

**KAPALI HÜCRELİ METALİK KÖPÜKLERDE HÜCRE
MORFOLOJİSİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ VE
FOTOELASTİSİTE YÖNTEMİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ**

Ersin BAHÇECİ

**DOKTORA TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Kasım 2012

ANKARA

Ersin BAHÇECİ tarafından hazırlanan KAPALI HÜCRELİ METALİK KÖPÜKLERDE HÜCRE MORFOLOJİSİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ VE FOTOELASTİSİTE YÖNTEMİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

.....

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Müh.

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

.....

(Metalurji ve Malzeme Müh., Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

.....

(Metalurji ve Malzeme Müh., Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. İbrahim USLAN

.....

(Makine Müh., Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. A. Kadir EKŞİ

.....

(Makine Müh., Çukurova Üniversitesi)

Prof. Dr. Ferhat GÜL

.....

(Metalurji ve Malzeme Müh., Gazi Üniversitesi)

Tarih: 19/11/2012

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

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

.....

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.

Ersin BAHÇECİ

**KAPALI HÜCRELİ METALİK KÖPÜKLERDE HÜCRE
MORFOLOJİSİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ VE
FOTOELASTİSİTE YÖNTEMİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ
(Doktora Tezi)**

Ersin BAHÇECİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Kasım 2012**

ÖZET

Bu çalışmada, Al esaslı kapalı hücreli metalik köpüklerde hücre morfolojisinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. AlSi8Mg0,8 alaşımı metalik köpük malzemeler Toz Metalurjisi (TM) yöntemiyle üretilmiştir. Ağırlıkça %8 Si, %0,8 Mg, %0,8-1,2 TiH₂ oranlarındaki tozlar ve kalanı Al tozu olmak üzere üç eksenli Turbola cihazında 45 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karışım tozlar oda sıcaklığında 300 MPa basınçta silindirik biçimde preslenmiş, 500 °C’de 1 saat süreyle sinterlemiş ve ardından 8:1 oranında 450 °C’de sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Ekstrüze edilmiş malzemelere 400 °C’de %50 deformasyon oranına kadar sıcak/ılık haddeleme işlemi uygulanmış ve köpürmeye hazır lama biçimli preform numuneler üretilmiştir. Preform lama malzemeler, ön ısıtmasız ve yaklaşık 400°C’de ön ısıtmalı kalıp içerisinde 720 ve 760 °C fırın sıcaklıklarında köpürtülmüştür. Bu sayede üç farklı yoğunluk aralığında ve üç farklı hücre boyutunda metalik köpük numuneler üretilmiştir. Metalik köpüklerin değişik elastik gerilmeler altındaki basma gerilme dağılımları fotoelastisite yöntemiyle incelenmiştir.

Genel olarak köpük hücre duvarı mikroyapısı α -Al dendrit fazı, Al-Si ötektik fazı, birincil Si fazı, yapı içerisinde çözünmüş Ti ve yarı kararlı hegzagonal β' -Mg₂Si çökeltisinden oluşmuştur. Metalik köpüklerin basma deformasyonu sonucunda yaklaşık aynı yoğunluktaki köpük malzemelerin farklı ortalama hücre boyutu ve şekil faktörü, kırılma ve çökme mekanizmalarının türünü değiştirmiştir. Aynı yoğunluk aralığındaki köpük malzemelerin basma dayanımları, hücre boyutu artıkça azalırken, şekil faktörü ideale yakın olan malzemelerde artmıştır. Metalik köpük malzemenin akma gerilmesine kadar gözenek duvarlarında oluşan gerilme dağılımları fotoelstisite yöntemiyle belirlenebilmiştir.

Bilim Kodu	: 710.1.092
Anahtar Kelimeler	: Metalik köpük, Al alaşımı köpük, Kapalı hücre, Şekil faktörü, Hücre boyutu, Fotoelastisite metodu, Basma dayanımı
Sayfa Adedi	: 128
Tez Yöneticisi	: Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

**EFFECT OF CELL MORPHOLOGY ON MECHANICAL PROPERTIES OF
CLOSED CELL METAL FOAMS AND USABILITY OF
PHOTOELASTICITY METHOD**

(Ph.D. Thesis)

