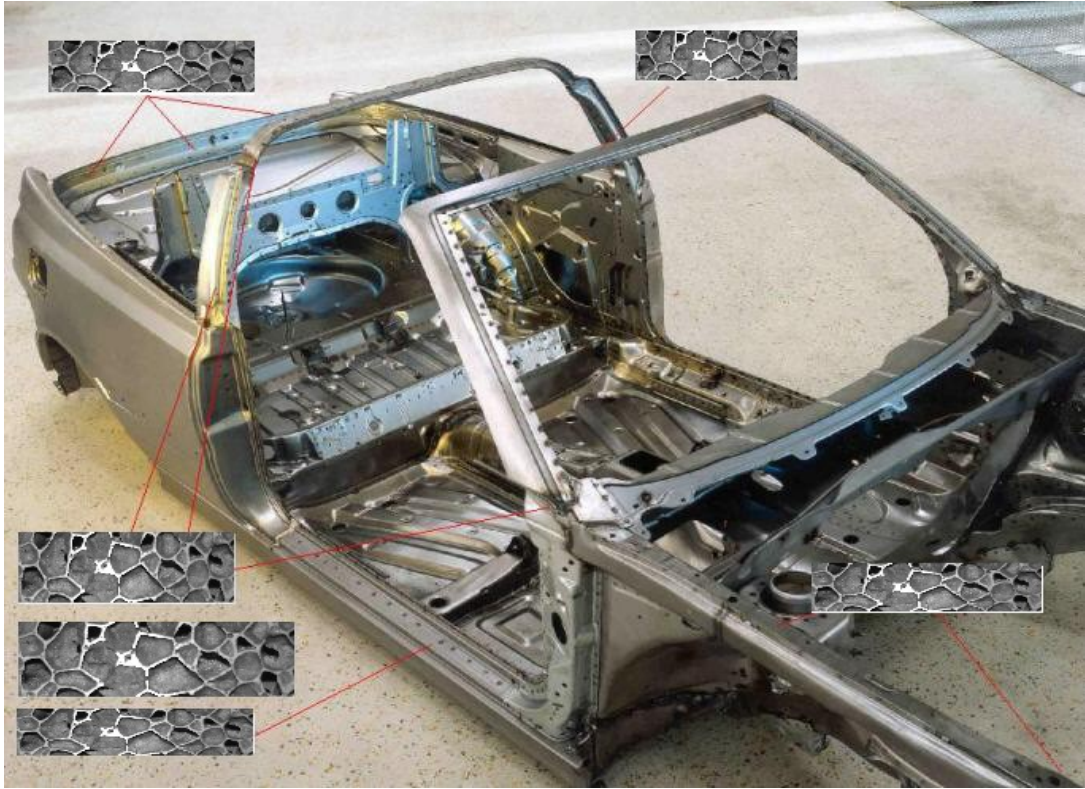
Şekil 4.2. Fonksiyonel olarak metalik köpüklerin kullanım biçimleri [31]

Fonksiyonel olarak metalik köpüklerin kullanım biçimleri şekil 4.2’ de verilmiştir [31]. 1994 yılında Alman araba üreticisi Karmann GmbH ve Bremendeki Fraunhofer-IFAM tarafından geliştirilen AFS (Aluminium Foam Sandwich) teknolojisi yoğun malzemelerle birleşen köpükler için bir örnektir. Bu sandviç paneller 3D-şekilli olabilir ve nispeten düşük ağırlıkta çok katı olabilir. Resim 4.4 yapışmanın kalitesini ve gözenekli yapıyı göstermek için üst yüzey levhasının kesildiği yassı paneli göstermektedir. Gözeneklerin görülebilmesi için levha sıyrılmıştır. Levhalar ve köpük çekirdeği arasındaki birleşme mukavemeti köpüğün içsel mukavemetinden daha büyüktür [12].



Resim 4.4. Karmann, (Almanya) tarafından üretilmiş alüminyum köpük sandviç(AFS) [3, 12, 13]

Köpürtülebilen öncü maddeyi deforme ederek elde edilen köpüklerde, petek yapısında veya gofret yapısındaki gibi karışık şekiller üretilebilir. Yeni yapısal prensipler ile birlikte alüminyum sandviç köpükler (AFS), arabanın içindeki konvansiyonel çelik kısımların önemli ağırlık azaltışları ile yerini alabilir. Aynı zamanda, araba yapısı içinde birçok kısmı ağırlık ve hacim bakımından azaltabilir, birleşimlerde yardımcı olabilir ve performansı artırmada maliyeti düşürebilir. Çünkü böyle sandviç paneller hafif olmanın yanında titreşim sönümleme etkisinde bulunabilirler [12]. AFS sandviç paneller, araba gövdesiyle bütünleşmeye yardımcı olan çeşitli kaynak teknikleriyle alüminyum kısımlarla birleşebilirler (Resim 4.5).

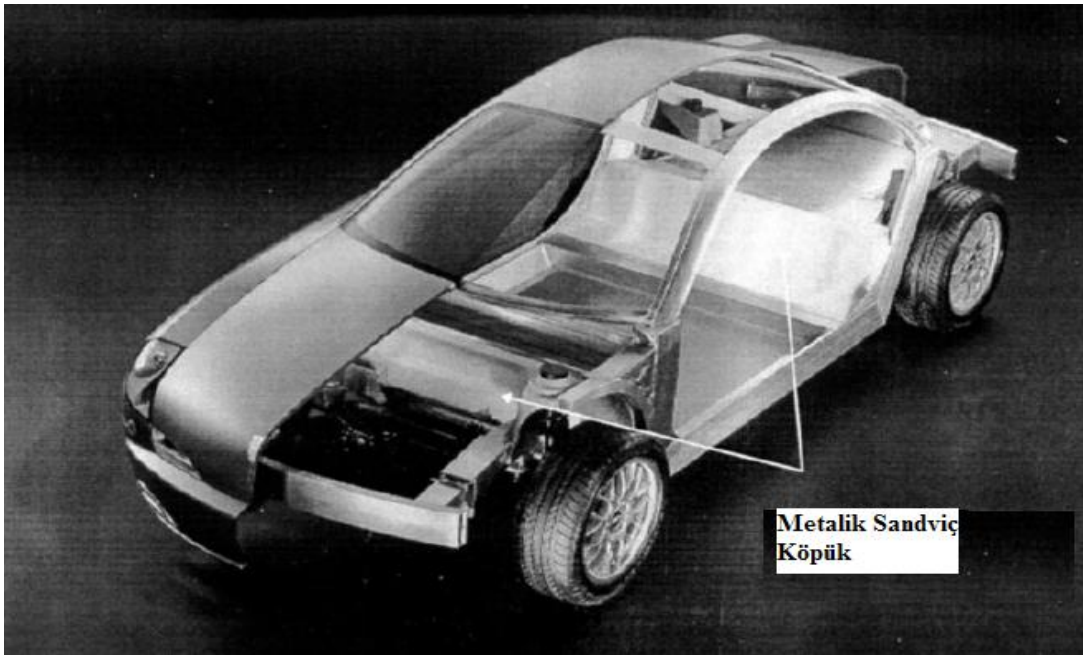


Resim 4.5. Metalik köpüklerin arabalarda uygulanması

Metalik köpükler iyi enerji absorbesi, ses absorbesi, yüksek sıkıştırma gücü, düşük özgül ağırlık ve yüksek rijitliğe sahip oldukları için çok farklı amaçlar için tercih edilmektedirler. Son zamanlarda ilerleyen teknolojiye paralel olarak metal köpükler, birçok yeni uygulama alanında denenmeye başlamıştır. Bu yeni alanların başında medikal ve zırh malzemelerine yönelik uygulamalar gelmektedir [38].

4.1. Otomotiv Sektöründe Metalik Köpük

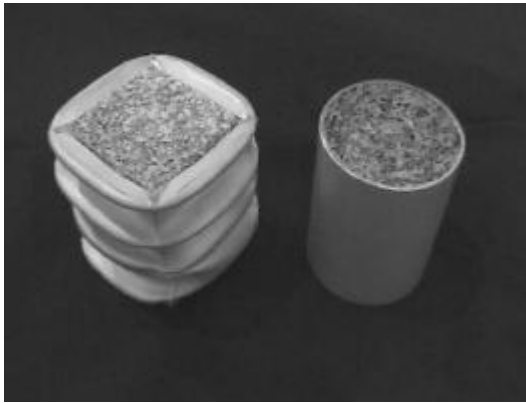
Toz metalurjisi gibi yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve kabul edilebilir üretim maliyetlerine ulaşılması başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok alanda metalik köpükler potansiyel kullanım sahalarını yaygınlaştırmışlardır. Kendine has özellikleri dikkate alındığında metalik köpük malzemeler darbe enerjisini sönümleme amaçlı kullanılan malzemelerdir. Köpük tipine (toz metalurjisi ile veya sıvı metal halinden üretilmiş), alaşımlandırılmasına ve yoğunluğuna bağlı olarak enerji sönümleme özellikleri değişebilir. Bu özellik büyük çaptaki otomobil üreticilerinin ilgisini çekmiştir [39].



Resim 4.6. Metalik köpüklerin Otomobillerde fonksiyonel kullanımları [32]

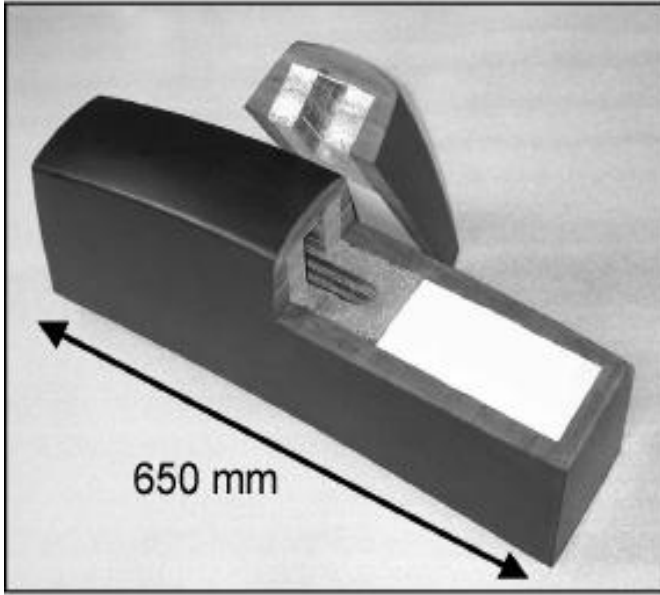
Alüminyum köpük uygulamaları için diğer bir örnek çarpışma emicileridir. Sigorta şirketleri, çarpışma durumlarında yolcuları koruyan güvenlik sınırlarını zorlamaktadırlar, araba hasarlarını ve bunu müteakip tamir maliyetlerini minimize etmek, otomobil imalatçıları ise bu standartlara ulaşmak için çarpışma kutu düşüncesini kullanmaktadırlar. Böyle çarpışma kutuları darbe kirişi ve arabanın ön çubuğu arasında yerleştirilmektedir. Onlar 15 km/saat hızında çarpışmanın bütün enerjisini emmek, araba iskeletine ek olarak ön-arka bileşenleri korumak için

deforme olurlar [13]. Çarpışma kutusu için bir seçenek, plastik göçen enerjiyi emen boş tüptür. Tüpün arızalı durumu, olağan aralıklarda tüpün uzunluğu boyunca plastik kıvrılmalar yaratmasıdır. Tüpün merkezine alüminyum köpük çekirdeği yerleştirilerek, enerji emişinde artış sağlanır. Dış tüp uzun kenarı boyunca katlanır fakat kırılma sayıları artar; sonuç olarak, dolu tüpün enerji emişi boş tüpten daha büyüktür. Enerji köpük çekirdeği tarafından da emilir ve köpük doldurulmuş tüpün enerji emişi tüp ve köpüğün ayrı ayrı enerji emişlerinden büyüktür [40]. Resim 4.7 deforme olmuş köpük dolu tüpü göstermektedir. FIAT ve Norveç Fen Bilimleri ve Teknoloji Üniversitesi tarafından yapılan çalışmalar göstermiştir ki geliştirilmiş çarpışma kutuları ile eksen çarpışmalarında enerji emişinin büyük oranda gelişmesi vardır [12].



Resim 4.7. Deforme olmuş köpük dolu tüp [12, 13]

Çarpışma emicileri ayrıca ray tabanlı araçlar içinde gerekmektedir. Bir örnek raylı arabalardır. Tramvaylarda, yayaların çarpması ve aracın altında sürüklenmesini engellemek için alt koruyuculara ihtiyacı vardır. Bu ve diğer düşünceler, uyulması zorunlu dizayn kurallarını ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamanda, arabalar gibi ağır objelerle çarpışma için etkili çarpışma koruması gerekmektedir. Montaj boşluğu sınırlıdır ve alüminyum köpüğün kullanılması kullanışlı olabilir. 3 firmanın birleşmesi (Tramvay üreticisi Siemens, Çarpışma emicinin üreticisi Hübner, ve metal köpük üreticisi Schunk Sintermetalltechnik, Almanya), Resim 4.8’ de gösterilen, tramvay konsepti için çarpışma sistemini geliştirmiştir. Çarpışma emicileri şu anda yüzlerce miktarda üretilmektedir ve diğer tramvay üreticileri ve tramvay kullanıcıları için satılmaktadır [12].



Resim 4.8. Araç sistemleri için tramvay çarpışma enerjisi sönümleyici

LKR(Avusturya) ve Alman araba üreticisi BMW, dolgulu bileşenleri esas alarak beraber motor montaj desteği tasarlamışlardır (Resim 4.9). Bu yapılar yüksek ağırlıkta araba motoruyla yüklenebilir ve mekanik titreşimleri termal enerjiye çevirerek içe doğru dağıtma ile emebilir. Mukavemet artar ve böyle bileşenlerin çatlama dayanımı yüksektir, bu parçalar çarpışma durumlarında güvenliği artırır [13].



Resim 4.9. LKR Ranshofen(Avusturya) tarafından üretilmiş BMW motor montaj desteği. Soldan sağa: boş döküm, köpük çekirdeği ve döküm kovani içeren bütün kompozit, kompozit bölümün kesiti [12]

Günlük yaşamda Alüminyum köpük parçaların fonksiyonel olarak kullanıldığı yerlerden biriside çarpışma esnasında enerji Emilimi amacı ile kullanılan raylı taşıtların ön kısımlarıdır (Resim 4.10).



Resim 4.10. Al köpük ile polimer köpüğün enerji Emilimi için kullanılması [31]

4.2. Yapısal Uygulamalarda ve Uzay Sanayisinde Metalik Köpük

Son zamanlardaki hafif ağırlıktaki malzemeler ile Almanya da bulunan Karmann's firması küçük kamyon üzerine monte edilmiş tamir platformunu tutan kaldıraç inşa etmiştir (Resim 4.11). Dikey aralıkta, 3.5 tona kadar bir aracı tutarken 20 m'den 25 m'ye kadar platformu yükseltebilir. Sonlu eleman hesaplamaları göstermektedir ki, alüminyum bölüm üzerindeki kaynaklı yapı, çelik yapı en az 80 kg' a kadar olmadıkça platformun ağırlığını kaldıramaz. Alüminyum köpük sandviç (AFS) panelleri problemi çözmek için başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Toplam ağırlık kabul edilebilir olan 105 kg'dır. Bileşenler 80000 daire statik ve dairesel testlere tabi tutulmuş ve hasar işareti göstermemiştir. Kaldıraç sistemlerinde üreticiler için küçük ölçekli üretimler mevcuttur. Alüminyum köpük sandviçler (AFS) bu gibi durumlarda başarılıdır çünkü minimum eşik değerler altında ağırlığa sahipken sistemlerin kaldıraçlarını artırmaya imkân tanımaktadır [12].



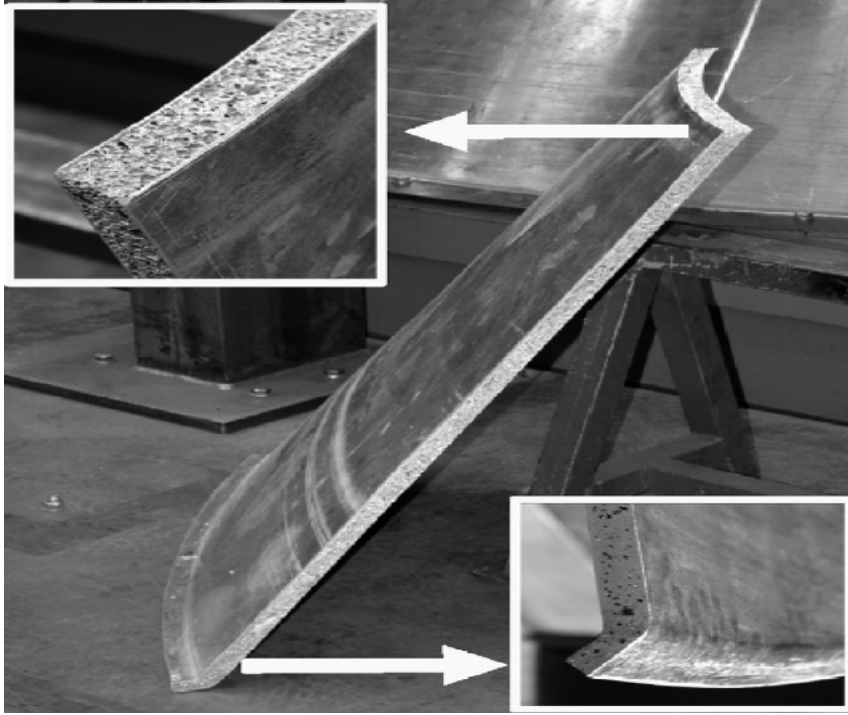
Resim 4.11. AFS sandviç panellerinden yapılmış kaldırma kolu [12]

Başta metalik köpükler olmak üzere hafif metallerin uzay endüstrisinde kullanımları teknolojiye paralel olarak hızla artmaktadır. Uzay ve havacılık endüstrisinde metalik köpük sandviç yapılar yüksek performans sergileyen malzemeler haline gelmişlerdir. Avrupalı “Arine 5” roketinde, raketin taşıma(yük) kapasitesini destekleyen, 2 tane koni biçimli adaptör kullanılmaktadır. Son zamanlarda bu adaptörler alüminyum petek şeklinde sarmal yapılardan yapılmaktadır ve işleme maliyeti çok yüksek olmaktadır. Bu koni biçimli ve pahalı adaptörü daha ucuz ve kolay elde edilen Alüminyum köpük sandviçler ile değiştirmek amaçlanmıştır (Resim 4.12) [37].

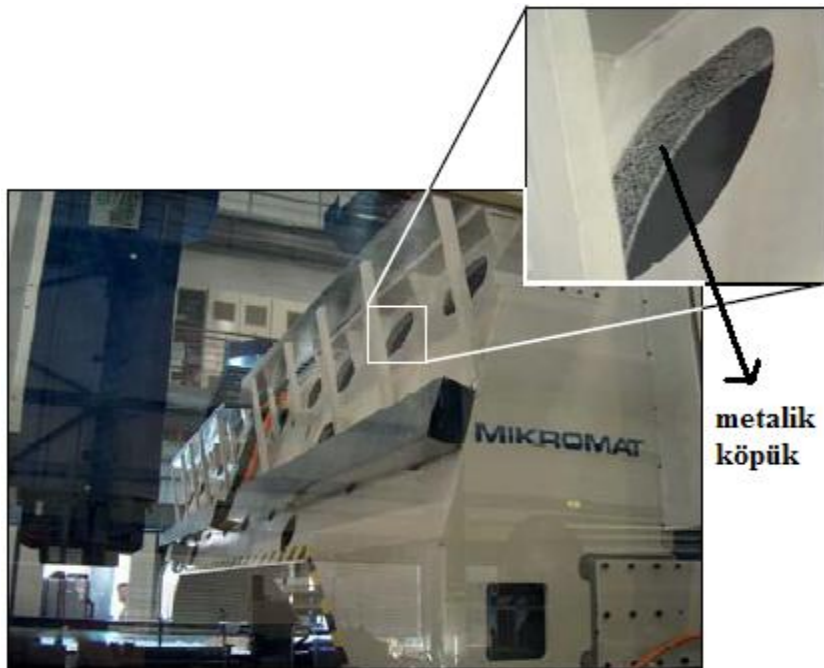


Resim 4.12. Alüminyum köpük sandviç (AFS) ile yapılmış prototip yapı [37]

Uzay sanayinde ve yapısal uygulamalarda kullanılan tipik Alüminyum köpük sandviç (AFS) panel yapıların kesit görüntüsü Resim 4.13 ve Resim 4.14’ de verilmiştir.

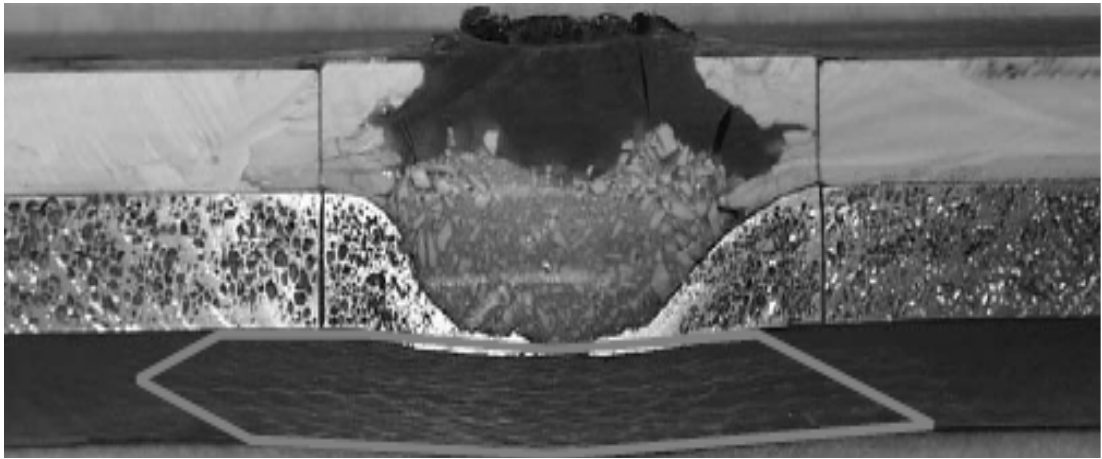


Resim 4.13. Alüminyum köpük sandviç (AFS) [41]



Resim 4.14. Yapısal uygulamalarda alüminyum sandviç köpük kesiti [42]

Son zamanlarda özellikle ABD’ de Al bazlı metalik köpüğün darbe emme özelliği sebebi ile integral zırh malzemesi üretiminde kullanılması konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar iki nokta üzerinde yoğunlaşmaktadır; Al bazlı metalik köpüğün dayanımını artırmak ve integral zırh malzemesinde farklı tasarımlar uygulayarak zırhın performansını artırmak. Alüminyum köpüklerin integral zırh malzemesi olarak kullanımı amacıyla farklı tasarımlar yapılmış ve Al köpük içermeyen integral zırhlarla balistik özellikleri karşılaştırılmıştır (Resim 4.15). Al bazlı metalik köpüklerin dinamik deformasyonu çarpma yüzeyinde başlamış ve yoğunluk tamamlanıncaya kadar kalınlık içerisinde yayılmıştır. Alüminyum köpüğün gözenekli yapısı gerilim dalgalarını dağıtır ve ince dalgalar olarak hareket ettirir. Alüminyum köpük içerisinde gerilim dalgalarının dağılım etkisi sadece yoğunluk tamamlandıktan sonra meydana gelmektedir [43].

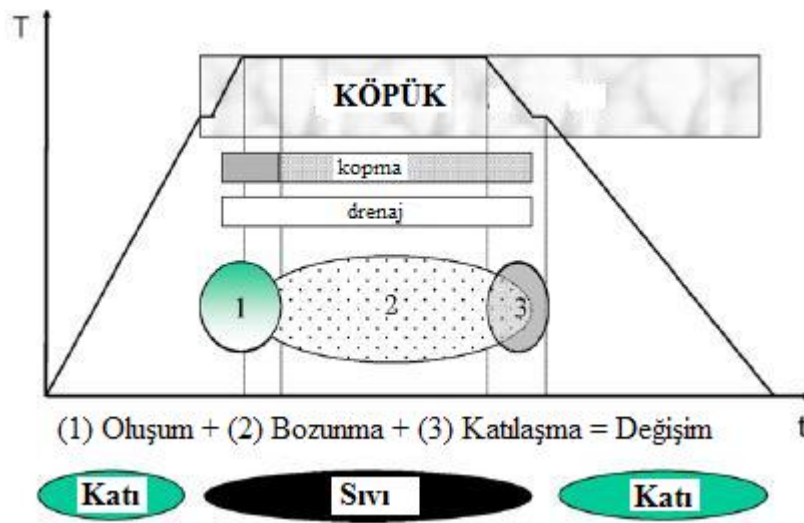


Resim 4.15. Al köpüğün integral zırh malzemesi olarak tasarımı [43]

4.3. Metalik Köpük Alanında Teknolojiye Paralel Olarak Meydana Gelen Gelişmeler

“Köpükleştirilebilirlik” deyimini ne kadar kararlı, ne derece kaliteli ve ne kadar gözenekli köpük üretilabilir demektir. Köpükleştirme teknolojisinin daha ileri gelişimi, köpük kararlılığının daha bilimsel anlayışını gerektirir. Bu terim hücre duvarlarının süzülmesini, çökmenin, bozulmanın ve pıhtılaşmanın önüne geçmektir. Çökme, bozulma ve pıhtılaşma ani olaylardır fakat hücre duvarlarının süzülmesi

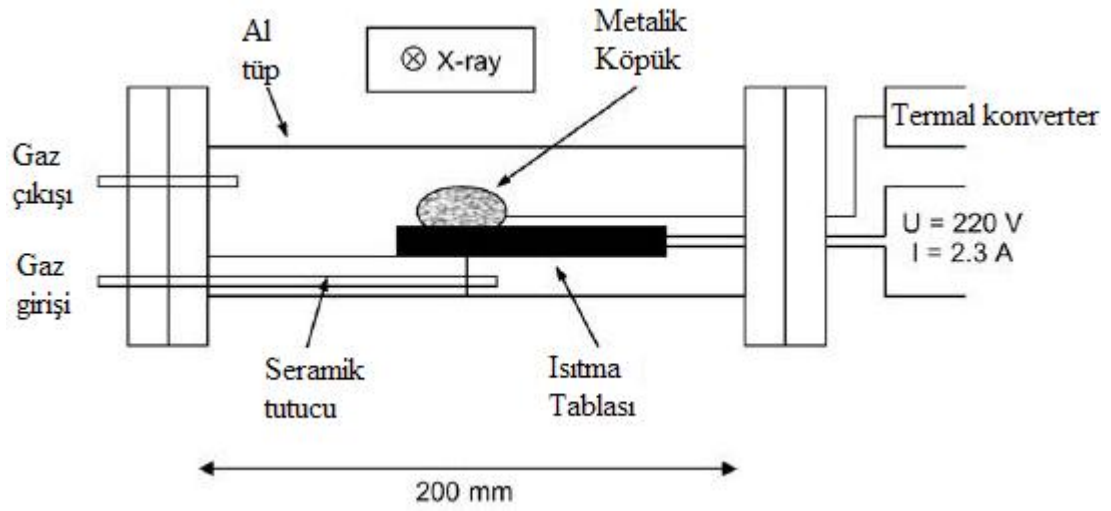
zaman ister. Birkaç faktör köpük kararlılığını etkiler. Bunlar Plateau kenarlarının geometrisi, hücre duvarı kalınlığı, yüzey emilimleri, yüzey hareketliliği, genişleme viskozitesi ve elastikiyettir [44]. Kararlı halde bulunan köpük üretiminin amaçlanması ve gözenek morfolojisinin üretim esnasında kontrolü teknolojinin sağladığı imkânlar dâhilin de araştırmacıları değişik yöntemler kullanmaya ve farklı araştırmalar yapmaya yönlenmişlerdir.



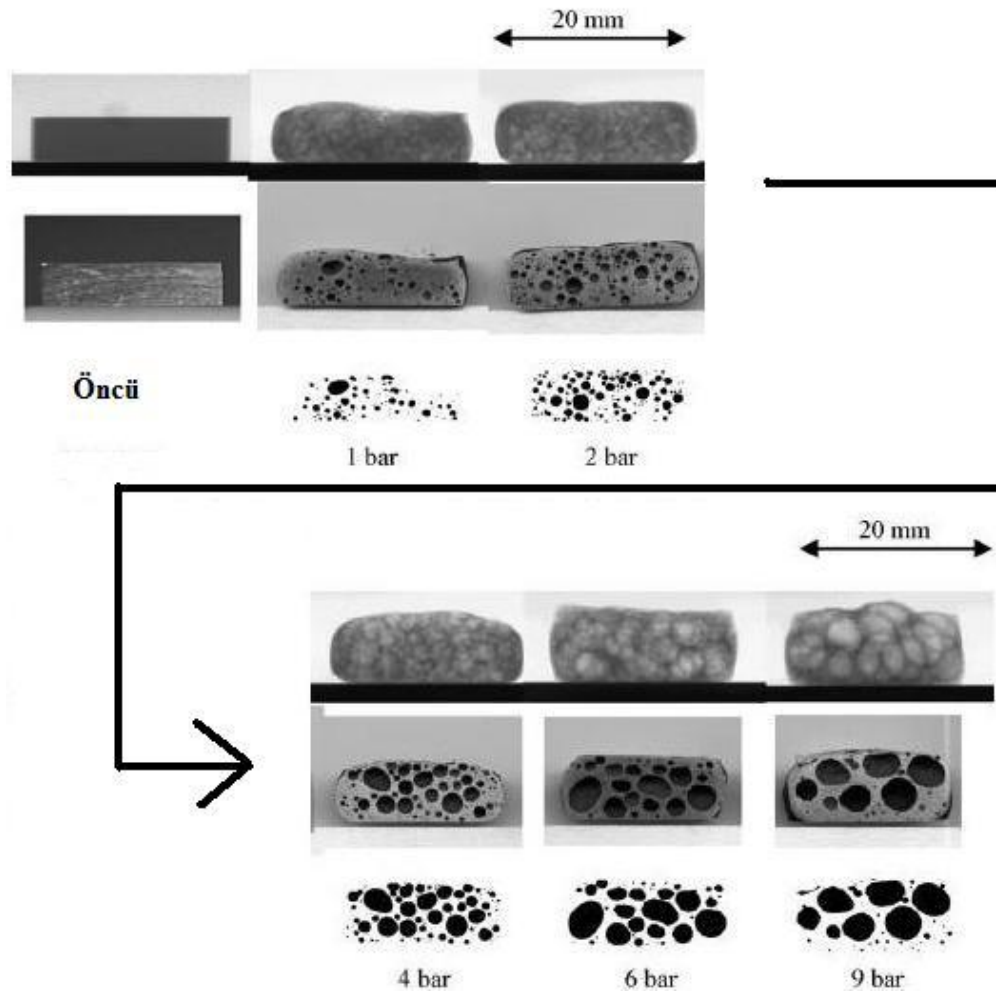
Şekil 4.3. Metalik köpüğün evrim sürecinin şematik gösterimi [35]

Uzayda boşluk içerisinde metalik köpük oluşum sürecinin başlıca basamakları; katılaşma ve bozunma evreleri Şekil 4.3' de şematik olarak gösterilmiştir.

Metalik köpükler için hem bulunduğu yer dışında hem de bulunduğu yerde analizler uygulanabilmektedir. Metalik köpükler için bulunduğu yer dışında yapılan analizler mikro yapıyı ortaya çıkarır bulunduğu yerde yapılan analizler ise bu evrimleşme sürecinde oluşan yapısal değişiklikleri gösterir. Metalik köpükler yapıların bulunduğu yerde yani köpürme esnasında yapılan analizleri sıkıntı vericidir ve bu analizler en iyi şekilde X-Ray ya da nötron ışın demetleri kullanılarak yürütülür [35]. X-Ray yöntemi kullanılarak yapılan analizin şematik gösterimi Şekil 4.4' de verilmiştir. Uzayda köpük gelişim yolları için ayırmalar yapabiliriz. Eğer köpük uzayda 3 doğrultuda bir genişleme gösteriyorsa düzgün tek tip köpükleşmeden; eğer köpük tek doğrultuda bir genişleme gösteriyorsa yönlü – yönelimli köpükleşmeden bahsederiz. Köpük evriminin analiz görüntüsü Resim 4.16' da verilmiştir [45].



Şekil 4.4. X-Ray analiz düzeneğinin şematik gösterimi [45]



Resim 4.16. Köpük evrimi analiz görüntüsü [45]

5. MATERİYAL VE METOT

5.1. Malzeme

Bu çalışmada ECKA firması tarafından üretilen AS 91/S kodlu % 99,9 saflıktaki alüminyum tozları ve Alumix 231 (Al-Cu %2,5-Mg %0,5-Si %14) tozları kullanılmıştır. Köpürtücü madde olarak ise ALDRICH firması tarafından üretilen % 98 saflıktaki TiH_2 tozları kullanılmıştır. Al matrisli parçacık takviyeli kompozit köpük üretimi için ise % 99,5 saflıkta Al_2O_3 tozları kullanılmıştır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Karışım tozlarının fiziksel özellikleri

Malzeme	Fiziksel Özellikler			
	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime sıcaklığı (°C)	Üretim yöntemi	Toz Boyutu (µm)
Alüminyum	2,7	660	Gaz Atomisasyon	<160
Alumix 231	2,67	577	Gaz Atomisasyon	<160
Al_2O_3	3,97	2040	---	<32
TiH_2	3,91	<400	---	<45

5.2. DeneySEL Metot

5.2.1. Tozların karıştırılması

Metal matrisli kompozit köpük üretimine başlamadan önce, Çizelge 5.2' de gösterilen oranlarda Al ve Alumix 231 tozları ile TiH_2 tozları karıştırılmıştır. Bu karışım oranlarında yapılan köpürtme işlemlerinden optimum TiH_2 karışım oranı belirlenmiştir. Optimum köpürmeyi sağlayan TiH_2 karışım oranlarında ise Al ve Alumix 231 tozları yine çizelgede belirtilen oranlarda Al_2O_3 partikülleri ile karıştırılarak kompozit köpük için karışım tozları elde edilmiştir.

Çizelge 5.2. Kullanılan tozların karışım oranları

Matris Malzemesi	TiH₂ (% Ağırlıkça)	Al₂O₃ (% Ağırlıkça)
Al	0,5	-
	1	1
		3
		5
		7
	1,5	-
	2	-
Alumix 231	0,5	-
	1	1
		3
		5
		7
	1,5	-
	2	-

Toz malzemeler 0,1 mg hassasiyetinde terazi ile tartılmıştır. Çizelge 5.2’ de belirtilen karışım oranlarında hazırlanan tozlarda homojen bir karışım oluşturulması için Turbula marka T2 F tipi 3 boyutlu karıştırıcıda plastik kaplar içerisinde bilye kullanılmadan 30 dakika süreyle karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

5.2.2. Karışım tozlarının preslenmesi

Karışım tozlar 150 ton basma kapasitesine sahip hidrolik pres yardımıyla kalıp içerisinde tek yönlü olarak 600 MPa basınçta soğuk preslenerek T/M blok numuneler

haline getirilmiştir. Bu sayede 30 mm eninde, 50 mm boyunda ve 10 mm yüksekliğinde dikdörtgen prizma halinde blok numuneler elde edilmiştir.

5.2.3. Preslenmiş toz metal blok numunelerin sinterlenmesi

Presleme sonrası elde edilen dikdörtgen prizma şeklindeki T/M blok numuneler daha yoğun bir yapı elde etmek için ön sinterlemeye tabi tutulmuştur. Ön sinterleme işlemi 5 °C/dk ısıtma hızına sahip SFL marka Mufle tipi fırın içerisinde koruyucu gaz kullanmadan gerçekleştirilmiştir. Fırın sıcaklığı 550 °C sıcaklığa ulaştıktan sonra numuneler fırın içerisine yerleştirilmiştir. 550 °C sıcaklıkta numuneler 3 saat bekletilmiştir.

5.2.4. Sinterlenmiş numunelerin sıcak deformasyonu

3 saat süre ile ön sinterleme işlemine tabi tutulmuş T/M blok numuneler eksantrik pres kullanılarak yaklaşık 450 °C’ de sıcak dövme yoluyla % 50 oranında tek yönlü deforme edilmiştir.

5.2.5. Köpürtme işlemleri

Yapılan pilot deneylerde uygun köpürtme sıcaklığını belirlemek için, deforme edilen T/M blok numunelerin çevresinde oluşan çatlaklar testere yardımıyla temizlenmiş ve elde edilen dövme T/M parçalar dört farklı sıcaklıkta köpürtme işlemine tabi tutulmuştur (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3. Köpürtme sıcaklıkları

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

Matris malzemelerin kimyasal kompozisyonlarına uygun köpürtme sıcaklıkları belirlenerek 5 °C/dk ısıtma hızına sahip SFL marka Mufle tipi fırın içerisinde koruyucu gaz kullanmadan köpürtme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Köpürtme işlemi serbest halde yapılmıştır. Dövme T/M blok numuneler köpürtme sıcaklığında bekletilen fırın içerisine yerleştirilmiştir. Fırın kapağının açılıp kapanması sonrası meydana gelen sıcaklık farkını minimuma indirmek amacıyla fırın gösterge değerinin ayarlanan köpürtme sıcaklığına ulaşması beklenmiştir. Fırın sıcaklığı köpürtme sıcaklığına ulaştıktan sonra numuneler 10 dakika süreyle köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Köpürtme işlemi sonrası elde edilen ürünler atmosfer ortamında soğumaya bırakılmıştır.

5.3. Üretilen Metalik Köpüklerin Karakterizasyonu

Üretilen metalik köpüklerin fiziksel ve metalografik özelliklerinin karakterizasyonu için aşağıda belirtilen deneyler ve muayeneler yapılmıştır.

5.3.1. Yoğunluk ölçümü

Elde edilen köpüklerin yoğunlukları Archimedes yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Serbest halde köpürtülen numuneler Sartorius marka yoğunluk ölçme cihazı ile numunelerin dış yüzeyleri gözeneklerine suyun giremeyeceği şekilde ince bir katman halinde sürülen yağ ile kapatıldıktan sonra kuru ve suda askıda halde tartılmış ve Archimedes formülü yardımıyla toplam hacim hesaplanmıştır.

Yoğunluk hesabı eşitlik 5.1’de verilen Arşimet prensibi esasına göre yapılmıştır [46].

$$d = \frac{m}{V_y - V_s} \quad (5.1.)$$

Eşitlik 5.1.’e göre;

d: Yoğunluk (g/cm³)

m: Ağırlık (g)

V_y: Yaş ağırlık (g)

V_s: Su içerisindeki ağırlık (g)

5.3.2. Lineer genişleme oranının belirlenmesi

Numunelerin lineer genişleme oranları literatürden [46] yararlanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$\text{Lineer Genişleme Oranı} = \frac{L_s - L_i}{L_i} \quad (5.2.)$$

Eşitlik 5.2' ye göre;

L_i : Köpürtme öncesi numune yüksekliği (mm)

L_s : Köpürtme sonrası numune yüksekliği (mm)

5.3.3. Makro ve metalografik muayene

Serbest halde köpürtme sonucu elde edilen metalik köpükler metalografik incelemeler için ortadan ikiye kesilmiştir. Elde edilen ürünlerin makro seviyede gözenek boyutları ve gözenek duvar kalınlıkları belirlenmiştir. Ortalama gözenek duvar kalınlıklarını ve gözenek boyutlarını belirlemede dijital kumpas kullanılarak gözeneklerin kalınlıkları ve genişlikleri ölçülmüştür. Ölçümler ürünlerin değişik bölgelerinden yapılarak ortalama alınan sonuçlar dikkate alınmıştır. Ortadan ikiye kesilen numuneler daha sonra 240-400-800-1200' lük zımparalarda su altında zımpara yapıldıktan sonra keçelerde 3 μm ' lik elmas pasta kullanılarak parlatma yapılmıştır. Üretilen metalik köpüklerin gözenek duvarlarında dağılmış Al_2O_3 parçacıkların matris malzeme ile ara yüzeyleri JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Bu çalışmada yapılan bütün deneyler ve metalografik incelemeler Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

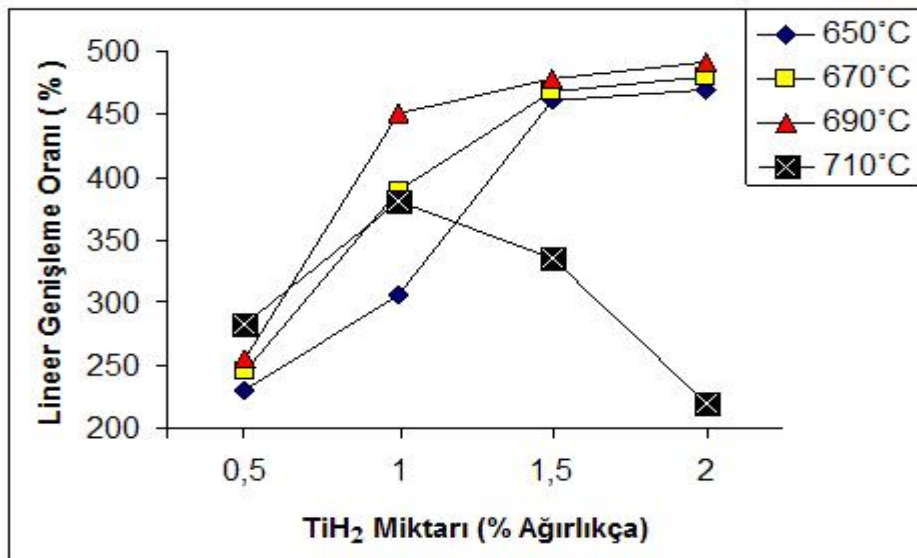
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Toz metalurjisi yöntemi ile saf alüminyum ve ön alaşımlı alümix 231 esaslı metalik köpük üretiminde ön deneyler yapılarak köpürtücü madde miktarı ve köpürtme sıcaklığının makro boyutta gözenek dağılımına, lineer genişleme oranına ve köpük numunelerin yoğunluğuna etkileri incelenmiştir. Ön deney sonuçlarına göre uygun köpürtücü madde miktarı ve köpürtme sıcaklığı seçilerek değişik oranlarda Al_2O_3 takviyeli kompozit metalik köpükler üretilmiştir. Takviye seramik partikül miktarı ve matris malzeme türünün üretilen kompozit metalik köpüklerin makro boyutta gözenek dağılımına, lineer genişleme oranına, köpük yoğunluğuna etkileri incelenmiş ve bu etkiler aşağıda ayrı ayrı başlıklar halinde tartışılmıştır.

6.1. Ön Alaşımlı Alumix 231 Esaslı Metalik Köpük Üretimi

6.1.1. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının lineer genişlemeye etkisi

650, 670, 690 ve 710°C’de köpürtülen numunelerde TiH_2 oranındaki artışa bağlı olarak lineer genişleme oranında meydana gelen değişimler Şekil 6.1’ de gösterilmiştir.