Ersin BAHÇECİ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

November 2012

ABSTRACT

In this study, effects of cell morphology on the mechanical properties of Al-based closed cell metal foams were investigated. AlSi8Mg0.8 alloy closed cell metallic foams were produced by Powder Metallurgy (PM) route. By weight of Al, 8% Si, 0.8% Mg and 0.8 - 1.2% TiH₂ powders were mixed in a three dimensional Turbulo for 45 min. Mixed powders were compacted at room temperature under 300 MPa pressure and sintered at 500 °C for an hour and then hot extrusion process at the rate of 8:1 with 450 °C was applied. Extruded materials were rolled up to 50 % hot / warm deformation rate at 400 °C and also plate-shaped preform plate samples which are ready to foam were produced. Preform plate materials were foamed at 720 and 760 °C furnace temperatures after placed in foaming mold with and without pre-heated. By this way, metallic foams were produced in three different density and three different cell sizes. Compressive stress distribution of Al based metallic foams under different compressive elastic stress were investigated by photostress method.

Generally, microstructure of the foam cell walls was consisted of α -Al dendrite phase, Al-Si eutectic structure, primary Si, Ti dissolved in the structure and metastable hexagonal β' -Mg₂Si precipitates. As a result of compression deformation of metallic foams, the type of fracture and collapse mechanism were changed by differences in cell size and shape factor of foam materials with about same density. Compression strength of the foam materials in same density decreased with increasing cell size. However, it increased for foam materials have close to ideal shape factor. The stress distribution up to yield stress formed on the cell wall could be determined with Photoelasticity method.

Science Code : 710.1.092
Keywords : Metallic foam, Al foam, Closed cell, Shape factor, Cell size, Photoelasticity method, Compressive strength
Page Number : 128
Adviser : Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım sayın Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesi toplantılarındaki değerli katkı ve değerlendirmelerinden dolayı tez izleme komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. Mehmet TÜRKER ve sayın Prof. Dr. İbrahim USLAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Volkan KILIÇLI ve sayın Öğr. Gör. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalar esnasındaki yardımlarından dolayı sayın Doç. Dr. Ahmet GÜRAL, sayın Öğr. Gör. Dr. Alpay ÖZER, sayın Halil KARAKOÇ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tezimin yazımı esnasındaki yardımlarından dolayı sayın Öğr. Gör. Dr. İsmail OVALI'ya teşekkür ederim.

Tezi hazırlama sürecinde; sabır, metanet ve anlayışla beni madden ve manen sürekli destekleyen çok kıymetli babam Mithat BAHÇECİ, annem Nazire BAHÇECİ, abim Öğrt. Ersen BAHÇECİ, kardeşim Ceylan BAHÇECİ'ye şükranlarımı sunarım.

Son olarak tez hazırlama sürecinde; sabır, sevgi, metanet ve anlayışla beni sürekli destekleyen yanımdan bir an olsun ayrılmayan çok kıymetli hayat arkadaşım ve eşim Pelin KARLI BAHÇECİ'ye şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ	1
2. METALİK KÖPÜKLER.....	4
2.1. Kapalı Hücre Alüminyum Köpüklerin Üretim yöntemleri	6
2.1.1. Ergitme yöntemi ile kapalı hücre Al köpük üretim yöntemleri	7
2.1.2. Öncü gaz salınımı ile takviyelendirilmiş metalik köpük üretimi (FORMGRIP)	12
2.1.3. Toz metalurjisi yöntemi ile kapalı hücre Al köpük üretimi	14
2.1.4. İleri gözenek morfolojisi (APM) teknoloji ile kapalı hücre köpük üretimi	23
2.2. Kapalı Hücre Alüminyum Köpük Metallerin Mekanik Davranışları ve Fiziksel Özellikleri	25
2.2.1. TM yöntemiyle üretilmiş kapalı hücre al köpük metallerin basma davranışları	26
3. FOTOSTRES ANALİZ YÖNTEMİ	36
3.1. Fotostres Cihazı ile Yapılabilecekler	39