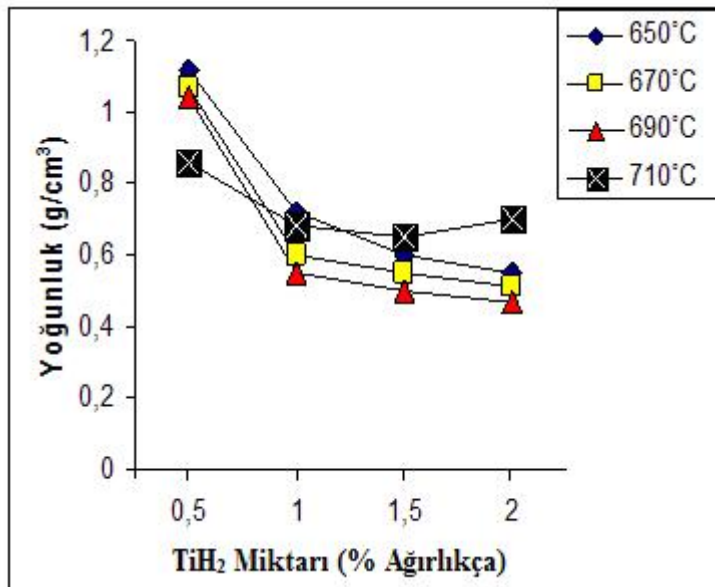
Şekil 6.1. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Alumix köpüğün lineer genişlemesine etkisi

Şekil 6.1' de görüldüğü gibi artan köpürtme sıcaklığına ve köpürtücü madde miktarına bağlı olarak presleme yönündeki lineer genişlemede artış gözlenmiştir. Lineer genişleme oranı sadece eriyik metalin viskozitesine bağlı olmayıp aynı zamanda ayrışan köpürtücü madde miktarına da bağlıdır [28, 32, 47]. Optimum köpürmeyi sağlamak amacı ile yapılan deneylerde uygun köpürtücü madde olarak TiH_2 ' ün belirlendiği görülmüştür. ZrH_2 , HfH_2 gibi diğer köpürtücülerin de metalik köpük üretiminde kullanıldıkları kanıtlanmış ancak TiH_2 'den çok pahalı olduğu ve teknik avantajlarının olmadığı belirtilmiştir. Bu yüzden çalışmamızda optimum köpürmeyi sağlamak amacıyla köpürtücü madde olarak TiH_2 kullanılmıştır. Literatürde TiH_2 tozunun ayrışmasının $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den başlayıp $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar devam ettiği belirtilmiştir ve köpürtücü madde miktarı olarak % 0,5-0,6-1-1,4-1,5-1,6 gibi farklı oranlar kullanılmıştır [28, 32, 47]. Literatürde yaygın olarak %1 oranında TiH_2 tercih edilmiştir. Lineer genişleme oranlarını karşılaştırdığımızda % 0,5 TiH_2 ilavesinde, ayrışan hidrojen gazı miktarı daha az olacağından buna bağlı olarak lineer genişleme oranı daha az olmuştur. $710\text{ }^{\circ}\text{C}$ köpürtülen numunelerde %1 TiH_2 ilavesine kadar lineer genişlemede artış meydana gelmiştir fakat TiH_2 ilavesi arttıkça köpürtme sıcaklığının etkisiyle paralel olarak numunelerin gözenek yapılarında birleşme görülmüştür ve lineer genişlemede azalma olmuştur. % 1,5 köpürtücü madde ilavesinde $650, 670, 690\text{ }^{\circ}\text{C}$ köpürtme sıcaklarında lineer genişleme oranı birbirine yakın olarak tespit edilmiştir. % 2 TiH_2 ilave edildiğinde açığa çıkan hidrojen gazı miktarı daha fazla olacağından lineer genişleme oranı fazla olması beklenirken artan köpürtme sıcaklığına bağlı olarak gözeneklerde bozulma ve çökme olmuştur. Maksimum lineer genişlemeye $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ köpürtme sıcaklığında %2 TiH_2 içeren numunelerde ulaşılmıştır. Diğer köpürtme sıcaklıklarında ($690, 670, 650\text{ }^{\circ}\text{C}$) köpürtücü madde miktarındaki artışa bağlı olarak sabit köpürtme süresinde lineer genişlemede dengeli bir artış meydana gelmiştir. Değişik köpürtme sıcaklıkları, numunelerin ısınma oranlarına farklı şekilde etki ettiğinden köpürtme işlemi de farklı olmaktadır. Numune sıcaklığı matris malzemenin ergime sıcaklığının altında olması durumunda burada genişleme hemen hemen hiç gerçekleşemez. Bunun sebebi, katı durumda Al matris içerisinde atomlar arası çekme kuvvetinin oluşan gaz basıncından daha büyük olmasıdır. Bu durumda, gazın oluşturduğu basınç köpüğün Al matris içerisinde büyümesi için yeterli değildir [1, 28, 46]. Fırın sıcaklığının yetersiz

gelmesi durumunda ayrıışan H_2 gaz basıncı, numunelere etki eden sıcaklık oranı düşük olacağından lineer genişleme oranı da düşük olur dolayısı ile köpürme miktarı düşer. Matris (Alumix 231) malzeme içerisinde var olan % 14 oranındaki Silisyumun ergime sıcaklığını düşürücü yönde etki ettiği ve artan köpürtme sıcaklığına bağlı olarak gözeneklerin daha kısa sürede bozunma eğilimi gösterdiği düşünülmektedir.

6.1.2. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının yoğunluğa etkisi

Şekil 6.2’de numunelerde artan köpürtme sıcaklığına ve köpürtücü madde miktarına bağlı olarak yoğunlukta meydana gelen değişimler gösterilmiştir.



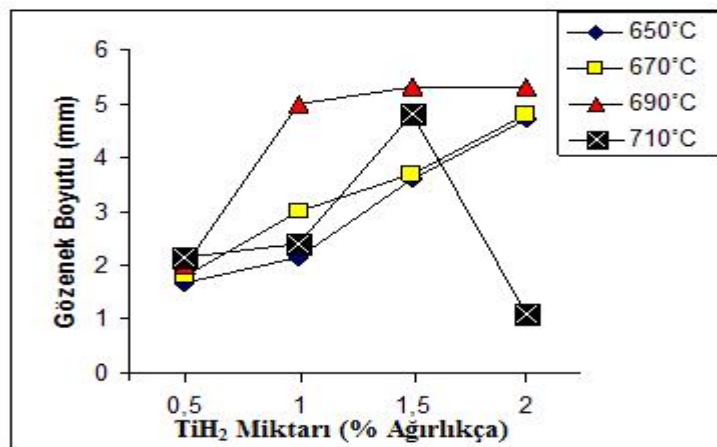
Şekil 6.2. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Alumix köpüğün yoğunluğuna etkisi

Elde edilen deneysel çalışmalar sonucunda, artan köpürtücü madde miktarıyla ve köpürtme sıcaklığı ile yoğunluğun azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, TiH_2 miktarının ve sıcaklığın artmasına bağlı olarak meydana gelen gözenek miktarı ve gözenek hacminde ki artıştan kaynaklanmıştır. Grafiklerde görüldüğü gibi en fazla yoğunluk 650°C köpürtme sıcaklığında ve % 0,5 TiH_2 içeren numunelerde elde edilirken, en düşük yoğunluk değerleri 690°C köpürtme sıcaklığında % 2 TiH_2 içeren numunelerde elde edilmiştir. Dolayısıyla numunelerdeki köpürtme sıcaklığı ve TiH_2 oranı arttıkça yoğunlukta azalma meydana gelmektedir. 650, 670, 690°C köpürtme

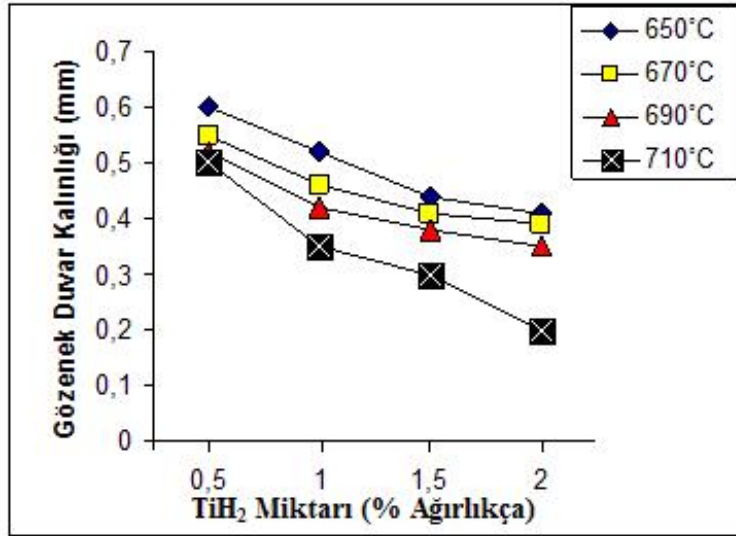
sıcaklıklarında aynı köpürtücü madde miktarlarına rağmen sıcaklık artışına bağlı olarak yoğunlukta bir azalma söz konusudur. Ancak, 710°C köpürtme sıcaklığında ve % 2 TiH₂ içeren numunelerde ayrılan hidrojen miktarının fazla olması ve yüksek sıcaklığın etkisiyle gözeneklerde birleşmeyle gözenek duvarlarında bozulma olmuştur. Bozulma sonrası ise gözeneklerde çökme meydana gelmiştir. Bu durum ise yoğunlukta artışa sebep olmuştur. TiH₂ oranındaki artışa paralel olarak numunelerde daha fazla gaz boşlukları olduğu için yoğunlukta azalmalar gözlenmiştir. Artan köpürtme sıcaklığına ve köpürtücü madde miktarına bağlı olarak numunelerin yoğunluklarında görülen azalmanın sebebi gözenek duvarlarının incelmesi, gözeneklerde birleşmenin olması ve daha büyük gaz boşluklarının oluşmasından kaynaklanmaktadır.

6.1.3. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının gözenek yapısına etkisi

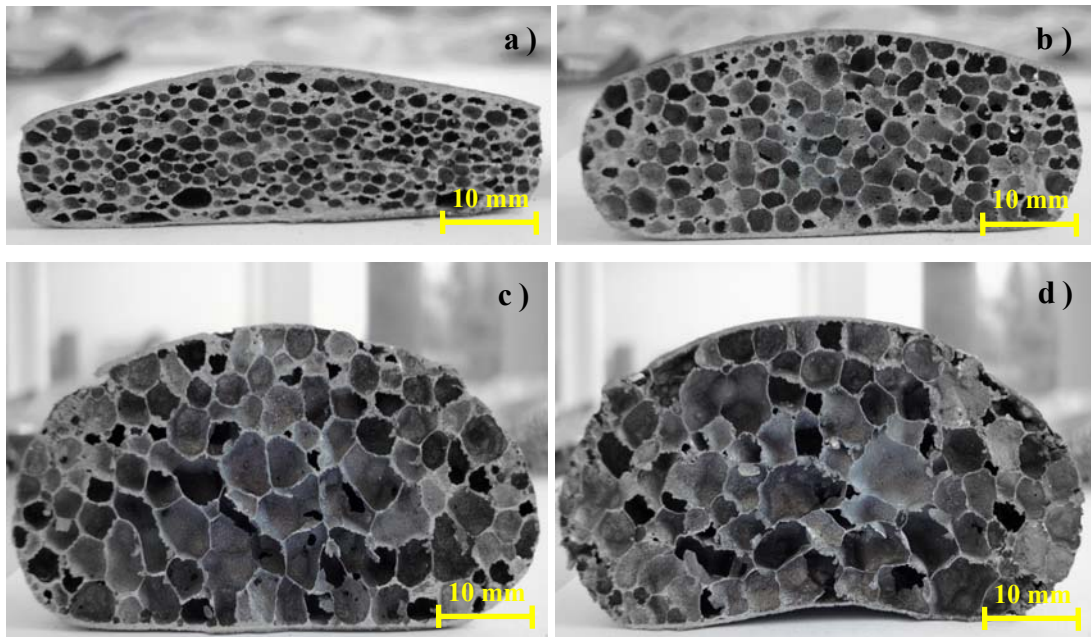
Matris malzemesi Alümix 231 olan, içerisinde farklı oranlarda köpürtücü madde içeren ve değişik köpürtme sıcaklıklarında köpürtülen numunelerin gözenek yapıları makro seviyede incelenmiştir. Artan TiH₂ oranına ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak gözenek boyutunda ve gözenek duvar kalınlıklarında meydana gelen değişimler Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’ de gösterilmiştir. Gözenek boyutu, dağılımı ve gözenek morfolojisi köpürtücü madde miktarına ve köpürtme sıcaklığına göre farklılıklar göstermektedir.



Şekil 6.3. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Alumix köpüğün gözenek boyutuna etkisi



Şekil 6.4. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Alumix köpüğün gözenek duvar kalınlığına etkisi

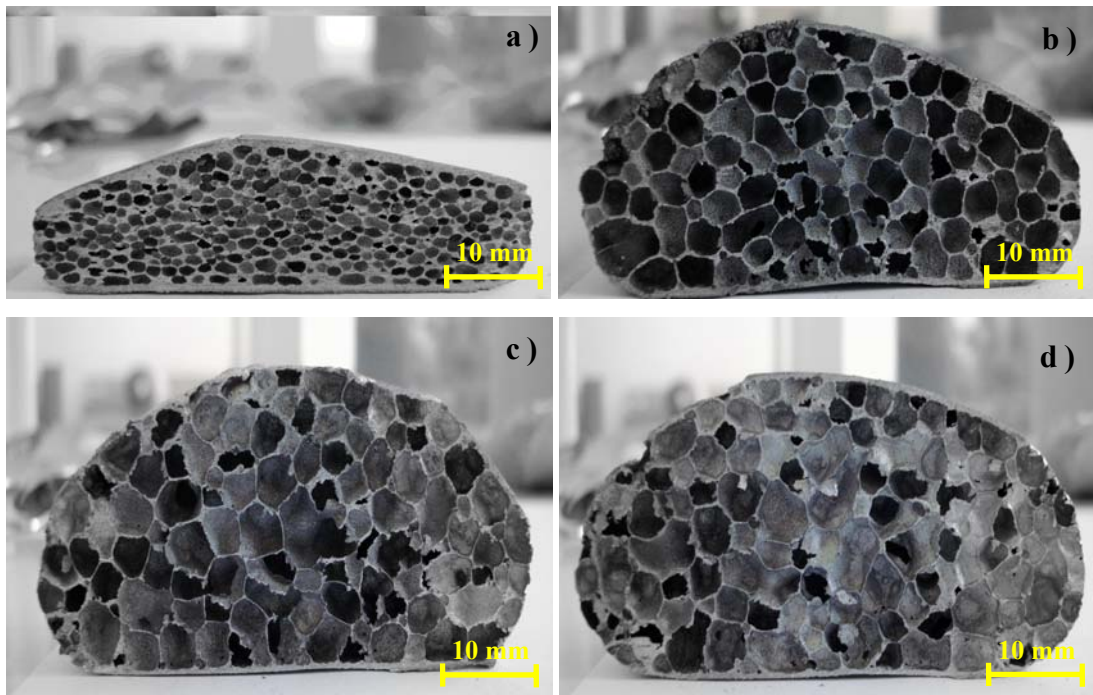


Resim 6.1. 650°C de Köpürtülmüş Alumix numunelerin gözenek yapıları

a) %0,5 TiH₂ b) %1 TiH₂ c) %1,5 TiH₂ d) %2 TiH₂

Resim 6.1' de farklı oranlarda köpürtücü madde içeren 650°C sıcaklıkta köpürtülmüş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler gösterilmiştir. %0,5 TiH₂ içeren numunede gözenek dağılımının homojen olduğu Resim 6.1 a ve Şekil 6.4' deki

grafığe göre ise gözenek duvarlarının %1, 1,5 ve 2 TiH₂ içeren numunelere kıyasla daha kalın olduğu tespit edilmiştir. Yapısında %2 köpürtücü madde bulunan numunelerde %0,5, 1 ve 1,5 köpürtücü madde içeren numunelere göre daha fazla oranda köpürme elde edilmiştir (Resim 6.1 d). Köpürtücü madde miktarının artmasıyla birlikte açığa çıkan H₂ gazı miktarı artacağından %2 köpürtücü madde içeren numunelerin gözenek duvarları %0,5, %1 ve %1,5 köpürtücü madde içeren numunelerin gözenek duvarlarından daha ince olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.4). Resim 6.2’ de 670°C sıcaklıkta ve değışik köpürtücü madde miktarlarında köpürtölmüş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler gösterilmiştir.

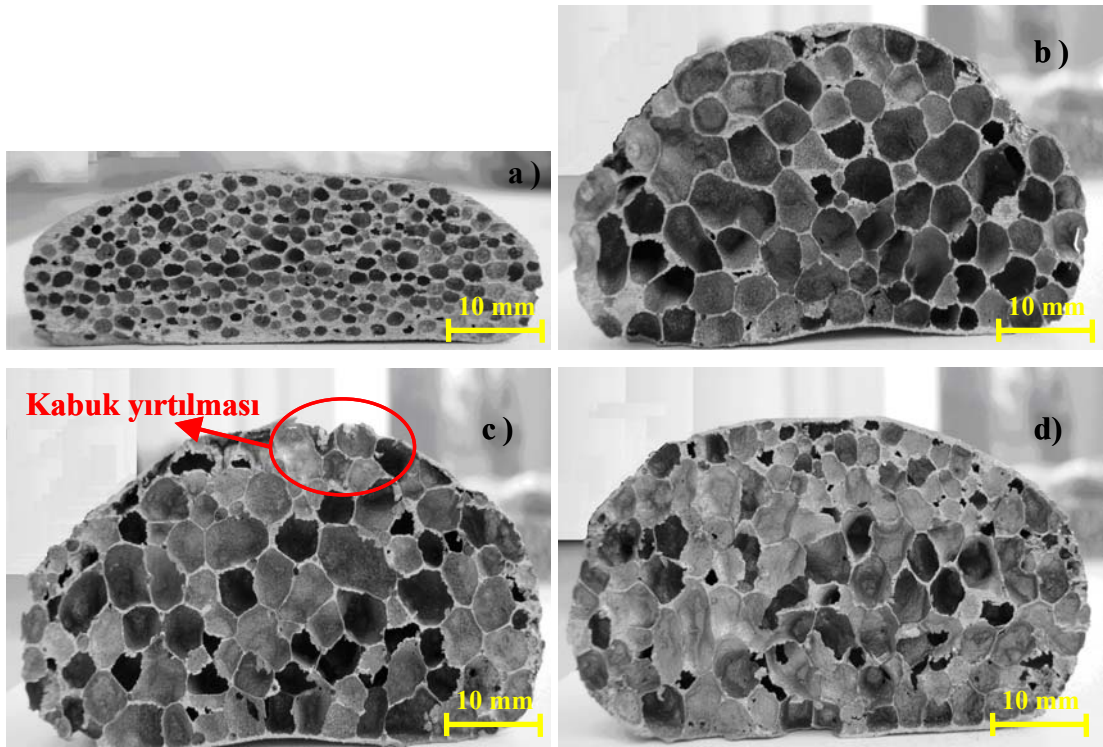


Resim 6.2. 670°C de Köpürtölmüş Aluminex numunelerin gözenek yapıları

a) %0,5 TiH₂ b) %1 TiH₂ c) %1,5 TiH₂ d) %2 TiH₂

Elde edilen alüminyum köpüklerin gözenek ebatlarının ve gözenek dağılımlarının homojen olduğu görölmüştür. Resim 6.2 a’ da göröldüğü gibi içerisinde %0,5 oranında köpürtücü madde bulunan numunelerde gözenek yapıları homojen dağılımlı fakat gözenek duvarlarının diğere numunelere (%1, 1,5 ve 2 TiH₂) göre daha kalın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.4). Sıcaklığa ve köpürtücü maddeden açığa çıkan hidrojen gazının artışına bağılı olarak gözenek duvarlarında incelme ve kısmen

bozulma gözlenmiştir. Resim 6.2 a ve Resim 6.2 d' de bulunan numunelerin gözenek boyutları karşılaştırıldığında, sabit köpürtme sıcaklığında açığa çıkan hidrojen gazındaki artışın gözenek büyümesine etkisi makro boyutta görülmektedir. Şekil 6.3' de verilen grafik değerlerine bakıldığında artan hidrojen gazının gözenek boyutuna etkisi daha net olarak görülebilmektedir. Artan köpürtücü madde miktarı ile bağlantılı olarak gözenek duvarlarına uygulanan baskıda artış olmuş ve duvarların dikkate değer oranda incelendiği Şekil 6.4' de gösterilmiştir. 670°C sıcaklıkta köpürtülen numunelerin gözenek dağılımları ve gözenek duvar kalınlıklarında 650°C sıcaklıkta köpürtülen numunelerin gözenek yapılarına benzer görüntüler elde edilmiştir. Resim 6.3' de 690°C sıcaklıkta köpürtülmüş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler gösterilmiştir.

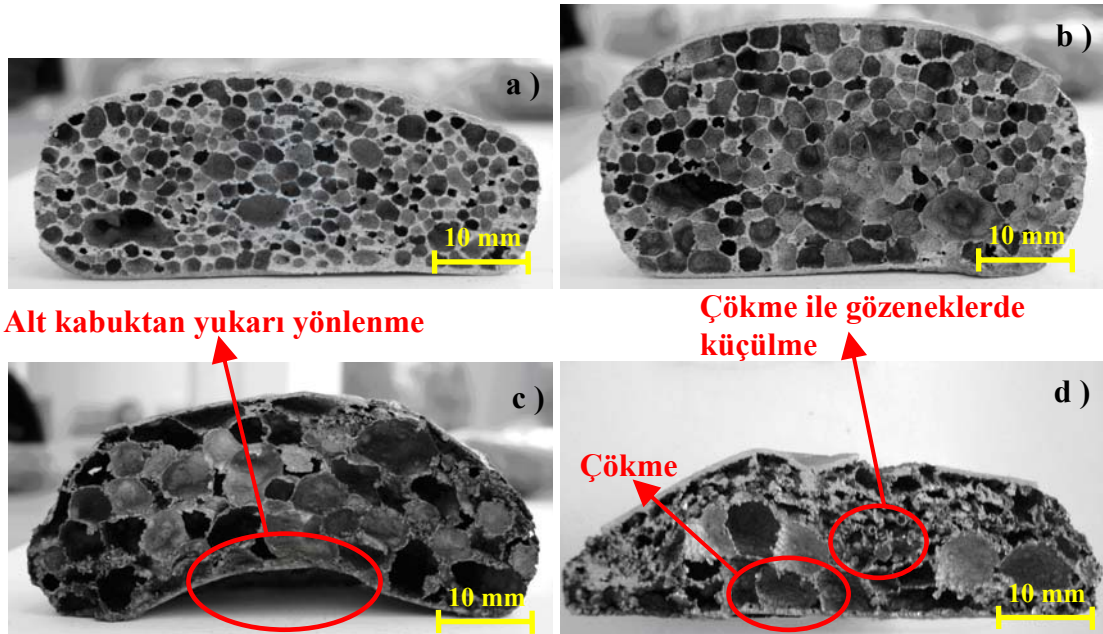


Resim 6.3. 690°C de Köpürtülmüş Alumix numunelerin gözenek yapıları

a) %0,5 TiH₂ b) %1 TiH₂ c) %1,5 TiH₂ d) %2 TiH₂

Resim 6.3' de verilen resimlere bakıldığında gözenekler homojen bir dağılım sergilemiştir. Resim 6.3' de görünen numunelerin her tarafında gözenekler oluşmuş oluşan bu gözeneklerin farklı boyutlarda olduğu Şekil 6.3' de verilen grafik değerlerinde daha net olarak gösterilmiştir. Özellikle numunelerin yüzeyine yakın

bölgelerde geniş bir hatta düzgün yapıya sahip gözenekler elde edilmiştir. Numunelerin merkezlerinde ve alt bölgelerinde iri ve düzenli şekilli gözeneklerin oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’ de verilen grafiklere bakıldığında içerisinde %0,5 TiH₂ bulunan numunelerden elde edilen gözeneklerin daha küçük ve gözenek duvarlarının daha kalın olduğu belirlenmiştir (Resim 6.3 a). %1,5 TiH₂ bulunan 690°C sıcaklıkta köpürtülen numunelerin kabuk kalınlıklarının diğer sıcaklıklarda (650, 670°C) yapılan köpürtme işlemlerine kıyasla daha ince olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin artan sıcaklığın gözenek duvarlarını zayıflatan yönde etki etmesi olarak düşünülmektedir. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’ de gösterilen grafiklere paralel olarak makro boyutta gözenek resimlerine bakıldığında ortalama gözenek dağılımı ve gözenek duvar kalınlığına 690°C köpürtme sıcaklığında ve %1 TiH₂ ilave edilerek elde edilen numunelerde ulaşıldığı söylenebilir (Resim 6.3 b). Şekil 6.4’ de verilen değerlere bakıldığında artan köpürtücü madde miktarına paralel olarak gözenek duvarlarında incelmeye bağlı olarak numunelerin üst kısmında yırtılma gözlenmiştir.

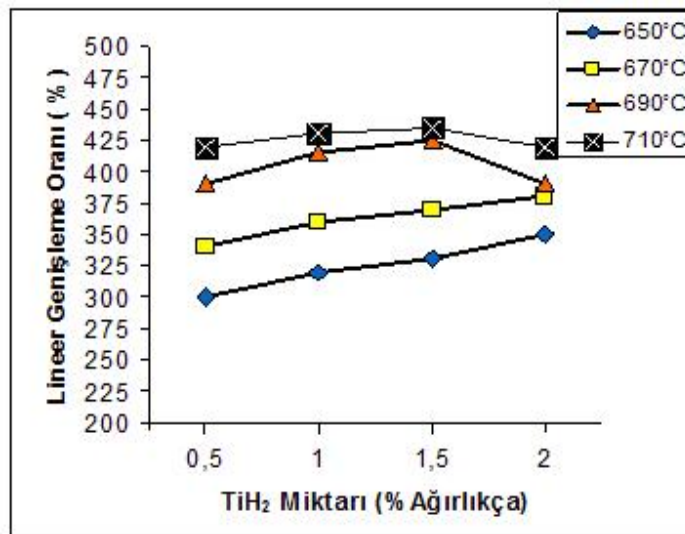


Resim 6.4. 710°C de Köpürtülmüş Aluminex numunelerin gözenek yapıları
a) %0,5 TiH₂ b) %1 TiH₂ c) %1,5 TiH₂ d) %2 TiH₂

710°C’de köpürtme işlemine tabi tutulan numunelere ait resimler Resim 6.4’ de verilmiştir. Yüksek sıcaklık, ergiyik metalin viskozitesini azaltmaktadır [28]. Viskozitenin azalmasıyla gözenek üzerine etki eden drenaj etkisi azalacağından, gözenek içerisindeki hidrojen gazının basıncı, numune direncinden fazla olmakta ve gözenekler daha kolay büyümektedir [1, 47]. Bu nedenle 710 °C sıcaklıkta üretilen alüminyum köpüğün gözenek yapısı artan TiH_2 miktarına paralel olarak daha büyük olmuştur. Resim 6.4 a ve b’ de görüldüğü gibi %0,5 ve %1 TiH_2 içeren numunelerde köpürme gerçekleşmiş ve homojen dağılımlı çok sayıda gözenek oluşmuştur. %1,5 TiH_2 içeren numunede ise açığa çıkan hidrojen gazının ve sıcaklığın etkisiyle gözenek yapılarında birleşme ve numunenin alt kabuğunda yukarı doğru bir yönelme görülmüştür (Resim 6.4 c). Artan TiH_2 miktarına, köpürtme sıcaklığına(710°C) ve numunenin üst kısımlarında meydana gelen gaz kaçaklarının sebep olduğu yüzey çatlaklarına bağlı olarak numune gözeneklerinde birleşme ve gözenek duvarlarında çökme meydana gelmiştir (Resim 6.4 d). Bunun sebebinin gözenek duvarlarına etki eden H_2 gazının ve yüksek sıcaklığın olduğu sonucuna varılabilir.

6.2. Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretimi

6.2.1. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının lineer genişlemeye etkisi

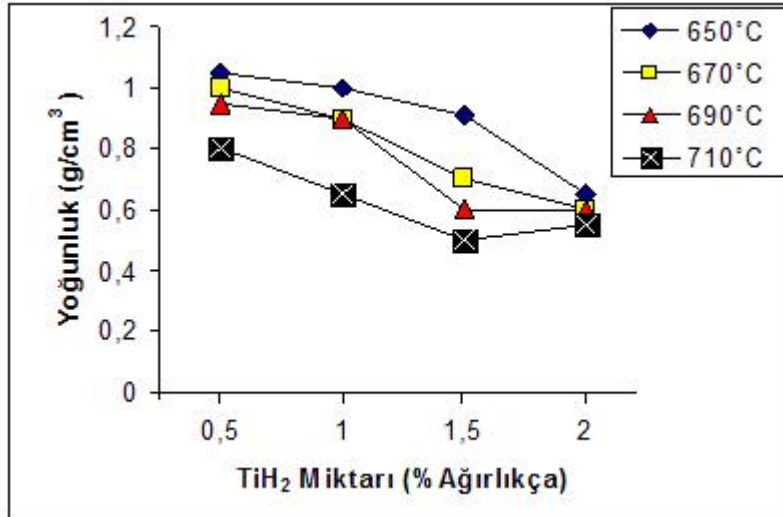


Şekil 6.5. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Al köpüğün lineer genişlemesine etkisi

Şekil 6.5' de 650, 670, 690 ve 710°C'de köpürtülen numunelerde TiH_2 oranındaki artışa bağlı olarak lineer genişleme oranında meydana gelen değişimler gösterilmektedir. Şekil 6.5' de görüldüğü gibi artan köpürtme sıcaklığına ve köpürtücü madde miktarına bağlı olarak lineer genişlemede artış gözlenmiştir. Köpürtme sıcaklığının ve köpürtücü madde miktarının lineer genişlemeye etkisini incelemek amacıyla yapılan deneylerde, 10 dakika sabit köpürtme süresinde, % 0.5, % 1, % 1.5 ve % 2 TiH_2 ilavesinin numunelerin sıkıştırma yönünde yaklaşık % 450 oranında genişlemesine sebep olmuştur. Düşük köpürtme sıcaklıklarında köpürtücü maddenin ayrışmasından dolayı açığa çıkan H_2 gaz basıncı ve numunelerin gözenek duvarlarına etki eden sıcaklık oranları düşük ve buna bağlı olarak malzeme direnci daha fazla olacağından lineer genişleme oranı düşer. Dolayısı ile köpürme miktarı düşer. Sıcaklığın düşük olmasına bağlı olarak köpürme miktarının düşmesinin sebeplerinden biri de, köpürme sırasında köpürtücü maddenin (TiH_2) ayrışma hızının yavaş olması ve bu ayrışma esnasında hidrojen gazı kaybının olmasıdır [28, 47]. Matris malzeme olarak ön alaşımsız alüminyum tozu kullanılarak üretilen metalik köpüklerde maksimum lineer genişlemeye 710°C köpürtme sıcaklığında % 1,5 köpürtücü madde içeren numunelerde ulaşılmıştır. 710°C köpürtme sıcaklığında % 1 köpürtücü madde içeren numunelerde elde edilen lineer genişlemenin % 1,5 köpürtücü madde içeren numunelerde elde edilen lineer genişlemeye yakın ve gözenek duvarlarının daha düzgün olduğu gözlenmiştir. 650 ve 670°C köpürtme sıcaklıklarında elde edilen metalik köpüklerde artan köpürtücü madde miktarına paralel olarak lineer genişlemede düzgün bir artış meydana gelmiştir. En düşük lineer genişleme oranı 650°C köpürtme sıcaklığında % 0,5 köpürtücü madde içeren numunelerde elde edilmiştir. 690 ve 710°C köpürtme sıcaklıklarında % 2 köpürtücü madde miktarında artan sıcaklık ve gaz basıncının etkisiyle sabit köpürtme sıcaklığında gözeneklerin üst kısmında birleşme meydana gelmiştir ve buna bağlı olarak lineer genişlemede düşüş gözlenmiştir. Kullanılan köpürtme sıcaklıklarının hemen hemen hepsinde % 1,5 köpürtücü madde miktarına kadar lineer genişlemede artış meydana gelmiştir. Matris malzeme olarak ön alaşımsız alüminyum tozu kullanılarak üretilen metalik köpüklerde, gözenek yapılarında meydana gelen değişime bakılarak ideal lineer genişlemeye 710°C köpürtme sıcaklığında % 1 TiH_2 içeren numunelerde ulaşılmıştır.

6.2.2. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının yoğunluğa etkisi

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda eşitlik 5.1' e göre yoğunluk hesabında, artan köpürtücü madde miktarıyla ve köpürtme sıcaklığı ile yoğunluğun azaldığı tespit edilmiştir.

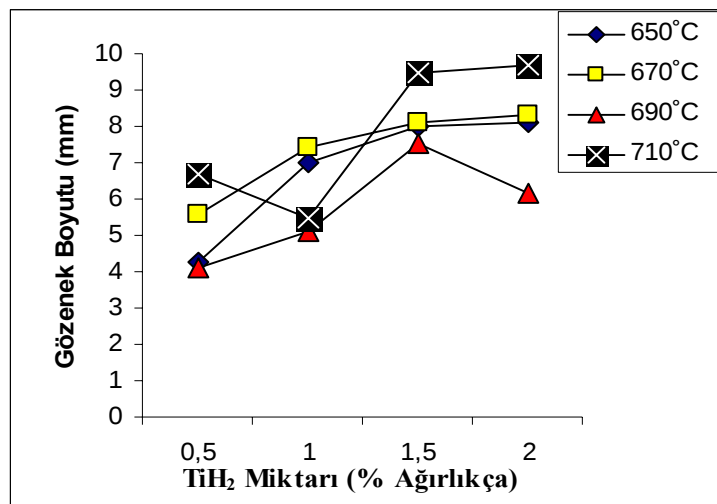


Şekil 6.6. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Al köpüğün yoğunluğuna etkisi

Şekil 6.6'da numunelerde artan köpürtme sıcaklığına ve köpürtücü madde miktarına bağlı olarak yoğunlukta meydana gelen değişimler gösterilmiştir. TiH₂ oranındaki artışa paralel olarak numunelerde daha fazla gaz boşlukları oluştuğu için yoğunlukta azalmalar meydana gelmiştir. Elde edilen grafiği incelediğimizde köpürtücü madde oranı ve köpürtme sıcaklığı arttıkça malzemenin yoğunluğunda önemli oranda düşüş olduğu görülmektedir. Esasen köpürtücü madde miktarının ve sıcaklığın artışı ile çok daha düşük yoğunlukta numune elde etmek mümkündür. Fakat literatüre bakıldığında numuneler de yüzeye yakın yerlerdeki gözeneklerin yüzeyden dışarı çıkmak suretiyle azalmasından dolayı yoğunluk gerçek değerinden daha yüksek çıkmıştır. Şekil 6.6 incelendiğinde en fazla yoğunluk 650°C köpürtme sıcaklığında ve % 0,5 TiH₂ içeren numunelerde elde edilirken, en düşük yoğunluk değerleri 710°C köpürtme sıcaklığında % 2 ve % 1,5 TiH₂ içeren numunelerde elde edilmiştir. Elde edilen alüminyum köpük yapıların gözenek duvarları ve gözenek dağılımları makro boyutta dikkate alındığında en uygun yoğunluk değerine 710°C köpürtme sıcaklığında %1 oranında TiH₂ içeren numunelerde ulaşılmıştır. Genel olarak bütün

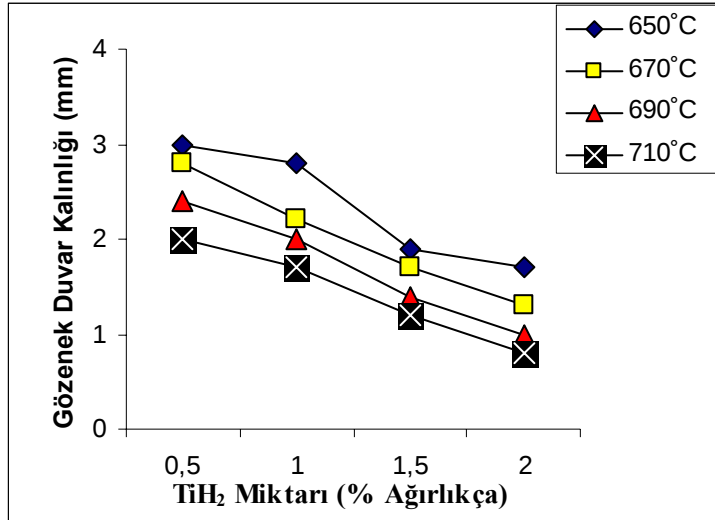
köpürtme sıcaklıklarında köpürtücü madde miktarındaki artışa paralel olarak yoğunlukta düşüş gözlenmiştir. Mevcut gözenek yapıları incelendiğinde artan köpürtme sıcaklığına ve köpürtücü madde miktarına bağlı olarak numunelerin yoğunluklarında görülen azalmanın sebebi gözenek duvarlarının incelmesi, gözeneklerde birleşmenin olması ve daha büyük gaz boşluklarının oluşmasından kaynaklanmaktadır.

6.2.3. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının gözenek yapısına etkisi



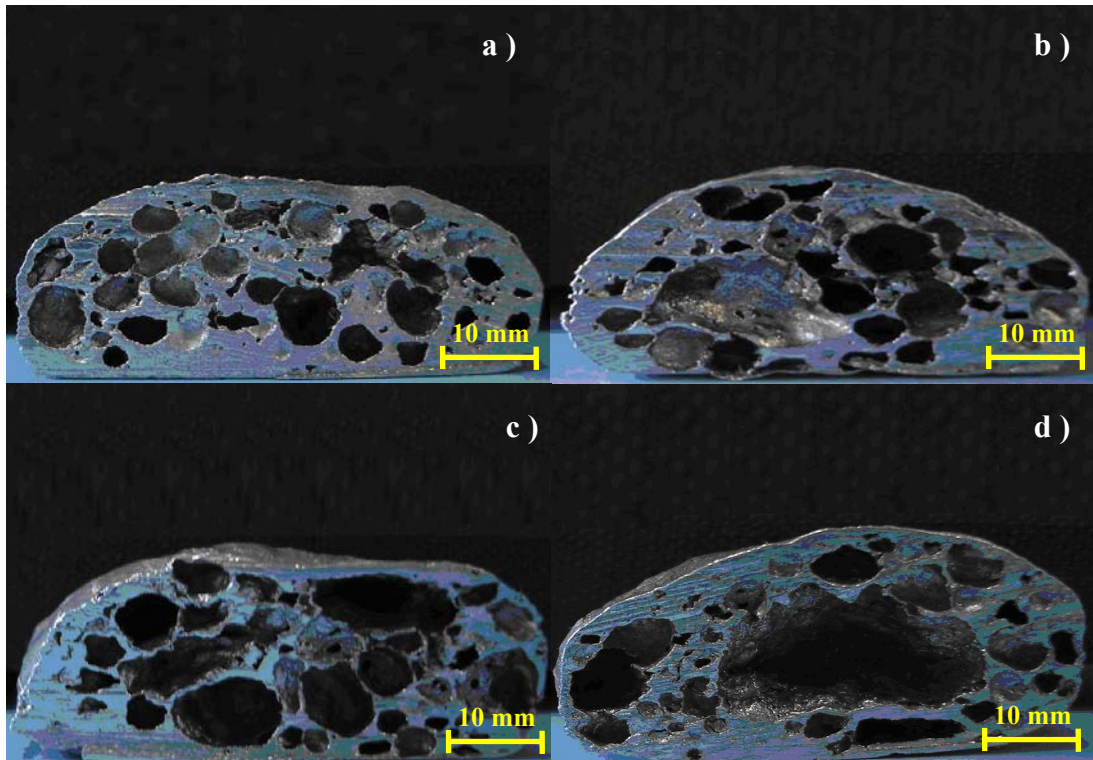
Şekil 6.7. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Al köpüğün gözenek boyutuna etkisi

Al matrisli metalik köpük üretiminde artan TiH₂ oranına ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak gözenek boyutunda ve gözenek duvar kalınlıklarında meydana gelen değişimler Şekil 6.7 ve Şekil 6.8' de gösterilmiştir. Şekil 6.7' de verilen grafiğe bakıldığında en küçük gözenek boyutlarına 690°C köpürtme sıcaklığında % 0,5 TiH₂ içeren numunelerde, en büyük gözenek boyutlarına 710°C köpürtme sıcaklığında % 2 TiH₂ içeren numunelerde ulaşılmıştır. Şekil 6.8' de verilen grafiğe bakıldığında en kalın gözenek duvarına 650°C köpürtme sıcaklığında % 0,5 TiH₂ içeren numunelerde, en ince gözenek duvarına 710°C köpürtme sıcaklığında % 2 TiH₂ içeren numunelerde ulaşılmıştır.



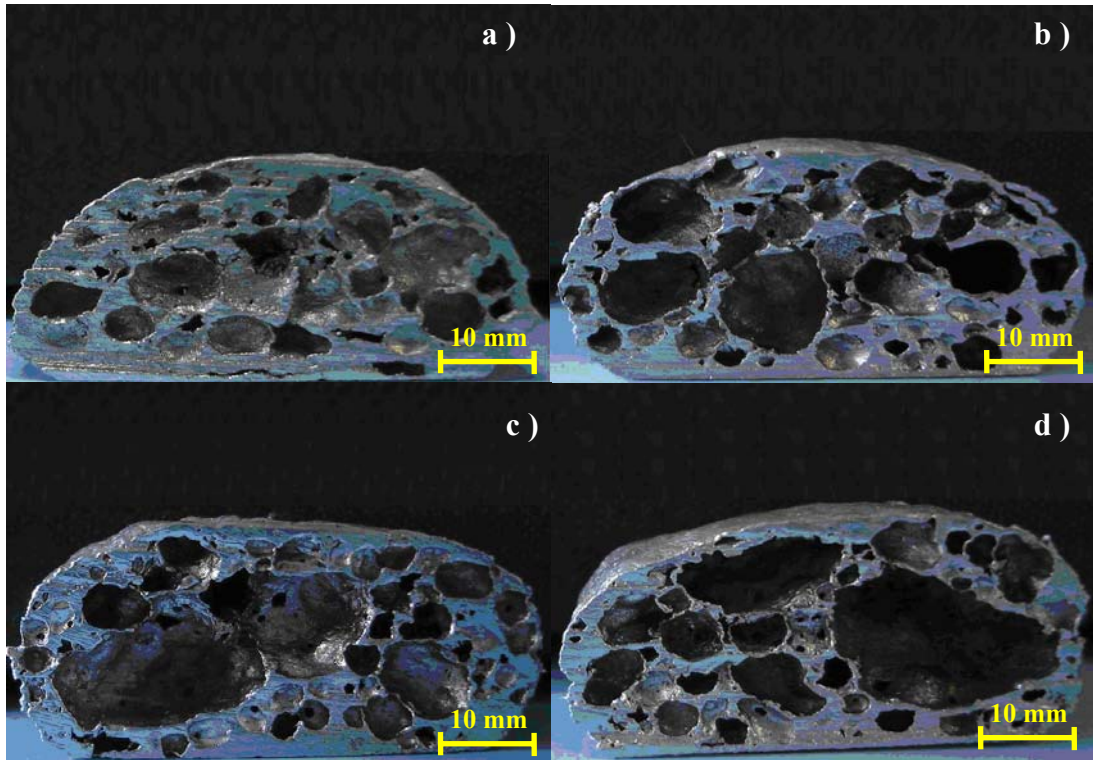
Şekil 6.8 Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının Al köpüğün gözenek duvar kalınlığına etkisi

Resim 6.5’de matris malzemesi saf alüminyum olan farklı oranlarda köpürtücü madde içeren 650°C sıcaklıkta köpürtülmüş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler gösterilmiştir.