Sayfa

3.2. Fotostres Cihazının Kullanıldığı Yerler.....	40
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	45
4.1. Malzeme Seçimi	45
4.2. Ön Malzeme (Preform) Üretim Yöntemi	46
4.3. Köpürtme İşlemi	50
4.4. Metalografik Çalışmalar	54
4.4.1. Preform ve köpük malzeme mikroyapı karakterizasyonu.....	54
4.4.2. Köpük malzeme makroyapı karakterizasyonu	54
4.4.3. Hücre duvar kalınlıklarının ölçümü	55
4.4.4. Yoğunluk ölçümü	56
4.5. Basma Deneyi.....	56
4.5.1. Elastikiyet modülü ve basma gerilmesi hesaplamaları	57
4.6. Fotoelastisite Deneyi	62
4.6.1. Fotoelastik kaplama hazırlanması ve yapıştırma.....	62
4.6.2. Fotoelastisite cihazı.....	65
4.6.3. Fotoelastisite deney setinin hazırlanması.....	66
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	67
5.1. Preform Malzeme Karakterizasyonu	67
5.2. Köpük Karakterizasyonu	72
5.2.1. Mikroyapı karakterizasyonu.....	72
5.2.2. Makroyapı karakterizasyonu	80
5.3. Metalik Köpüklerin Dayanımları	85

Sayfa

5.3.1. Kenarları kapalı köpük numunelerin basma testi sonuçları	85
5.3.2. Yan duvarları açık metalik köpüklerin basma deformasyon mekanizmaları	87
5.4. Fotoelastisite Deney Sonuçları.....	107
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	114
6.1. Sonuçlar	114
6.2. Öneriler	117
KAYNAKLAR.....	118
ÖZGEÇMİŞ.....	126

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Üretilen MMK alaşımları	9
Çizelge 4.1. Çalışmalarda kullanılan toz malzemelerin özellikleri ve köpürtme işlem parametreleri	48
Çizelge 4.2. PL-8 fotoelastik reçinenin bazı fiziksel özellikleri	62
Çizelge 5.1. Köpük malzemelerin genel fiziksel ve geometrik özellikleri	81
Çizelge 5.2. Hücre duvarı kalınlıkları	85

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Köpük türleri; a) Kapalı gözenekli metalik köpük, b) açık gözenekli metalik köpük.....	5
Şekil 2.2. Gaz enjeksiyonla doğrudan köpürtme işlemi	8
Şekil 2.3. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme	10
Şekil 2.4. FORMGRIP yönteminin şematik gösterimi	13
Şekil 2.5. Toz metalurjisi yönteminin üretim aşamaları	15
Şekil 2.6. Köpürtme süresinin yoğunluğa etkisi.....	16
Şekil. 2.7. Al 6061 köpüğünün; a) zamana bağlı genleşme grafiği, b) 800 °C’de farklı sürelerde üretilen köpük resmi.....	17
Şekil. 2.8. AlSi7 köpüğünün; a) zamana bağlı genleşme grafiği, b) 750 °C’de farklı sürelerde üretilen köpük resmi.....	18
Şekil 2.9. Al köpüğün uzamasına Mg ve Al ₂ O ₃ ilavesinin etkisi.....	20
Şekil 2.10. AlSi7 ve AlSi7- SiC alaşımların farklı köpürtme sıcaklıklarındaki genleşme- zaman grafiği	21
Şekil 2.11. Al ve Al-TiB ₂ köpüklerinin köpürtme zamanına bağlı genleşmesi	22
Şekil 2.12. TiH ₂ ilavesinin Al köpüklerdeki gözenek oluşumu ile ilişkisi	23
Şekil 2.13. Metal köpüklerin gerilme-birim şekil değişim grafiği	27
Şekil 2.14. Kapalı hücre Al köpüğün; a) deformasyon bölgesindeki üç kısım b) basma deneyinin şeklinin gösterimi	28
Şekil 2.15. Petek şekilli hücrenin teorik olarak plastik çökmesinin modeli	29
Şekil 2.16. a) Eksenel pozisyonun fonksiyonu olarak çarpılma ve eksenel gerinimler grafiği, b) çarpılma mekanizmaları	30
Şekil 2.17. Enerji emme mekanizmaları	31
Şekil 2.18. Farklı yoğunluktaki saf Al köpüklerin gerilme/gerinim eğrileri.....	31