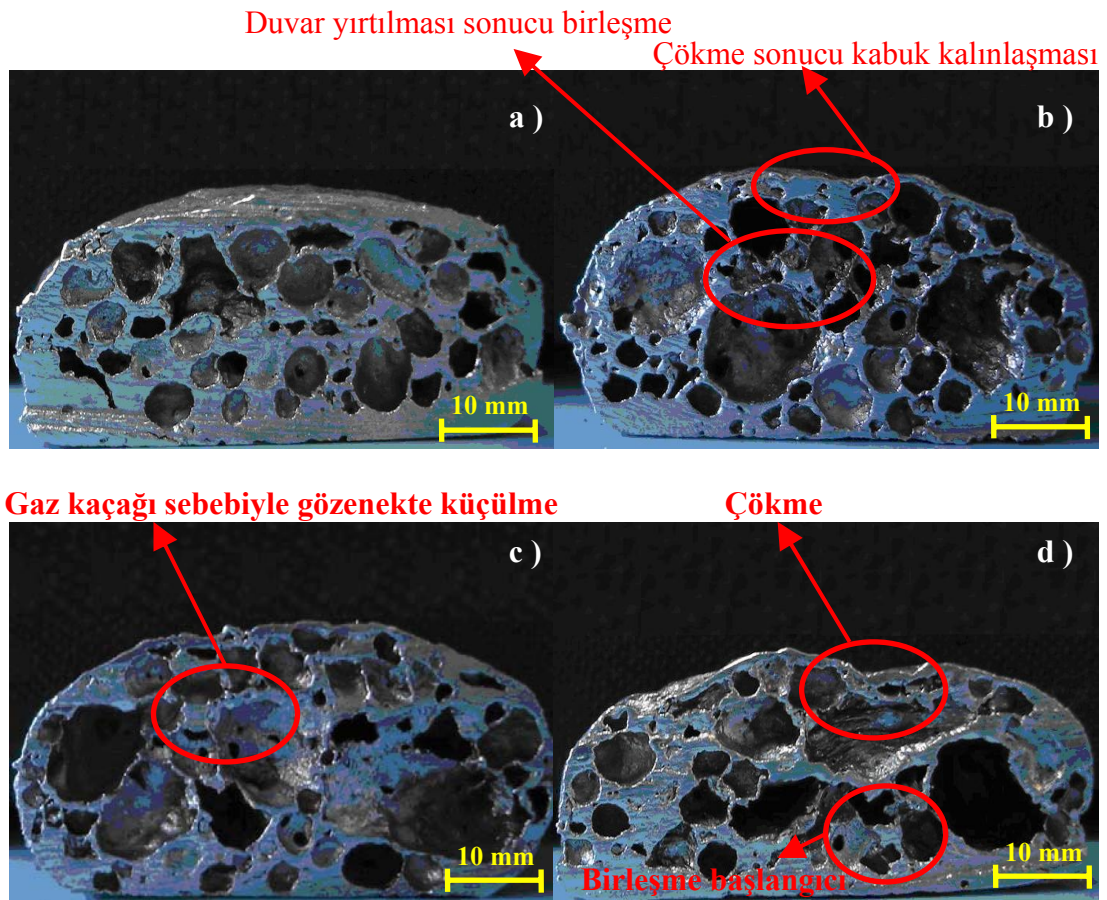
Resim 6.5. 650°C de Köpürtülmüş Al köpük numunelerin gözenek yapıları
a) %0,5 TiH₂ b) %1 TiH₂ c) %1,5 TiH₂ d) %2 TiH₂

Köpürtme sıcaklığı arttıkça matris malzemenin direnci azalmakta ve gözenekler, içerdeki hidrojen basıncının malzeme direncinin üzerine çıkmasıyla büyümektedir. Resim 6.5’ de verilen resimler incelendiğinde, oluşan gözeneklerin homojen denilemeyecek bir dağılım sergilediği görülmüştür. Elde edilen numunelerin makro boyutta resimleri dikkatlice incelendiğinde artan köpürtücü madde miktarıyla birlikte küçük gözeneklerin büyük gözeneklerle birleşme eğilimi gösterdiği dikkat çekmektedir (Resim 6.5 d). Numunenin her tarafında gözenekler oluşmuş ancak oluşan bu gözenekler çok farklı ebatlarda büyümüşlerdir. Şekil 6.8’ de görüldüğü üzere gözenek duvar kalınlıkları TiH_2 artışına paralel olarak azalan bir eğim göstermektedir. Gözenekler genellikle düzensiz şekillerde oluşmuştur. Şekil 6.8’e bakıldığında en kalın gözenek duvarına % 0,5 köpürtücü madde içeren numunelerde ulaşılmıştır (Resim 6.5 a). Bunun sebebinin köpürtücü maddenin ayrışması sonucu açığa çıkan hidrojen gazının gözenek duvarlarına yaptığı baskının yetersiz gelmesi veya bu sıcaklıkta gözenek duvar direncinin yüksek olması düşünülmektedir.



Resim 6.6. 670°C de Köpürtülmüş Al köpük numunelerin gözenek yapıları
a) %0,5 TiH_2 b) %1 TiH_2 c) %1,5 TiH_2 d) %2 TiH_2

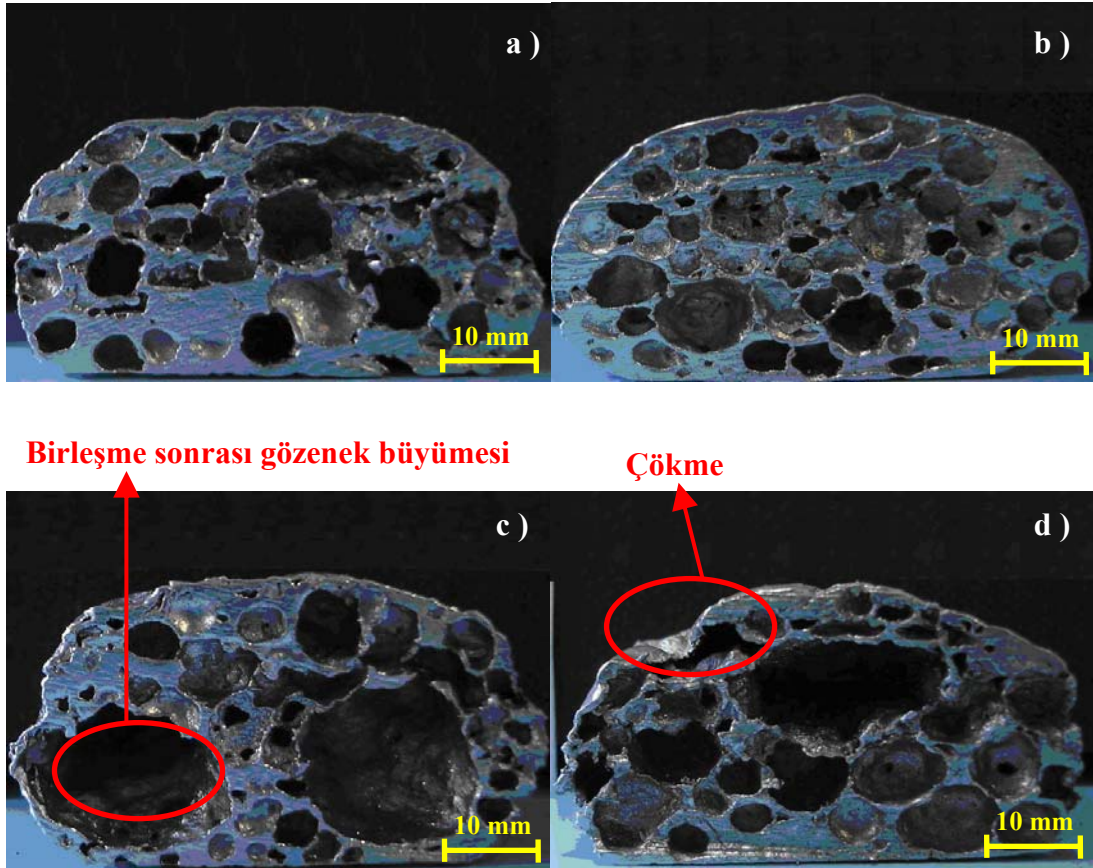
Resim 6.6' da 670°C sıcaklıkta ve değişik oranlarda TiH_2 içeren köpürtülmüş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler gösterilmiştir. Köpürtme sıcaklığına ve köpürtücü maddeden açığa çıkan hidrojen gazının artışına bağlı olarak gözenek duvarlarında incelme ve kısmen bozulma gözlenmiştir. Yapı içerisinde % 0,5 oranında köpürtücü madde bulunan numunelerde gözeneklerin (Resim 6.6 a) homojen dağılımlı olmadığı ve gözenek duvarlarının diğer numunelere (%1, 1,5 ve 2 TiH_2) göre daha kalın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.8). Köpürtücü madde miktarındaki artış ile bağlantılı olarak gözenek duvarlarına uygulanan baskıda artış olduğu ve gözenek duvarlarının gözle görülebilir oranda incelme Şekil 6.8' de görülmektedir. İncelen gözenek duvarları birbirleriyle birleşme eğilimi göstermişlerdir (Resim 6.6 c ve d). Elde edilen metalik köpük yapıların alt kısımlarda daha az sayıda gözenek oluşmuş ve bu gözenek ebatları daha küçüktür.



Resim 6.7. 690°C de Köpürtülmüş Al köpük numunelerin gözenek yapıları
a) %0,5 TiH_2 b) %1 TiH_2 c) %1,5 TiH_2 d) %2 TiH_2

Resim 6.7' de 690°C sıcaklıkta köpürtülmüş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler gösterilmiştir. 690°C sıcaklıkta köpürtülerek elde edilen metalik köpüklerin gözenekleri 650 ve 670°C sıcaklıklarda köpürtülenlerden daha homojen bir dağılım sergilemiştir. Şekil 6.7' ye bakıldığında oluşan gözeneklerin farklı boyutlarda olduğu görülmektedir. Köpürtücü madde oranı % 0,5 olan numunelerin gözenek duvarları diğerlerine göre daha kalın fakat gözenek dağılımları daha homojen olarak tespit edilmiştir (Resim 6.7 a). İçerisinde % 0,5 TiH₂ bulunan numunelerden elde edilen gözeneklerin daha küçük ve gözenek duvarlarının daha kalın olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.7 ve Şekil 6.8). Şekil 6.8' e bakıldığında artan köpürtücü madde miktarına paralel olarak köpürtme sıcaklığındaki artışında etkisiyle gözenek duvarlarında incelmeye tespit edilmiştir (Resim 6.7 c ve d). % 2 oranında köpürtücü madde ihtiva eden metalik köpüklerde TiH₂ ayrışması sonucu açığa çıkan hidrojen gazının fazla olması, sıcaklığın gözenek duvarlarını zayıflatıcı yönde etki etmesi ve bunlara bağlı olarak numunelerin yüzeylerine yakın yerlerde gaz kaçağı olması sebebiyle numunelerin üst kısmında kısmen çökme ve kabuk kalınlaşması gözlenmiştir. Resim 6.8' de 710°C'de köpürtme işlemine tabi tutulan numunelere ait resimler verilmiştir. Numunelerin alt ve üst kısımlarında çok sayıda gözenek oluşmuş ancak oluşan bu gözeneklerin çok farklı boyutlarda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.7). Özellikle numunelerin yüzeyine yakın bölgelerde geniş bir hatta küçük gözeneklerin olduğu gözlenmiştir. Resim 6.8 a' da görüldüğü gibi % 0,5 TiH₂ içeren numunelerde köpürme gerçekleşmiş fakat gözenek duvar kalınlıklarının Şekil 6.8' de verilen grafikte görüldüğü üzere diğerlerine kıyasla daha kalın ve kısmen homojen dağılımlı olduğu tespit edilmiştir. 710°C köpürtme sıcaklığında ve %1 TiH₂ ilave edilerek elde edilen numunelere makro boyutta bakıldığında gözenek dağılımı ve gözenek duvar kalınlığı bakımından diğer ürünlere kıyasla daha düzgün yapıya ulaşıldığı söylenebilir (Resim 6.8 b). Elde edilen köpük yapı içerisinde % 1,5 TiH₂ içeren numunede ise açığa çıkan hidrojen gazının ve sıcaklığın etkisiyle gözenek yapılarında birleşme görülmüştür (Resim 6.8 c). Ayrıca bu numunelerde gözeneklerin yüzeyden dışarı çıkma eğiliminde oldukları tespit edilmiştir. Yapı içerisinde artan TiH₂ miktarı ve köpürtme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak numune gözeneklerinde birleşme ve gözenek duvarlarının üst kısımlarında çökme meydana gelmiştir (Resim 6.8 d). İçerisinde %1,5 ve %2 oranında TiH₂ bulunan köpük

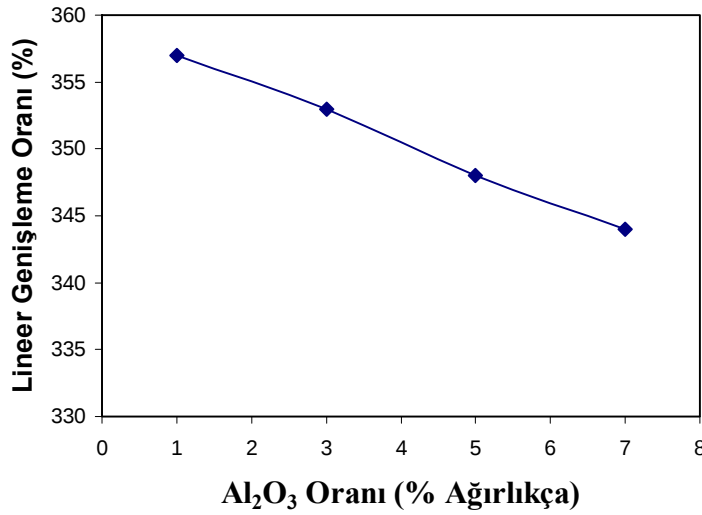
malzemelerin gözeneklerin daha geniş ve gözenek duvarlarının daha ince olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.7 ve Şekil 6.8). Gözenek duvarlarında incelmenin ve gözenek boyutundaki büyümenin sebebinin gözenek duvarlarını zayıflatıcı yönde etki eden yüksek sıcaklığın ve H_2 gaz basıncının olduğu düşünülmektedir.



Resim 6.8. 710°C de Köpürtülmüş Al köpük numunelerin gözenek yapıları
a) %0,5 TiH_2 b) %1 TiH_2 a) %1,5 TiH_2 b) %2 TiH_2

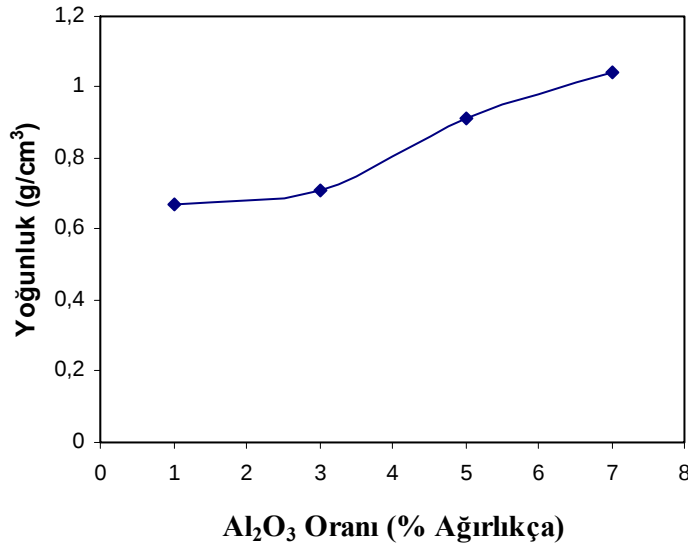
6.3. Alüminyum Matrisli Al_2O_3 Parçacık Takviyeli Kompozit Metalik Köpüğe Takviye Miktarının Etkisi

Saf alüminyum tozu için köpürtücü madde miktarı %1 ve köpürtme sıcaklığı pilot deneylerden 710°C olarak belirlenmiştir. Daha sonra 710°C sıcaklıktaki fırın içerisine yerleştirilen kompozit numuneler 10 dakika köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Köpürtülen numuneler fırın içerisinden alınarak atmosfer ortamında soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 6.9. Al+Al₂O₃ Kompozitinde parçacık oranına bağlı lineer genişleme oranında meydana gelen değişim

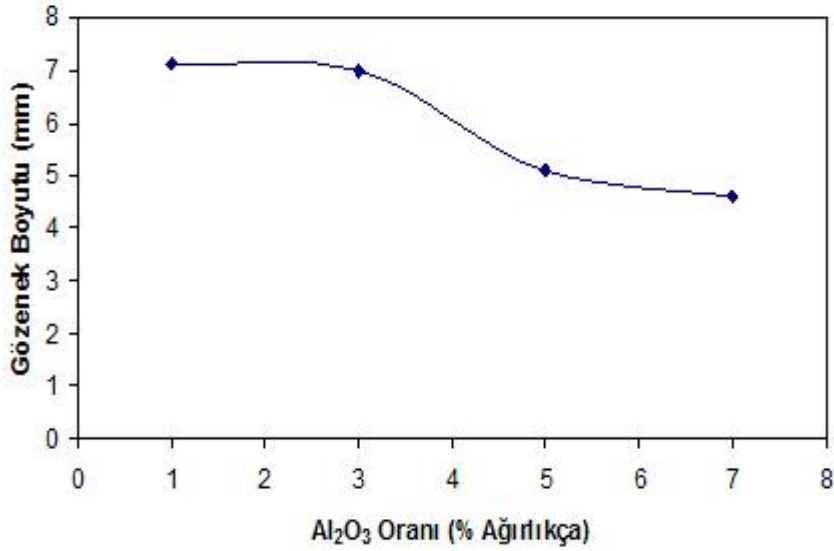
Şekil 6.9’ da alüminyum matristeki Al₂O₃ oranının artmasına bağlı olarak değişen maksimum lineer genişleme oranı görülmektedir. Al₂O₃ oranının artması maksimum lineer genişleme oranının azalmasına neden olmuştur. Maksimum lineer genişlemenin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda Al₂O₃ katkısız üretilen metalik köpüğün maksimum genişleme oranının yüksek olduğu görülmüştür. Asavavisithchai ve Kennedy tarafından yapılan çalışmada benzer sonuçlar görülmektedir [48]. Alüminyum içerisine ilave edilen Al₂O₃ ‘ün maksimum lineer genişleme oranının azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Yapı içerisinde var olan Al₂O₃ parçacıkların gözenek duvarları üzerinde yüzey etken maddesi olarak davrandığı tespit edilmiştir. Al₂O₃ oranındaki artış hücre duvarlarında dayanımı arttırıp hidrojen gazı genleşmesini engellemekte ve köpürme sırasında lineer genişlemeyi azaltmaktadır. Literatürdeki [44,49] benzer sonuçlardan faydalanılarak Al₂O₃ parçacıklarındaki artışın gözenek duvarlarının kalınlığını ve buna bağlı olarak dayanımını arttırdığı ve gözenek duvarlarında bozulmanın geç olduğu söylenebilir. Gözenek duvarlarında meydana gelen dayanım artışına bağlı olarak gözeneklerde birleşme daha az sayıda olmuş ve sabit köpürtme süresinde lineer genişlemede azalma meydana gelmiştir. Gergely, viskozitenin parçacık içeriği ile arttığını ve ergime sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda köpürme esnasında eriyik metalin hareketini yavaşlatacağını belirtmektedir [44].



Şekil 6.10. Al+Al₂O₃ Kompozitinde parçacık miktara bağlı yoğunluk da meydana gelen değişim

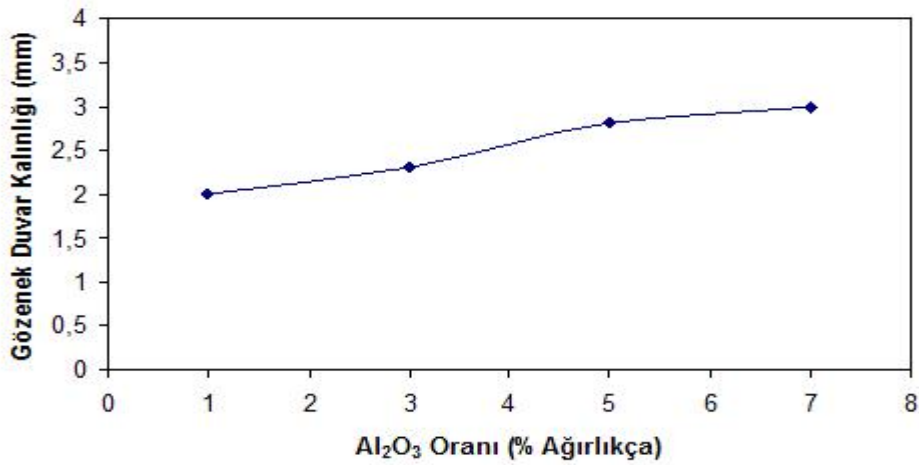
Şekil 6.10' da 710°C köpürtme sıcaklığında yaklaşık 10 dakika köpürtme işlemine tabi tutulmuş numunelerde sabit TiH₂ (% 1) ve Al₂O₃ oranındaki artışa bağlı olarak yoğunlukta meydana gelen değişimler gösterilmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda parçacık takviyesi içermeyen numunelerde yoğunluk değeri daha düşük elde edilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi köpürtücü madde miktarı (% 1 TiH₂) ve köpürtme sıcaklığı (710°C) sabit tutularak yapılan deneylerde takviye elemanındaki artışa paralel olarak en düşük yoğunluk (0.67 g/cm³) değeri %1 Al₂O₃ içeren numunelerde elde edilirken, en yüksek yoğunluk (1,04 g/cm³) değeri %7 Al₂O₃ içeren numunelerde elde edilmiştir. Al₂O₃ oranındaki artış nedeniyle sabit köpürtme sıcaklığında yapıdaki katı faz oranının artması yoğunlukları yükselten diğer bir faktör olarak görülmektedir. Parçacık miktarındaki artış gözenek duvarlarında katı faz oranında artışa sebep olmuştur. Al₂O₃ parçacıkların ergime derecelerinin (2040°C) yüksek olduğu göz önüne alınarak gözenek duvarlarında var olan parçacıkların bozulmadan kaldığı tespit edilmiştir. Gözenek duvarlarında var olan parçacıkların duvar dayanımını artırdığı düşünülmektedir. Gözenek duvar dayanımında meydana gelen artışın gözeneklerin birleşmesini engellediği ve gözenek sayısında azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Gözenek duvar kalınlığındaki

artışa ve gözenek sayısındaki azalmaya paralel olarak yoğunlukta artış tespit edilmiştir.



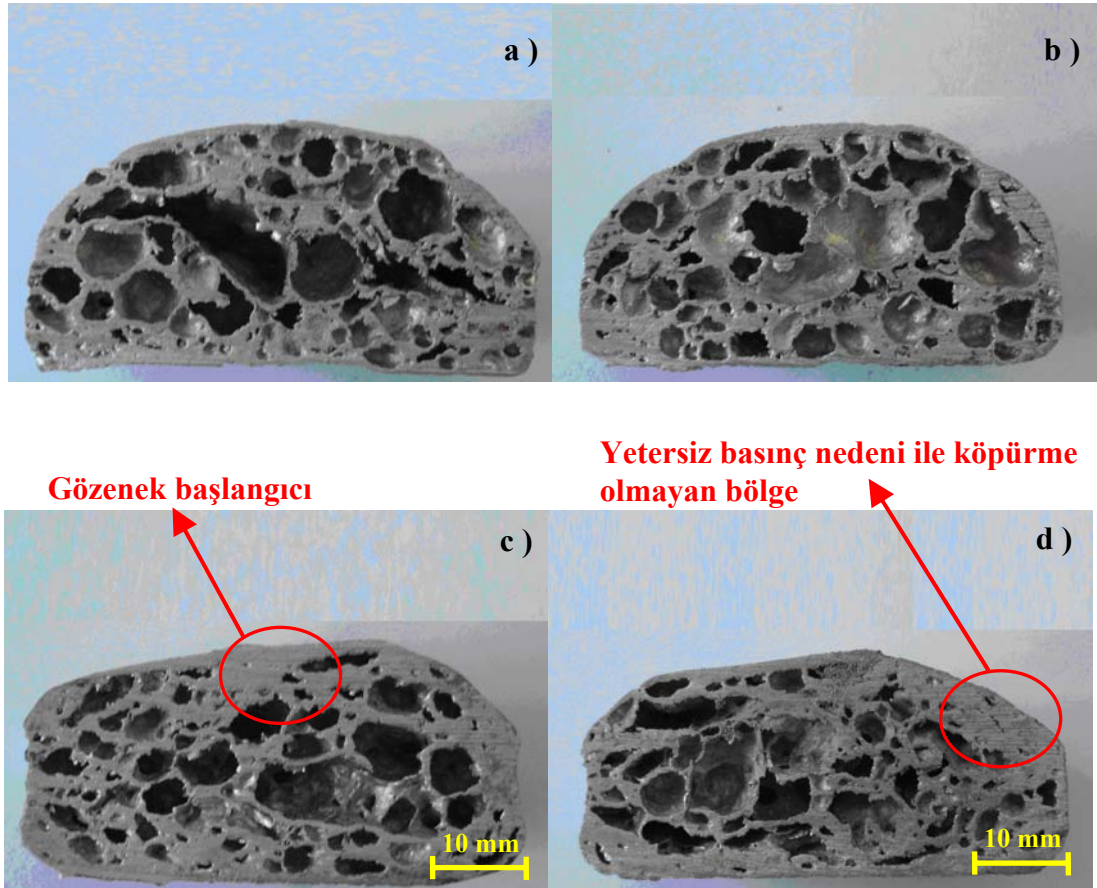
Şekil 6.11. Al+Al₂O₃ Kompozitinde parçacık miktarına bağlı gözenek boyutunda meydana gelen değişim

Gözenek boyutu ve dağılımı içerisindeki takviye elemanın miktarına göre farklılıklar göstermektedir (Şekil 6.11). Parçacıklar kısmen ergiyik metalin viskozitesini artırırken kısmen de metal/gaz ara yüzeyinde yüzey etken maddesi olarak davranarak gözeneklerin ergiyik içerisinde hareket etmesine ve birbirleri ile birleşmelerine engel olur [48]. Şekil 6.11’ deki grafikte görüldüğü gibi artan parçacık miktarına bağlı olarak gözenek boyutunda azalma meydana gelmiştir.



Şekil 6.12. Al+Al₂O₃ Kompozitinde parçacık miktara bağlı gözenek duvar kalınlığında meydana gelen değişim

Şekil 6.12’ de artan parçacık miktarına bağlı olarak gözenek duvar kalınlıklarında meydana gelen değişimler görülmektedir. En kalın gözenek duvarı yapısına %7 Al_2O_3 içeren köpük numunelerde ulaşılmıştır.

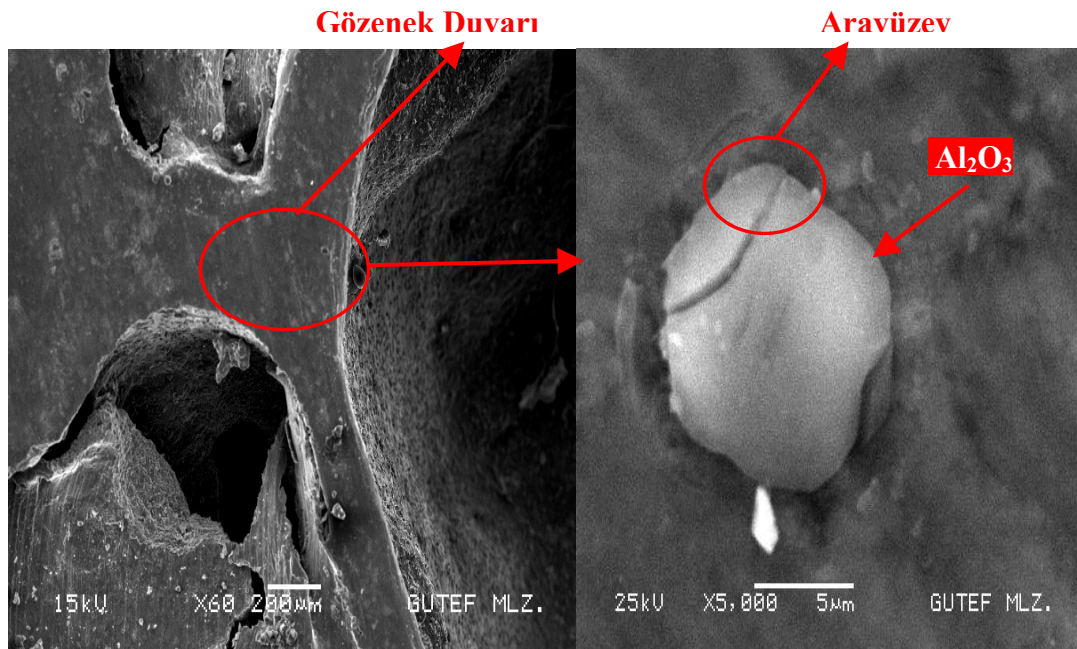


Resim 6.9. Değişik oranlarda Al_2O_3 içeren köpürtülmüş numuneler;
a) %1 Al_2O_3 b) %3 Al_2O_3 c) %5 Al_2O_3 d) %7 Al_2O_3

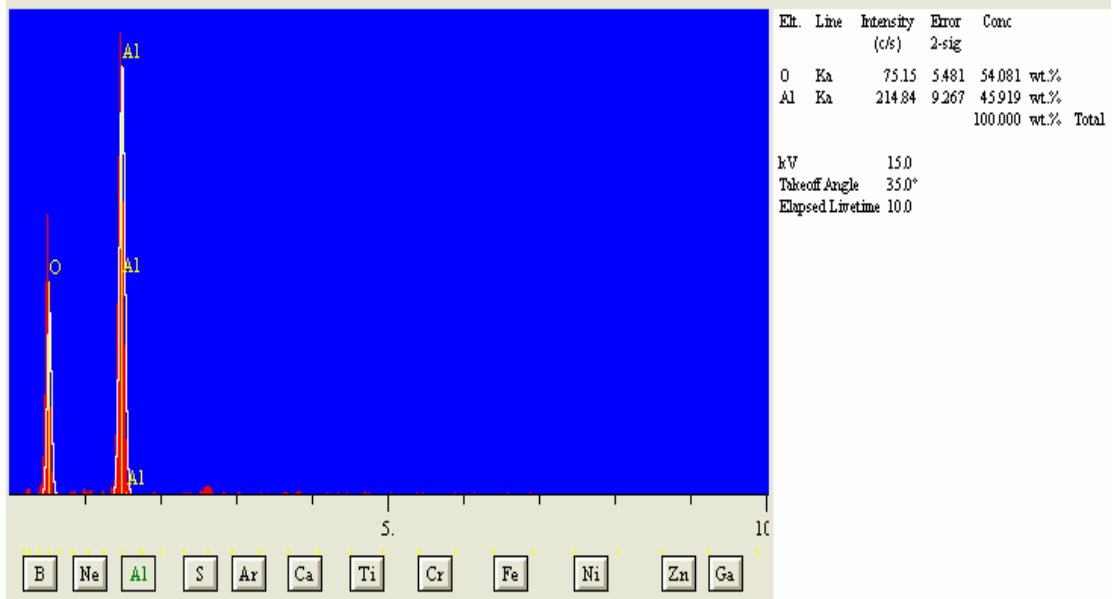
710 °C’ de köpürtme işlemine tabi tutulan numunelere ait resimler Resim 6.9’ da verilmiştir. Resim 6.9 a’ da görüldüğü gibi içerisinde %1 Al_2O_3 ve %1 köpürtücü madde (TiH_2) bulunan numunelerde belirli oranda köpürme elde edilmiştir ve çok sayıda ve değişik boyutlarda (Şekil 6.11) gözenek yapısı elde edilmiştir. %1 Al_2O_3 içeren numunelerde oluşan gözenek duvarının % 3 - %5 ve %7 Al_2O_3 içeren numunelere göre daha ince olduğu gözlenmiştir (Şekil 6.12). %1 ve %3 takviye elemanı içeren Al köpüklerin gözenek duvar kalınlıkları ve gözenek sayılarında kısmen birbirine yakınlık tespit edilmiştir. %5 ve %7 takviye elemanı içeren köpük yapıların gözenek duvar kalınlıklarında yapılan ölçümlerde benzer oranda sonuçlar

elde edilmiştir. En kalın gözenek duvarı yapısına %7 Al_2O_3 içeren köpük numunelerde ulaşılmıştır (Resim 6.9 d). %7 Al_2O_3 içeren numunelerin gözenek boyutları %1 Al_2O_3 içerenlere kıyasla gözle görülebilir ölçüde daha küçüktür (Şekil 6.11). Bunun sebebinin Al_2O_3 ilavesinin gözenek duvarlarında meydana getirdiği dayanım artışı ve bu dayanım artışına paralel oranda köpürme sırasında ayrılan hidrojen gazının genleşmeyi sağlamak üzere gözenek duvarlarında oluşturduğu basıncın düşük olmasının köpürmeyi engellediği düşünülmektedir.

TM yöntemi ile %1 TiH_2 ve değişik oranlarda Al_2O_3 takviye edilerek üretilen Al köpüklerin SEM görüntüleri Resim 6.10’ da verilmiştir. Takviye Al_2O_3 parçacıkları gözenek duvarları içerisinde dağılmış durumdadır. Yapılan incelemelerde matris malzemesi ile parçacık ara yüzeylerinde belirgin mikro boşluk oluşumları gözlenmediğinden matris ile parçacık arasında ıslatma problemi olmadığı kanısına varılmıştır. Artan takviye miktarı Al köpük yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Gözenek duvarında bulunan Al_2O_3 parçacığına ait EDX analiz sonucu Resim 6.11’de gösterilmiştir.



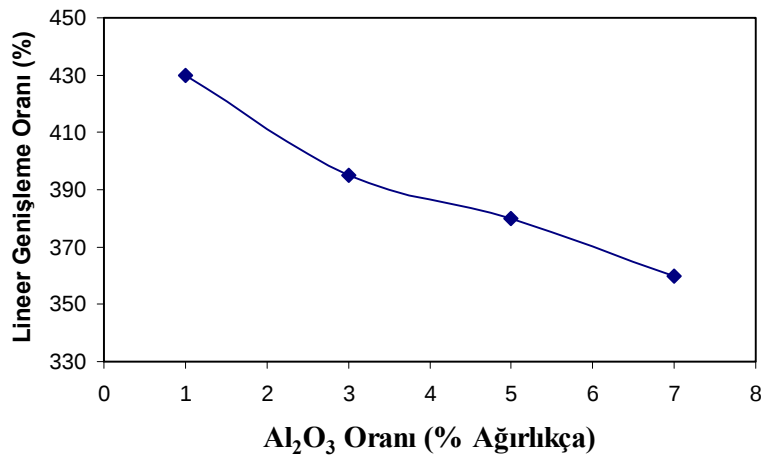
Resim 6.10. Al_2O_3 içeren Al kompozit köpüklerin SEM görüntüleri
a) Gözenek duvarı b) Matris malzeme parçacık ara yüzeyi



Resim 6.11. Al_2O_3 içeren Al kompozit köpüklerin EDX analiz görüntüsü

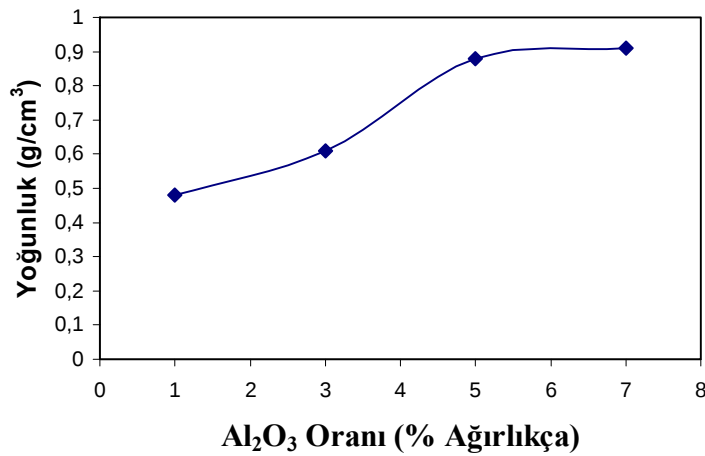
6.4. Alümix 231 Matrisli Al_2O_3 Parçacık Takviyeli Kompozit Metalik Köpüğe Takviye Miktarının Etkisi

Ön alaşımlı alüminyum esaslı alümix 231 tozu için köpürtücü madde miktarı %1 ve köpürtme sıcaklığı pilot deneylerden 690°C olarak belirlenmiştir. Daha sonra 690°C sıcaklıktaki fırın içerisine yerleştirilen kompozit numuneler koruyucu gaz kullanmadan 10 dakika köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Köpürtülen numuneler fırın içerisinden alınarak atmosfer ortamında soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 6.13. Alümix 231+ Al_2O_3 Kompozitinde parçacık oranına bağlı lineer genişleme oranında meydana gelen değişim

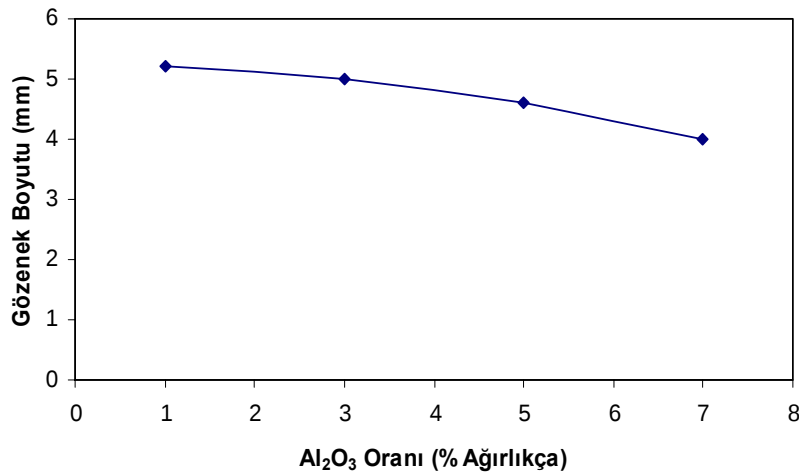
Şekil 6.13’ de ön alaşımlı alüminyum esaslı Alümix 231 tozu içerisindeki Al_2O_3 oranının artmasına bağlı olarak değişen maksimum lineer genişleme oranı görülmektedir. Al_2O_3 oranının artması maksimum lineer genişleme oranının azalmasına neden olmuştur. Üretilen kompozit metalik köpük yapılar da var olan seramik parçacıkların (Al_2O_3) miktarındaki artış hücre duvarlarında dayanımı arttırıp hidrojen gazı genişlemesini engellemekte ve köpürme sırasında lineer genişlemeyi azaltmaktadır. Al_2O_3 parçacıkların artışı gözenek duvarlarında dayanımı artırmıştır ve gözenek duvarlarında bozulma geç olmuştur. Literatüre bakıldığında yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar görülmektedir [44]. Yapılan çalışmalarda takviye elemanı ile ara yüzey arasında yeterli ıslatmayı sağlamak için ön alaşımlı değişik kompozisyona sahip tozlar kullanıldığı görülmektedir [48]. Ön alaşımlı Alümix 231 (Al-Cu %2,5-Mg %0,5-Si %14) tozu ile üretilen metalik köpüklerin gözenek duvarlarında meydana gelen dayanım artışına bağlı olarak gözeneklerde birleşme daha az sayıda olmuş ve sabit köpürtme süresinde lineer genişlemede azalma meydana gelmiştir.



Şekil 6.14. Alümix 231+ Al_2O_3 Kompozitinde parçacık oranına bağlı yoğunluk da meydana gelen değişim

Ön alaşımlı Alümix 231 tozu kullanılarak sabit TiH_2 (% 1) ve Al_2O_3 oranındaki artışa bağlı olarak elde edilen köpük yapıların yoğunluğunda meydana gelen değişimler Şekil 6.14’ de gösterilmektedir. Şekil 6.14’ de görüldüğü gibi sabit köpürtme sıcaklığında ve sabit köpürtücü madde miktarında yapılan deneylerde üretilen metalik köpüklerde seramik parçacık oranındaki artışa bağlı olarak yoğunluk

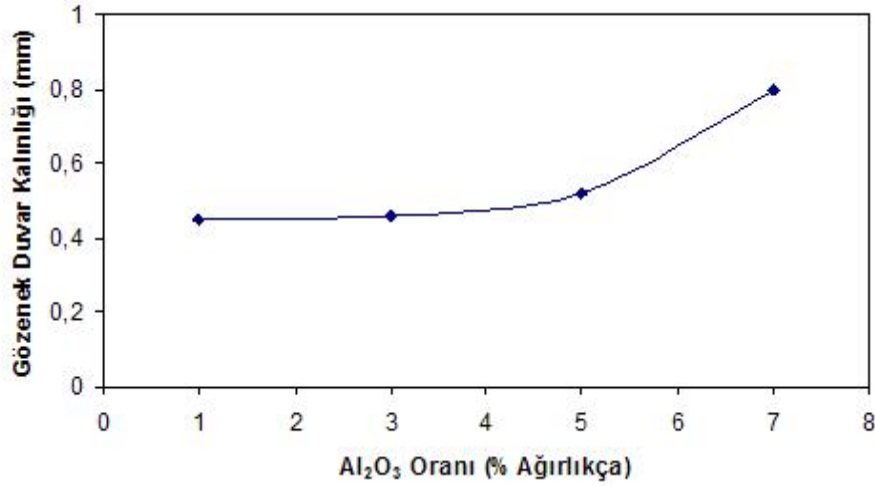
değerlerinde artış gözlenmiştir. En düşük yoğunluk ($0,48 \text{ g/cm}^3$) değeri %1 Al_2O_3 içeren numunelerde elde edilirken, en yüksek yoğunluk ($0,91 \text{ g/cm}^3$) değeri %7 Al_2O_3 içeren numunelerde elde edilmiştir. Ulaşılan yoğunluk değerlerine bakıldığında en düşük yoğunluk değeri ile en yüksek yoğunluk değeri arasında ($0,48\text{--}0,91 \text{ g/cm}^3$) çok fazla fark olmadığı her iki değerinde 1 g/cm^3 ' ün altında olduğu tespit edilmiştir. Al_2O_3 oranındaki artış hücre duvarlarında hidrojen gazı genişlemesini engellemekte ve köpürme sırasında gözenek birleşmesini geciktirmektedir. Gözenek duvarlarında meydana gelen dayanım artışına bağlı olarak gözeneklerde birleşme ve gözenek büyümesi daha az sayıda olmuş buna paralel olarak sabit köpürtme süresinde yoğunlukta artış meydana gelmiştir. Seramik parçacıkların miktarındaki artış gözenek duvarlarında katı faz oranında artışa sebep olmuştur. Kullanılan takviye elemanı miktarındaki artış nedeniyle sabit köpürtme sıcaklığında yapıdaki katı faz oranının artması yoğunlukları yükselten diğer bir faktör olarak belirtilmektedir.