Şekil	Sayfa
Şekil 2.19. Aynı yoğunluktaki AlSi10 köpüklerin gerilme/gerinim grafiği	32
Şekil 2.20. 30 ve 60 mm boyundaki AlSi10 köpük numunelerin (yoğunluk: 0,19-0,20) gerilme/gerinim eğrileri	33
Şekil 2.21. 30 ve 60 mm boyundaki farklı yoğunluklardaki AlSi10 köpük numunelerin sutunsal grafiği	33
Şekil 2.22. Al- %6 Si- %4 Cu köpük malzemenin; a) köpürtme yönüne dik, b) köpürtme yönünde yapılan basma deneyi gerilme/gerinim grafikleri.....	35
Şekil 3.1. Reflektif polariskop cihazı çalışma prensibi şematik gösterimi	37
Şekil 3.2. Renk saçaklarının (Fringe order) ve izokromatik kuvvet çizgilerinin görünümü	38
Şekil 3.3. İzoklinik kuvvet çizgilerinin görünümü	39
Şekil 4.1. Si oranının yoğunluk ve lineer genleşme parametrelerine etkisi.....	45
Şekil 4.2. Ön malzeme üretim işlem basamaklarının şematik gösterimi	47
Şekil 4.3. Köpürtme kalıbında kullanılan tesviye edilmiş preform malzeme	51
Şekil 4.4. Köpürtme kalıbı	52
Şekil 4.5. Köpürme sıcaklığı tespiti deney düzeneği.....	52
Şekil 4.6. Üretilen köpük malzemenin numune ebatlarında kesilmesi.....	53
Şekil 4.7. Köpük numune görüntüsü üzerinde AutoCAD programı ile alan oluşturma, alan ve çevre hesaplaması	55
Şekil 4.8. K88125 metalik köpük malzemede Eş 4.13 ve Eş 4.16 kullanılarak hesaplanan σ_{pl}^* , köpük plato akma gerilmesi	61
Şekil 4.9. Fotostres deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi	66
Şekil 5.1. a) Ekstrüze numune SEM görüntüsü, b) TiH ₂ parçacığı EDS analiz sonucu, c) Birincil Si parçacığı EDS analiz sonucu ve d) Mg'ca zengin bölge EDS analiz sonucu.....	67

Şekil	Sayfa
Şekil 5.2. Ekstrüze numunenin XRD analiz sonucu.....	70
Şekil 5.3. Köpük malzemenin XRD analiz sonucu	75
Şekil 5.4. Köpük hücre boyut dağılımı	83
Şekil 5.5. Yoğunluk-Şekil faktörü ilişkisi.....	84
Şekil 5.6. Basma deneyinde Yük-Yer değiştirme ilişkisi ($0,396 - 0,415 \text{ g/cm}^3$).....	86
Şekil 5.7. Basma deneyinde Yük-Yer değiştirme ilişkisi ($0,524- 0,533 \text{ g/cm}^3$)	87
Şekil 5.8. Basma deneyinde Yük-Yer değiştirme ilişkisi ($0,598- 0,676 \text{ g/cm}^3$).	87
Şekil 5.9. K88121 köpük malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	89
Şekil 5.10. K88122 köpük malzeme gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	91
Şekil 5.11. K88123 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	94
Şekil 5.12. K88124 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	94
Şekil 5.13. K88125 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	96
Şekil 5.14. K88126 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	98
Şekil 5.15. K88127 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	100
Şekil 5.16. K88128 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	100
Şekil 5.17. Ortalama yoğunlukları $0,40 \text{ g/cm}^3$ olan köpüklerin $\sigma^* - \epsilon$ ilişkileri.....	103
Şekil 5.18. Ortalama yoğunlukları $0,61 \text{ g/cm}^3$ olan köpüklerin $\sigma^* - \epsilon$ ilişkileri.....	103
Şekil 5.19. Ortalama yoğunlukları $0,70 \text{ g/cm}^3$ olan köpüklerin $\sigma^* - \epsilon$ ilişkileri.....	104
Şekil 5.20. K88121 ve K88125 köpük malzemelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.....	105
Şekil 5.21. Farklı köpüklerde Eş 4.11 ve Eş 4.14 kullanılarak hesaplanan σ_{pl}^* , köpük plato akma gerilmesi	106

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. FORMGRIP yöntemi ile üretilmiş Al-9Si alaşımlı köpükte SiC parçacıklarının hücre duvarındaki dağılımı; a) hücre duvarları, b) plateau sınırları.....	13
Resim 2.2. a) Al köpüğün, b) Al-TiB ₂ köpüğün farklı sürelerdeki köpük resimleri	22
Resim 2.3. a) Al köpüğün, b) Al-TiB ₂ köpüğün hücre duvarı resimleri.....	22
Resim 2.4. Üretilen küresel şekilli köpüğün birbiri ile yapıştırılması.....	24
Resim 2.5. Farklı boyutlardaki küresel alüminyum köpüklerin kesitleri.....	25
Resim 2.6. Üretilen küresel şekilli köpüğün kullanılacak parçanın içerisine yerleştirmesi	25
Resim 3.1. Frialit2 implantlar ve kronlar	41
Resim 3.2. a) Dik yerleştirilmiş Frialit2 implantın yüklenmiş hali b) Eğimli yerleştirilmiş Frialit2 implantın yüklenmiş hali	41
Resim 3.3. a) Ağız yapısı protatipi ve deney düzeneği, b) Oluşan fotostres görüntüsü.....	42
Resim 3.4. Yük kancasından fotostres görüntü resmi ve renk saçaklarının görünümü.....	43
Resim 3.5. Öngerilmeli kaynak dikişinin yüksüz durumda fotoelastik görüntüsü	44
Resim 3.6. Öngerilmeli kaynak dikişinde maksimum kalıntı gerilme oluştuğunda fotoelastik görüntüsü	44
Resim 4.1. Metalik köpük üretiminde kullanılan tozların SEM görüntüleri; a) Al, b) Si, c) Mg ve d) TiH ₂	46
Resim 4.2. a) Ekstrüze edilmiş ve b) Haddelenmiş numune.....	49
Resim 4.3. Metalik köpük numuneler.....	53

Resim	Sayfa
Resim 4.4. Kaplama malzemesi üretimde kullanılan cihaz ve malzemeler; a) Şeffaf kapak, b) Isıtıcı tabla ve kalıplama kenarlıkları, c) Isıtıcı kontrol ünitesi, d) Reçine (PL-8), e) Sertleştirici (PLH-8), f) PC-1 BIPAX Reçine/Sertleştirici aç kullan paket	63
Resim 4.5. Kaplama malzemesi hazırlama düzeneği	63
Resim 4.6. Fotoelastik kaplama yapıştırılmış köpük malzeme	64
Resim 4.7. LF/Z-2 model polariskop	65
Resim 4.8. Fotoelastisite deney seti.....	66
Resim 5.1. a) Sinterlenmiş numune, b) ekstrüze edilmiş numune mikroyapısı	68
Resim 5.2. Ekstrüze preform malzemede genel parçacık dağılımları	71
Resim 5.3. % 50 haddelenmiş numunede Si ve Mg dağılımları	72
Resim 5.4. AlSi8Mg0,8 köpük malzeme hücre duvarı mikroyapı resmi (%5 HF dağlamada)	73
Resim 5.5. Hücre duvarı mikroyapısı (%5 HF dağlamada)	74
Resim 5.6. AlSi8Mg0,8 köpük malzeme plato bölgesi mikroyapısı (%5 HF dağlamada)	77
Resim 5.7. AlSi8Mg0,8 köpük hücre duvarı mikroyapısı; a) Optik mikroskop resmi (%5 HF dağlamada), b) A çerçevesindeki mikroyapı, c) A çerçevesinin element haritasında Si, Mg ve Ti dağılımı.....	78
Resim 5.8. B çerçevesi ile gösterilen alanın SEM görüntüsü	79
Resim 5.9. SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları	80
Resim 5.10. K88121 köpük malzemenin basma testindeki deformasyon süreci; a) %0, b) % 6, c) % 6, d) % 21 ve e) % 25 deformasyon	88
Resim 5.11. K88122 köpük malzemenin basma testi süresince deformasyonu.....	90
Resim 5.12. K88123 köpüğün basma testindeki deformasyon süreci; a) Genel köpük yapısı, b) % 0 deformasyon, c) % 15, d) % 18 ve e) % 20 deformasyon.....	93