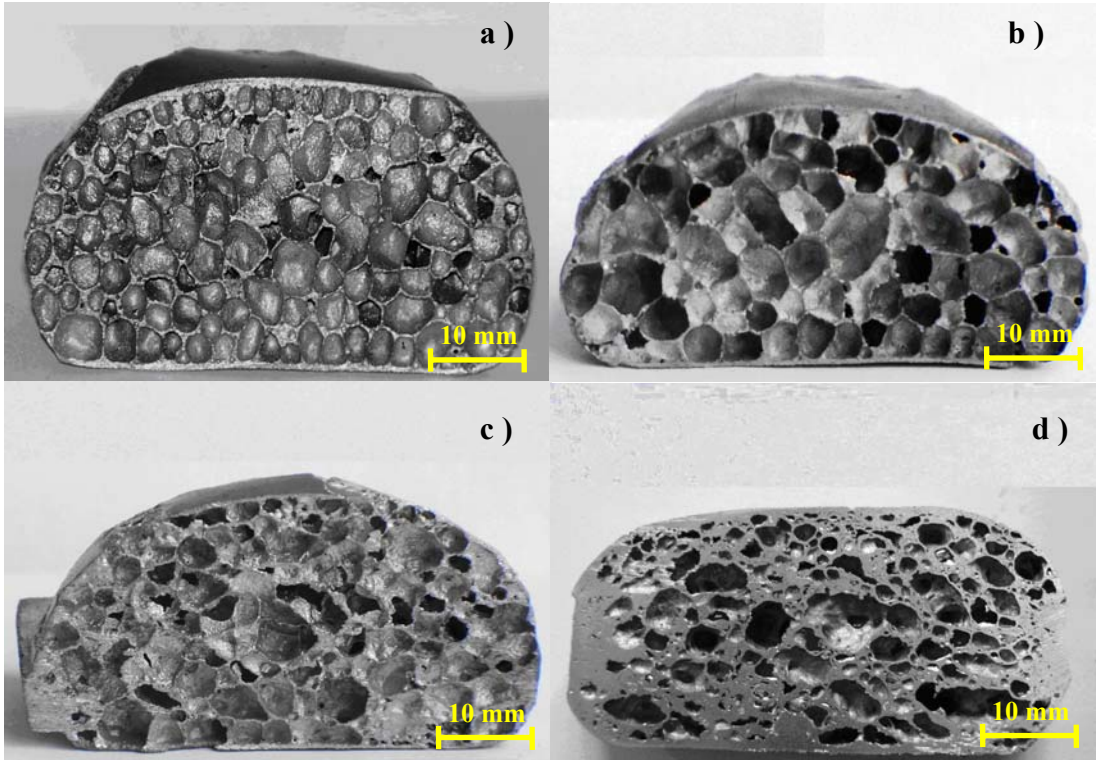
Şekil 6.15. Alümix 231+ Al_2O_3 Kompozitinde parçacık oranına bağlı gözenek boyutun da meydana gelen değişim

Şekil 6.15 ve Şekil 6.16' da Alümix 231 + Al_2O_3 kompozitinde takviye oranının artmasına bağlı olarak değişen gözenek boyutu ve gözenek duvar kalınlıkları görülmektedir. Grafiklerde de görüldüğü gibi Alümix 231 + Al_2O_3 kompozitinde artan parçacık oranına paralel olarak gözenek boyutunda düşüş, gözenek duvar kalınlığında yükselme tespit edilmiştir (Şekil 6.15 ve Şekil 6.16). Sabit köpürtücü

madde miktarına ve köpürtme sıcaklığına göre elde edilen köpük yapıların gözenek boyutu ve dağılımında farklılıklar genellikle meydana gelmiştir. Alümix 231 tozu ile üretilen bütün metalik köpüklerde homojen gözenek dağılımına ulaşılmıştır.



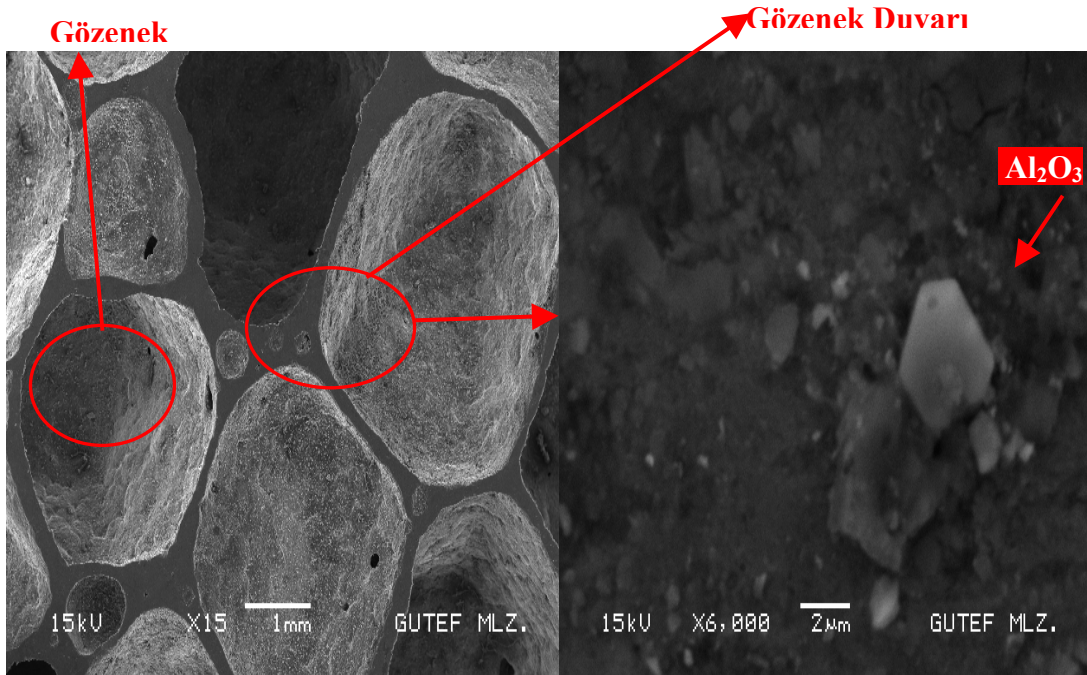
Şekil 6.16. Alümix 231+Al₂O₃ Kompozitinde parçacık miktarına bağlı gözenek duvar kalınlığının da meydana gelen değişim



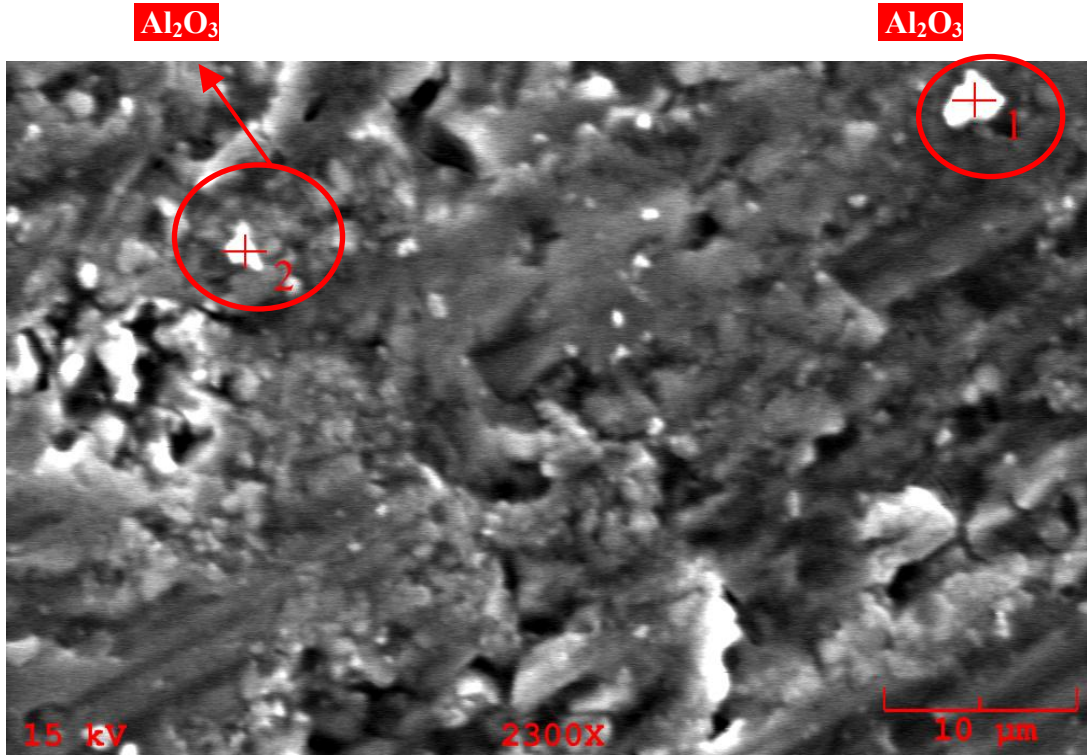
Resim 6.12. Değişik oranlarda Al₂O₃ içeren numuneler;

a) %1 Al₂O₃ b) %3 Al₂O₃ c) %5 Al₂O₃ d) %7 Al₂O₃

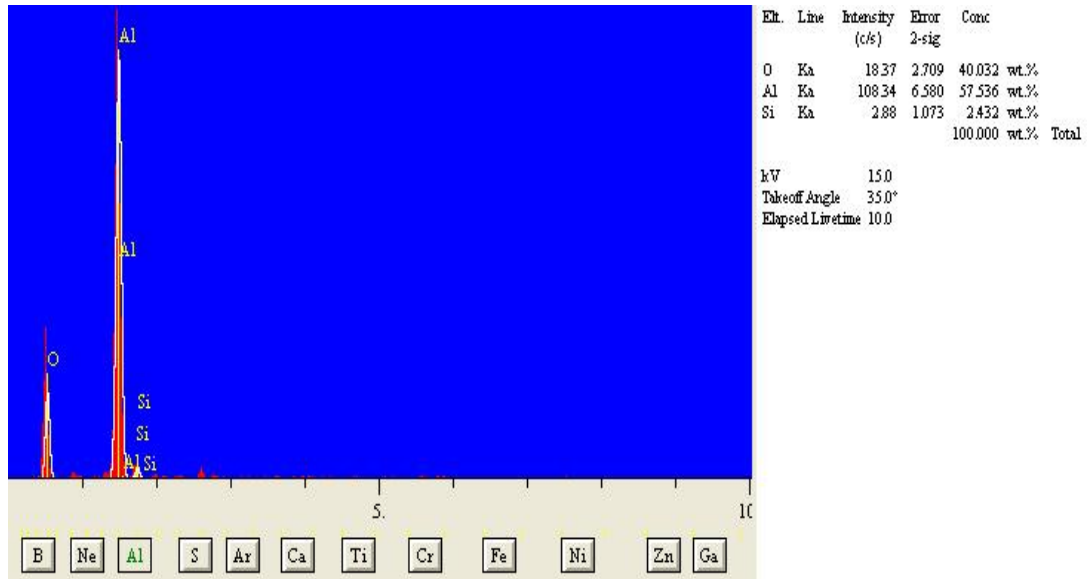
Şekil 6.16' da verilen grafiğe bakıldığında %1 ve %3 Al_2O_3 içeren numunede gözenek duvarlarının %5 ve 7 Al_2O_3 içeren numunelere göre daha ince olduğu ve gözenek dağılımının homojen olduğu tespit edilmiştir (Resim 6.12 a ve b). Resim 6.12 a' da görüldüğü gibi takviye elemanı düşük olan köpük yapının daha düzenli ve daha çok gözenek yapısına sahip olduğu görülmektedir. %1 ve %3 oranında Al_2O_3 ihtiva eden metalik köpük yapıların makro boyutta gözenek sayılarının kısmen birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. % 3 oranında Al_2O_3 içeren köpük yapının makro boyutta gözenek dağılımının ve gözenek duvar kalınlığının %1 oranın Al_2O_3 içeren yapıya benzerlik gösterdiği söylenebilir Şekil 6.16' da verilen grafiğe bakılarak söylenebilir. Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının sabit olması nedeniyle sabit köpürtme süresinde gözenek duvarlarından artan takviye elemanına bağlı olarak bozulma daha geç olmuştur. Artan Al_2O_3 oranına bağlı olarak gözenek sayısında azalma ve gözenek duvar kalınlıklarında artış meydana gelmiştir (Resim 6.12 c ve d). Şekil 6.16 ' da görüldüğü gibi en kalın gözenek duvarı yapısına %7 Al_2O_3 içeren köpük numunelerde ulaşılmıştır (Resim 6.12 d). Takviye elemanında ki artış gözenek duvarlarında dayanım artışına neden olmaktadır [44]. Kullanılan köpürtme sıcaklığı yapıya ilave edilen takviye elemanının ergime derecesinden daha düşüktür ve bu nedenle seramik parçacıkların gözenek duvarlarında hiçbir reaksiyona girmeden kaldığı düşünülmektedir. Buna bağlı olarak %7 Al_2O_3 içeren yapılarda gözenek duvarlarında incelme ve yanında ki diğer gözenekler ile birleşme daha sınırlı sayıda olmuştur. Resim 6.12 d' de görüldüğü üzere artan seramik parçacık miktarına paralel olarak numunelerin alt kısımlarında da elde edilen gözenek sayısı daha düşüktür. Üretilen köpük numunelerin SEM görüntüleri Resim 6.13 ' de görülmektedir. İlave edilen Al_2O_3 seramik parçacıkları gözenek duvarlarını oluşturan matris içinde homojen dağılmış görünümündedirler. Resim 6.13 b' ye bakıldığında matris malzemesi ile parçacık ara yüzeylerinde belirgin mikro boşluk oluşumları gözlenmediğinden matris ile parçacık arasında ıslatma problemi olmadığı düşünülmektedir.



Resim 6.13. Al_2O_3 içeren Alümix 231 esaslı kompozit köpüklerin SEM görüntüleri
a) Gözenek duvarı b) Matris malzeme parçacık ara yüzeyi



Resim 6.14. Al_2O_3 içeren Alümix 231 esaslı kompozit köpüklerde Al_2O_3 partükülleri



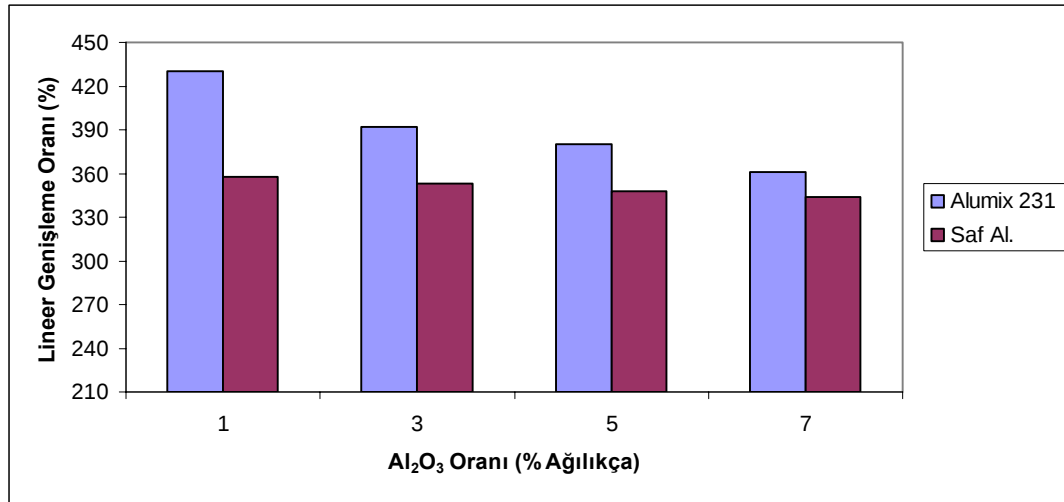
Resim 6.15. Al_2O_3 içeren Alümix 231 esaslı kompozit köpüklerin EDX analiz değerleri

Üretilen Al_2O_3 içeren Alümix 231 esaslı kompozit köpüklerin EDX görüntüleri Resim 6.14 ve Resim 6.15’ de görülmektedir. Resim 6.14’de gözenek duvarı üzerinde görülen nokta üzerinden analiz yapılmıştır. Resim 6.15’de verilen analiz sonucuna göre gözenek duvarı üzerindeki Al_2O_3 parçacığının varlığını kanıtlayan yüksek oksijenin varlığıdır.

6.5. Al ve Alumix 231 Matrisli Al_2O_3 Parçacık Takviyeli Kompozit Metalik Köpüklerin Kıyaslanması

Köpürtücü madde miktarının ve köpürtme sıcaklığının üretilen metalik köpüklerin gözenek morfolojilerine etkilerini incelenmek amacıyla değişik oranlarda köpürtücü madde içeren numuneler farklı sıcaklıklarda ve birbirleri ile kombine edilerek pilot deneyler yapılmıştır. Yapılan pilot deneyler neticesinde matris malzemesi ön alaşımlı alümix 231 tozu için köpürtücü madde miktarı %1 ve köpürtme sıcaklığı 690°C olarak, matris malzemesi saf alüminyum tozu için köpürtücü madde miktarı %1 ve köpürtme sıcaklığı 710°C olarak belirlenmiştir. Pilot deneyler sonrası belirlenen parametrelere bağlı olarak Al_2O_3 parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler elde edilmiştir. Bir sonraki aşamada her iki matris malzemesine sahip metal matrisli kompozit malzemeler belirlenen sıcaklıklarda ayrı ayrı olarak fırın içerisine

yerleştirilerek 10 dakika köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Köpürtülen numuneler fırın içerisinden alınarak atmosfer ortamında soğumaya bırakılmıştır.