Resim	Sayfa
Resim 5.13. K88124 köpüğün basma testindeki deformasyon süreci	95
Resim 5.14. K88125 köpüğün basma testindeki deformasyon süreci; a) % 0, b) % 5, c) % 9, d) % 13 ve e) % 20 deformasyon.	97
Resim 5.15. K88126 köpüğün basma testindeki deformasyon süreci	98
Resim 5.16. K88127 köpüğün basma testindeki deformasyon süreci	99
Resim 5.17. K88128 köpük malzemenin basma testindeki deformasyon süreci; a) % 0, b) % 11, c) %15, d) % 21, e) % 27 ve f) % 40 deformasyon..	101
Resim 5.18. K88121 kodlu numunenin; a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü, b) basma testi sırasında köpük üzerinde meydana gelen şekil değişikliği görüntüsü	108
Resim 5.19. K88122 kodlu numunenin; a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü, b) basma testi sırasında köpük üzerinde meydana gelen çatlağın ilerlemesi ve şekil değişikliği görüntüsü	109
Resim 5.20. K8881 kodlu numunenin; a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü, b) Üretilen köpüğün görüntüsü, c) basma testi sırasında köpük üzerinde meydana gelen deformasyon sonrası görüntüsü.....	110
Resim 5.21. K88124 kodlu numunenin; a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü, b) basma testi sırasında köpük üzerinde meydana gelen deformasyonun görüntüsü.....	110
Resim 5.22. K88125 kodlu numunenin; a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü, b) basma testi sırasında köpük üzerinde meydana gelen deformasyonun görüntüsü.....	111
Resim 5.23. K88126 köpük malzemeye ait; a) fotoelastik görüntüleri, b) basma anındaki çökme ve hücre duvarı kırılma görüntüleri	112
Resim 5.24. K88127 köpük malzemenin; a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü, b) basma testi sürecinde köpük üzerinde meydana gelen deformasyonun görüntüsü.....	113

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
Rpm	rotation per minute (dakikadaki dönüş sayısı)
λ	Elektrik iletkenliği
ε	Gerinim (Şekil değiştirme)
σ	Gerilme
ρ	Yoğunluk
ρ^*	Köpük yoğunluğu
F	Şekil faktörü
E^*	Köpük malzeme elastik modülü
σ_{pl}^*	Plato gerilmesi
Φ	Hücre duvarlarındaki katı oranı
P_0	Atmosferik basınç
D	Pota çapı
d	Ortalama hücre çapı
K	Hücre anizotropi oranı
K_p	İdeal hücre anizotropi oranı
δ	Boyut standart sapması

Kısaltmalar	Açıklama
TM	Toz metalurjisi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	Enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi

Kısaltmalar**Açıklama****XRD**

X- ışını kırınım

ICDD

The International Centre for Diffraction Data

1. GİRİŞ

Köpük malzemeler çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir. Özellikle alüminyum esaslı köpük metaller, patentlerinin ilk alındığı zamanlardan beri uzun yıllar üretim zorlukları ve maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle ticari anlamda üretime geçirilememiştir. Bu malzemeler keşfedildikleri ilk zamanlarda kullanım alanlarının bu denli geniş olacağının tahmin edilmemesi, tekrar üretilebilme yeteneklerinin olmaması sebebiyle göz ardı edilmişlerdir. Ayrıca mekanik özelliklerinin tayinine yönelik yapılması gerekli testlerle ilgili prosedür ve bilgi eksiklikleri, köpük metallerin günümüzde bile halen gizemli malzemeler olması sonucunu doğurmuştur.

Köpük üretimi alüminyum ve alaşımlarıyla sınırlı değildir. Kalay, çinko, princi, kurşun, altın ve diğer bazı metal ve alaşımları, işlem parametreleri ve köpürtücü maddelerle ayrıştırılarak metalik köpük elde edilebilir. Köpürtücü madde olarak TiH_2 ve ZrH_2 gibi metal hidrürlerin yanında karbonatlar (kalsiyum karbonat, potasyum karbonat, sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat), hidratlar (alüminyum sülfat hidrat, alüminyum hidroksit) veya hızlıca buharlaşan maddeler (cıva bileşikleri veya pulverize edilmiş organik maddeler) kullanılabilir.

Alüminyum esaslı metalik köpükler, kapalı hücre yapısı ve çok hafif olması ile göze çarpmaktadır. Alüminyum köpükler, darbe enerjisini plastik enerjiye dönüştürebilir ve birçok metalden daha fazla enerji absorbe edebilir [Hanssen ve ark., 2000]. Köpükler neredeyse sabit gerilme ile büyük deformasyona uğrama yeteneği sahip malzemelerdir [Ruan ve ark., 2002]. Bundan dolayı ses ve enerjinin sönümlenmesinde alüminyum köpükleri fonksiyonel olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanları arasında, hafifliğin ve mukavemetin bir arada bulunması gereken otomotiv, uzay sanayi, demiryolu taşımacılığı ve asansör gibi alanlar bulunmaktadır [Davies ve Zhen, 1983].

Genel olarak metalik bir köpük üç ölçekle karakterize edilmektedir. Hücre duvarındaki mikro etkilerin incelenmesi mikroskobik, hücre ve hücre duvarı morfolojisinin deformasyona ve kırılmaya etkilerinin incelenmesi mezoskopik ve son olarakta, ağırlıklı olarak bulk köpük seviyesinde çökme davranışı ve mekanik özelliklerin incelenmesinde makroskobik ölçekli karakterize edilebilir [Song ve ark., 2008]. Metalik köpüklerin mikro ve mezo yapısı ile ilgilenilmesine rağmen ilgili parametreler analitik modellerle ifade edilmesi zor ve bir kullanımda kontrol edilecek şekilde uygulanamaz olduğuna işaret edilmektedir [Gibson ve Ashby, 1997]. Bu nedenle Gibson ve Ashby ilk çalışmalarında köpüklerin makroskobik yönleriyle ilgilenmişlerdir.

Metalik köpüklerin mekanik özelliklerin belirlenmesinde günümüzde birçok yaklaşım kullanılmaktadır. Akma dayanımı ve elastikiyet modülü bir dizi amprik çalışmalarla hesaplanmaktadır. Bu çalışmalar teorik hesaplamalar ve deney sonuçlarının birleştirilmesiyle ortaya çıkmaktadır.

Gibson ve Ashby'nin (1997) geliştirdiği kübik hücre modeli yaklaşımına göre gözenekli malzemelerin elastik modülleri ve plato gerilmeleri ile yoğunlukları ilişkilendirilmiştir. Köpüğün mekanik özelliklerini belirlemede yoğunluğu ve hücre duvarlarının hacim oranı belirleyici rol oynamaktadır. Literatürde birçok yazar bu yaklaşımı benimsemektedir [Gibson ve Ashby, 1997; Simone ve Gibson, 1998; Andrews ve ark., 1999; Paul ve Ramamurty, 2000; Ruan ve ark., 2002; Kim ve ark., 2003; Kim ve ark., 2006; Mukai ve ark., 2006; Song ve ark., 2008].

Kapalı hücreli alüminyum köpüğün mekanik özellikleri esas olarak hücre yapılarının homojenliğine, büyüklüğüne, dağılımına ve göreceli yoğunluğuna bağlıdır [Papadopoulos ve ark., 2004; Raj ve Daniel, 2008]. Raj ve Daniel (2008) yaptığı çalışmada Gibson'un yaklaşımının eksikleri olduğunu ve hücre duvarı yüzey etkisinin önemsiz olduğunu belirtmişlerdir. Hücrelerin şekil değişimi sırasında hücre duvarları deformasyona uğrayarak bozulur. Hücrenin kenar etkileri, hücre yüzey

etkilerinden daha fazla önemlidir. Bu nedenle, köpüğün mekanik özelliklerini hücre boyutu ve hücre anizotropisi etkilemektedir [Raj ve Daniel, 2008].

Her ne kadar metal köpükler üzerinde yoğun araştırmalar sürse de, hücre yapısının köpük özellikleri üzerindeki etkisi halen açıkça ortaya konulamamıştır. Bunun en önemli nedeni köpük metal üretim parametrelerinin kontrolünün zorluğu ve henüz tam olarak bu kontrolün sağlanamamış olmasıdır. Kapalı hücre Al köpük malzemelerin basma dayanımı ve enerji sönmeme özelliği, araştırmacıların ilgisini hücre şekli, hücre boyutu ve hücre duvarı kalınlığı gibi parametrelere yönlendirmiştir.