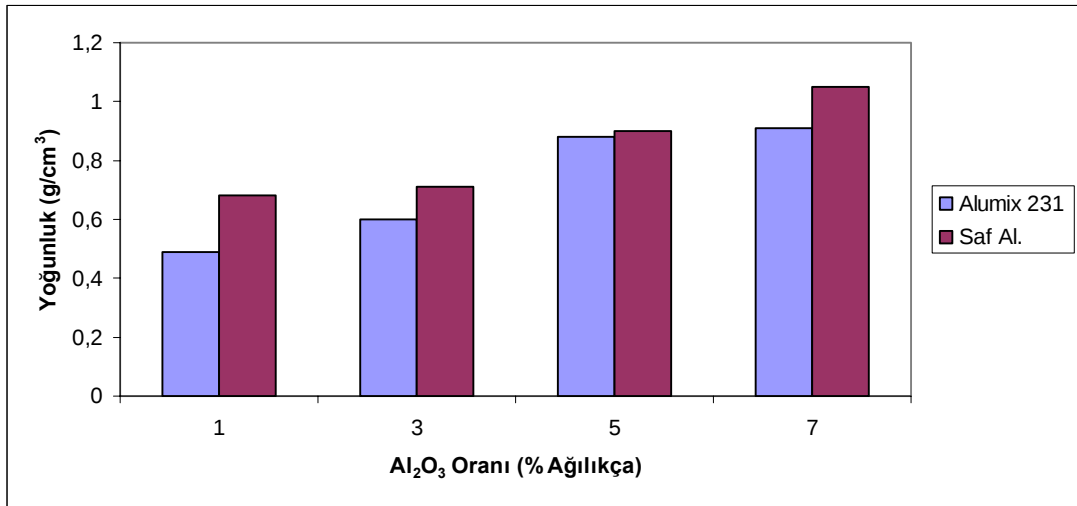


Şekil 6.17. Matris malzemeler içerisindeki Al₂O₃ oranındaki artışa bağlı olarak lineer genişlemelerin karşılaştırılması

Şekil 6.17’ de matris malzemesi ön alaşımlı Alumix 231 tozu ve saf Alüminyum tozu olan yapılar içerisine ilave edilen Al₂O₃ parçacıklarının oranının artmasına bağlı olarak değişen maksimum lineer genişleme oranları görülmektedir. Her iki matris malzemesi içerisinde de var olan Al₂O₃ parçacıklarının oranının artmasına bağlı olarak lineer genişlemede azalma gözlenmiştir. Bir sıvıyı köpükletmek, genellikle yüzey-aktif bir madde gerektirir. Böylece sıvıların yüzey gerilimleri azalır ve köpük malzemenin elastik davranışı gelişir [44]. Her iki matris malzemesi içinde yapı içerisinde var olan Al₂O₃ parçacıkların gözenek duvarları üzerinde yüzey etken maddesi olarak davrandığı tespit edilmiştir. Matris yapılar içerisinde var olan Al₂O₃ parçacık oranındaki artış hücre duvarlarında dayanımı arttırıp hidrojen gazı genişlemesini engellemekte ve köpürme sırasında lineer genişlemeyi azaltmaktadır. Köpük dayanıklılığındaki parçacıkların rolü sadece bir mekanizmaya yüklenmemelidir. Geniş alanlar üzerinde ince film kalınlığı ve drenaj azalması gibi çeşitli etkiler parçacıkların genel köpük dayanıklılık etkisinde önemlidir [49]. Değişik yöntemler ile köpüklerin yapımı esnasında seramik parçacıklar eklenmiş ve sıvıyla iyi ıslanma gösteren parçacıkların köpük *kararlılığını* geliştirilebileceği saptanmıştır. Islanabilirliği geliştirmek için Mg gibi yüksek reaktif elementlerin

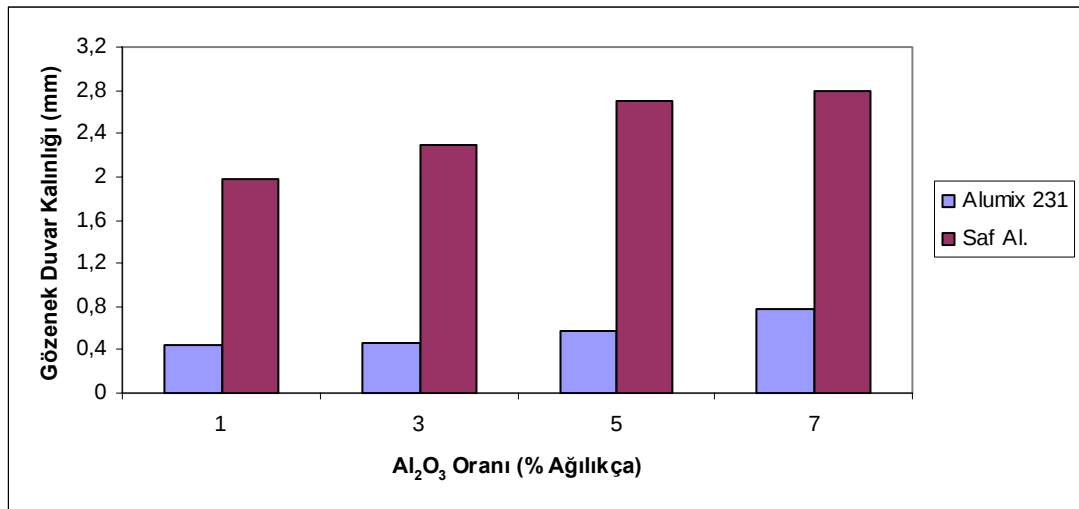
ilavesi kullanılmıştır. Islanma, metal-oksit yüzeyinde Mg ve Alümina arasındaki reaksiyondan etkilenmiştir [48]. Literatüre bakıldığında yapılan çalışmalarda takviye elemanı ile ara yüzey arasında yeterli ıslatmayı sağlamak için ön alaşımlı değişik kompozisyona sahip tozlar kullanıldığı görülmektedir [48]. Bu bağlamda ön alaşımlı Alümix 231 (Al-Cu %2,5-Mg %0,5-Si %14) tozu ile üretilen metal matrisli kompozit köpüklerde parçacıklar ile matris malzeme arasındaki ıslatmanın, saf Al matrisli köpüklerden daha iyi olduğu düşünülmekte ve köpürmenin daha fazla olduğu Şekil 6.17’ de görülmektedir.

Şekil 6.18’ de matris malzemesi saf Alüminyum tozu ve ön alaşımlı Alumix 231 tozu olan yapılar içerisine ilave edilen Al_2O_3 parçacıklarının oranının artmasına bağlı olarak değişen yoğunluk oranları görülmektedir. Şekil 6.18’ de görüldüğü gibi yapılan deneylerde üretilen metalik köpüklerde seramik parçacık oranındaki artışa bağlı olarak yoğunluk değerlerinde artış gözlenmiştir. Matris malzemesi ön alaşımlı Alumix 231 tozu olan numunelerde en düşük yoğunluk değeri $0,48 \text{ g/cm}^3$ en yüksek yoğunluk değeri $0,91 \text{ g/cm}^3$ olarak tespit edilmiştir. Matris malzemesi saf Al tozu olan numunelerde ise en düşük yoğunluk değeri $0,67 \text{ g/cm}^3$ en yüksek yoğunluk değeri $1,04 \text{ g/cm}^3$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.18. Matris malzemeler içerisindeki Al_2O_3 oranındaki artışa bağlı olarak yoğunluğun karşılaştırılması

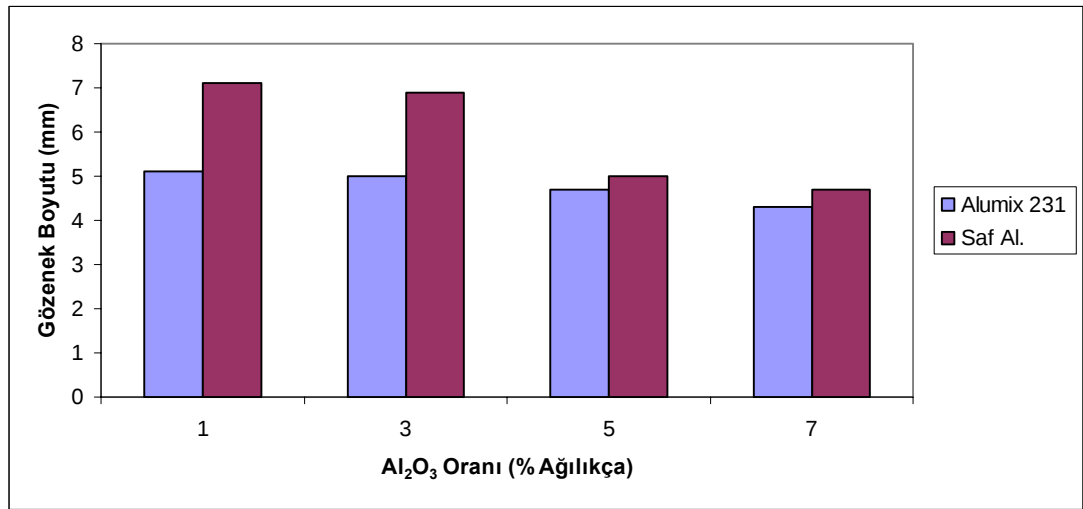
Her iki matris malzemesi ile üretilen köpükler için kısmen yakın yoğunluk değerleri elde edildiği söylenebilir. Fakat Şekil 6.18' bakıldığında Alumix 231 esaslı metal matrisli kompozit köpüklerin Al esaslı kompozit köpüklere kıyasla yoğunluğunun çok azda olsa düşük olduğu görülmektedir. Parçacık miktarındaki artış gözenek duvarlarında katı faz oranında artışa sebep olmaktadır. Gözenek duvarlarında var olan parçacıkların duvar dayanımını artırdığı ve köpürmenin daha geç başladığı düşünülmektedir. Alüminyum alaşımlarında yapı içerisinde var olan Silisyum ve Magnezyumun yapının ergime derecesini düşürdüğü ve gözenek duvarlarını incelttiği bilinmektedir [44]. Ön alaşımlı alumix 231 tozu içerisinde var olan %14 oranındaki Silisyumun ergime derecesini düşürdüğü düşünülmektedir. Buna bağlı olarak köpürmenin daha erken başladığı ve gaz boşluklarının fazla olmasından dolayı yoğunluğun daha düşük olduğu söylenebilir.



Şekil 6.19. Matris malzemeler içerisindeki Al₂O₃ oranındaki artışa bağlı olarak gözenek duvar kalınlıklarındaki değişimin karşılaştırılması

Her iki matris malzemesi ile üretilen metal matrisli kompozit köpüklerde gözenek boyutu ve gözenek duvar kalınlığı içerisindeki takviye elemanın miktarına göre farklılıklar göstermektedir. Şekil 6.19 ve Şekil 6,20' de Alümix 231 esaslı ve saf Al esaslı Al₂O₃ parçacık takviyeli kompozit köpüklerinde takviye oranının artmasına bağlı olarak gözenek boyutunda ve gözenek duvar kalınlıklarında meydana gelen değişimler görülmektedir. Her iki matris yapıda da artan takviye elemanın miktarına

bağlı olarak gözenek duvar kalınlıklarında artma, gözenek boyutunda azalma olduğu tespit edilmiştir. Alumix 231 esaslı kompozit köpüklerin saf Al esaslı kompozit köpüklere göre gözenek duvar kalınlıklarının daha ince ve gözenek boyutlarının daha küçük olduğu Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’ de görülmektedir. Bunun sebebinin Alumix 231 içerisinde var olan alaşım elementlerinden dolayı köpürmenin daha erken başlaması ve gözenek duvarlarına köpürtücü maddeden açığa çıkan hidrojen gazının daha erken etki etmesi olarak düşünülmektedir.



Şekil 6.20. Matris malzemeler içerisindeki Al₂O₃ oranındaki artışa bağlı olarak gözenek boyutundaki değişimin karşılaştırılması

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile saf alüminyum ve alümix 231 esaslı metalik köpük üretilmiştir. Birinci aşamada yapılan pilot deneylerde köpürtücü madde miktarı ve köpürtme sıcaklığı gibi iki farklı parametre seçilmiştir. Seçilen parametrelerden elde edilen uygun sonuçlar doğrultusunda ikinci aşamada yapı içerisine Al_2O_3 seramik parçacıklar ilave edilerek kompozit metalik köpükler üretilmiştir. Al_2O_3 seramik parçacıkların üretilen köpük metallerin gözenek morfolojisine etkileri incelenerek matris malzemeler arasındaki farklar karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir.

1. Matris malzemesi olarak kullanılan saf Al ve ön alaşımlı Alümix 231 tozları ile üretilen numunelerde her iki yapıda da yüksek oranda gözeneğe sahip metalik köpükler elde edilmiştir.
2. Ön alaşımlı Alümix 231 ve saf Alüminyum tozları ile üretilen ürünlerin her ikisinde de, deformasyon doğrultusunda köpürme ile genişleme meydana geldiği tespit edilmiştir.
3. Sabit köpürtme süresinde, köpürtme sıcaklığı ve köpürtücü madde miktarı arttıkça lineer genişlemenin arttığı, köpük malzemelerin yoğunluğunun azaldığı gözlenmiştir.
4. Ön alaşımlı Alümix 231 matrisli köpük metallerde elde edilen gözenek yapılarının, saf Al matrisli köpük metallerden elde edilen gözenek yapılarına göre daha düzenli ve homojen bir dağılım sergilediği görülmüştür.
5. Saf Al matrisli metalik köpüklerin gözenek duvarlarının ön alaşımlı alümix 231 esaslı metalik köpüklere göre daha kalın olduğu tespit edilmiştir.
6. Her iki matris malzemesi ile de Al_2O_3 seramik parçacık takviyeli kompozit metalik köpük yapılar üretilmiştir.
7. Sabit köpürtme parametrelerinde artan Al_2O_3 seramik parçacık oranına bağlı olarak, özellikle Al matrisli yapı içerisinde gözenek duvarlarında bozulmanın daha az olduğu ve gözenek sayısında azalma olduğu gözlenmiştir.

8. Artan seramik parçacık oranına paralel olarak kompozit köpük numunelerin gözenek duvar kalınlıklarında artış gözlenmiş ve bu artışa bağlı olarak yoğunlukta artma meydana gelmiştir.
9. Minimum $0,58 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta Al metalik köpük, $0,45 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta Alümix 231 metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir.
10. Kompozit metalik köpükte ise minimum $0,48 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta Alümix 231 matrisli Al_2O_3 takviyeli metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir.
11. Ön alaşımlı Alümix 231 tozu ve saf Al tozları ile metalik köpük üretiminde her iki matris malzemesi için en uygun köpürtücü madde miktarının %1 olduğu söylenebilir.
12. Yapılan pilot deneyler ile saf Al matrisli yapılar için uygun köpürtme sıcaklığının 710°C , ön alaşımlı Alümix 231 matrisli yapılar için 690°C olduğu söylenebilir. Tercih edilen köpürtme sıcaklıkları arasındaki fark matris malzemelerin kimyasal yapıları ile ilgilidir.
13. Ön alaşımlı Alümix 231 tozu içerisinde bulunan %14 oranındaki Silisyum ergime sıcaklığını düşürmekte ve gözenek oluşumunun daha erken başlamasına sebep olmaktadır.
14. Yapı içerisinde düşük oranlarda (%1, %3, %5) var olan Al_2O_3 seramik parçacıkların gözenek oluşumunu engelleyici yönde etki etmediği söylenebilir. Fakat artan Al_2O_3 seramik parçacık oranının gözenek oluşumuna olumsuz yönde etki edebileceği kanısına varılabilir.
15. İncelemeler sonucu matris malzemesi ile parçacık ara yüzeylerinde belirgin mikro boşluk oluşumları gözlenmediğinden matris ile parçacık arasında ıslatma bakımından sorun olmadığı söylenebilir.

KAYNAKLAR

1. Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, 46: 559-632 (2001).
2. Liu, P.S., Liang, K.M., "Functional materials of porous metals made by P/M, electroplating and some other techniques", *Journal of Materials Science*, 36: 5059-5072 (2001).
3. Banhart, J., Weaire, D., "On the road again - metal foams find favor", *Pyhsics Today*, 37-42, (2002).
4. Banhart, J., Baumeister, J., "Deformation characteristics of metal foams", *Journal Materials Science*, 33: 1431-1440 (1998).
5. Cambronero, L.E.G., Ruiz-Roman, J.M., Corpas, F.A., Ruiz Prieto, J.M., "Manufacturing of Al-Mg-Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 1803-1809 (2009).
6. Onck, P.R., Merkerk, R., De Hosson, J.Th.M., Schmidt, I., "Fracture of metal foams: In-situ testing and numerical modeling", *Advanced Engineering Materials*, 6: 429-431 (2004).
7. Kim, A., Hasan, M.A., Nahm, S.H., Cho, S.S., "Evaluation of compressive mechanical properties of Al-foams using electrical conductivity", *Composite Structure*, 71: 191-198 (2005).
8. Zhao, Y.Y., Sun, D.X., "A novel sintering-dissolution process for manufacturing Al foams ", *Scripta Mater*, 44: 105-110 (2001).
9. Deqing, W., Ziyuan, S., "Effect of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminum foam", *Materials Science and Engineering*, A361: 45-49 (2003).
10. Feng Y., Zheng H., Zhu Z., Zu F., "The Microstructure and electrical conductivity of aluminium alloy foams", *Material Chemistery and Physics*, 78: 196-201 (2002).
11. Amjad, S., "Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams", *Adissertation submitted for the degree of Master of Philosophy in Materials Modelling at the University of Cambridge*, 3-7 (2001).
12. Banhart, J., "Aluminium foams for lighter vehicles", *Int. J. Vehicle Design*, 37: 114-125 (2005).

13. Banhart, J., "Aluminium Foams: On the Road to Real Applications", *Mrs Bulletin*, 290-295 (2003).
14. Nakajima, H., "Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores", *Progress Materials Science*, 52: 1091-1173 (2007).
15. Avarisli, O., Uğuz, A., "Metalik köpük malzemelerin otomotiv endüstrisinde kullanılması", *VIII. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu*, Bursa, 94-99 (2003).
16. Özer, G., "Alüminyum esaslı köpük metal üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 12-13 (2005).
17. Mondal, D.P., Goel, M.D., Das, S., "Effect of strain rate and relative density on compressive deformation behaviour of closed cell aluminum-fly ash composite foam", *Materials and Design*, 30: 1268-1274 (2009).
18. Simancik, F., Rajner, W., Rainhard, L., "Reinforced alulight for structural use", *In: Processing and properties of lightweight cellular metals and structures (TMS Annual Meeting)*, 25, (2002).
19. Losito, O., "An analytical characterizzation of metal foams for shielding applications", *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, Cambridge, USA, 247-252 (2008).
20. Bryant, J.D., Crowley, M.D., Wilhelmy, M.D., Kallivayalil, J.A., Wang, W., "Development of Alcoa Aluminum foam products", *Porous Metals and Metallic Forms: MetFoam07*, Montreal, 19-22 (2007).
21. Banhart, J., "Manufacturing Routes for Metallic Foams", *Journals of Materials*, 52: 22-27 (2000).
22. Akseli, I., "The application of aluminum foam fort he heat and noise reduction in automobiles", Master of Science, *İzmir Institute of Technology*, İzmir, 4-5 (2005).
23. Ip, S.W., Wang, Y., Toguri, J.M., "Aluminum foam stabilization by solid particles", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 38: 81-92 (1999).
24. Babcsan, N., Leitlmeier, D., Degischer, H.P., Banhart, J., "The role of oxidation in blowing particle-stabilised aluminium foams", *Advanced Engineering Materials*, 6: 421-428 (2004).
25. Leitlmeier, D., Degischer, H.P., Flankl, H.J., "Development of a foaming process for particulate reinforced aluminum melts", *Advanced Engineering Materials*, 10: 735-740 (2002).

26. Haydn, N. , Wadley G., “Cellular Metals Manufacturing”, *Advanced Engineering Materials*, 10: 726-733 (2002).
27. Miyoshi, T., Itoh, M., Shigeru, A., Kitahara, A., “ALPORAS aluminum foam: Production Process, Properties and applications”, *Advanced Engineering Materials*, 4: 179-183 (2000).
28. Çinici, H., “ Toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretimi” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 23-24, 45-55 (2004).
29. Frei, J., Gergely, V., Mortensen, A., Clyne, T.W., “The effect of prior deformation on the foaming behaviour of FORMGRIP precursor material”, *Advanced Engineering Materials*, 4: 749-752 (2002).
30. Gergely, V., ve Clyne, B., “The FORMGRIP Process:Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors”, *Advanced Engineering Materials*, 4: 175-178 (2000).
31. Stöbener, K., Baumeister, J., Lehmhus, D., Stanzick, H., Zöllmer, V., “Composites based on metallic foams: phenomenology, production, properties and principles”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Slovakia, 281-286 (2003).
32. Yu, C.J., Eifert, H., Baumeister, J., Banhart, J., “Metal foaming by a powder metallurgy method: production, properties and applications”, *Mat. Res. Innovat*, 2: 181-188 (1998).
33. Hai-jun, Y., Guang-chun, Y., Yi-han, L., “Tensile property of Al-Si closed-cell aluminium foam”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 16: 1335-1340 (2006).
34. Neville, B.P., Rabiei, A., “Composite metal foams processed through powder metallurgy”, *Materials and Design*, 1-9 (2007).
35. Babcsan, N., Garcia Moreno, F., Banhart, J., “Metal foams-high temperature colloids part II: In situ analysis of metal foams”, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 309: 254-263 (2007).
36. Kovacik, J., Simancik, F., Jerz, J., Tobolka, P., “Reinforced aluminium foams”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Slovakia, 154-159 (2003).
37. Banhart, J., Seeliger, H., “Aluminium foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and applications”, *Advanced Engineering Materials*, 9: 793-802 (2008).

38. Rabiei, A., Vendra, L.J., “A comparison of composite metal foam’s properties and other comparable metal foams”, *Materials Letters*, 63: 533-536 (2009).
39. Avarisli, O., “Köpük metal malzemelerin fiziksel özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 1-3 (2005).
40. Ahmad, Z., Thambiratnam, D.P., “Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading”, *Materials and Design*, 30: 2393-2403 (2009).
41. Schwingel, D., Seeliger, H.W., Vecchionacci, C., Alwes, D., Dittrich, J., “Aluminium foam sandwich structures for space applications”, *Acta Astronautica*, 61: 326-330 (2007).
42. Neugebauer, R., Hipke, T., Hohlfeld, J., Thümmeler, R., “Highly damped machine tools with metal foam”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Slovakia, 214-218 (2003).
43. Schaeffler, P., Rajner, W., “Production, properties and applications of Alulight closed-cell aluminum foams”, *The Fifth International Workshop on Advanced Manufacturing Technologies*, London, Canada, 1-6 (2005).
44. Babcsán N., Leitmeier D., Degischer H.P., “Foamability of Particle Reinforced Aluminum Melt”, *Mat.-wiss.u.Werkstofftech.*, 34: 22-29 (2003).
45. Garcia-Moreno, F., Banhart, J., “Foaming of blowing agent-free aluminium powder compacts”, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 309: 264–269 (2007).
46. Çinici H., Türker M., “TM Yöntemi İle Üretilen Alüminyum Esaslı Metalik Köpüğe Deformasyon Miktarının Etkilerinin Araştırılması”, *13. Uluslar arası Metalürji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul – Türkiye, 854-860 (2006).
47. Kennedy, A.R., “The effect of TiH₂ heat treatment on gas release and foaming in Al-TiH₂ preforms”, *Scripta Materialia*, 47: 763-767 (2002).
48. Asavavisithchai, S., Kennedy, A.R., “The effect of Mg addition on the stability of Al–Al₂O₃ foams made by a powder metallurgy route ”, *Scripta Mater.*, 54: 1331-1334 (2006).
49. Haesche, M., Weise, J., Moreno, F., Banhart, J., “ Influence of particle additions on the foaming behaviour of AlSi 11/ TiH₂ composites made by semi-solid processing”, *Materials Science Engineering A*, 480, 283-288 (2008).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÖKMEN, Uğur
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 18.12.1983 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 356 63 85
Faks :
e-mail : u-gokmen@hotmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/ Metal Bölümü	
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Metal Bölümü	2006
Lise	Keçiören EML/ Elektronik Bölümü	2000

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Av yapmak, Yüzmek