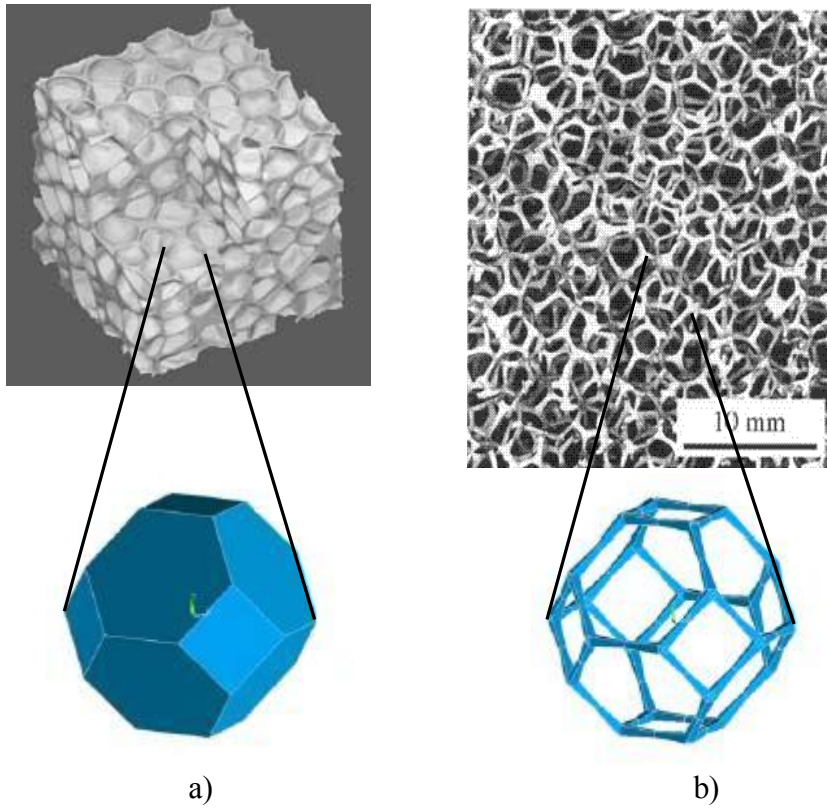
Bu çalışmada, $Al8Si0,8Mg$ kapalı hücre köpük malzemenin toz metalurjisi yöntemiyle üretilmesi hedeflenmiştir. Hücre morfolojisinin mekanik özelliklere etkilerinin mezoskopik, makroskopik ve fotostres yöntemiyle incelenmesi amaçlanmıştır.

2. METALİK KÖPÜKLER

1940 yıllarda metalik köpükler üreilmeye başlanmıştır. Metalik köpükler 1948 yılında Benjamin Sosnick tarafından keşfedilmiştir. Ergimiş alüminyum içinde köpükleştirici olarak civa kullanarak kendi deyimiyle “Sünger Metal”i oluşturmuştur. Bu yıldan sonra 1990 yılına kadar bu metaller üzerine ciddi araştırmalar yapılmamıştır. 1950’den 1970’li yıllara kadar metalik köpük üretebilmek için çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiş ve bu yöntemlerin bazıları patentleşmiştir. Fakat o yıllarda basılı patentler dışında fazla bilimsel yayın çıkartılmamıştır. Daha sonra 1980’li yıllarda bilimsel çalışmaların başlaması, eski üretim tekniklerinin tekrar gözden geçirilmesine ve çok sayıda bilimsel yayının çıkarılmasına neden olmuştur [Banhart, 2006]. Uzun bir aradan sonra bilim dünyası tarafından yeniden gündeme gelen metalik köpükler, iyi enerji absorbe özelliği, yüksek basma dayanımı, düşük özgül ağırlık ve yüksek rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özellikleri ile bilinirler [Seitzberger ve ark., 1997]. Bugünlerde ise bazı üretim yöntemlerinin uygulandığı ve bunların bir kısmının ticarileştirildiği görülmektedir. Geçmişte metalik köpükler üzerine yapılan çalışmalarda, köpürtme işleminin mekanizması yeterince araştırılmamıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda bu durum birtakım sınırlamalara neden olmuştur [Banhart, 2006].

Metalik köpükler şekil itibari ile doğal bir ürün değildir. Aslında “köpük” terimi tam anlamı ifade etmemektedir. Köpükten daha ziyade sünger şeklinde açık gözenekli yapı meydana gelir. Ancak genel olarak “metalik köpük” şeklinde ifade edilir. [Davies ve Zhen, 1983; Banhart, 2006]. Gözenekli yapı şeklini alabilmesi için farklı fonksiyonel malzemeler kullanmak gerekir [Davies ve Zhen, 1983]. Metalik köpükler yapısal olarak sahip oldukları gözenegin; şekline, boyutuna, yoğunluğuna, anizotropik özelliklerine, açıklık ve kapalılık özelliklerine göre karakterize edilirler. Bu bağlamda sahip oldukları gözenegin yapısına bağlı olarak sınıflandırıldığında açık veya kapalı olmak üzere ikiye ayrılır [Ozan, 2008; Yu ve ark., 1998]. Açık hücreli köpük metaller birbiri ile bağlantılı kenarlardan oluşmuş ağlar gibi

düşünülebilir. Böyle bir yapı akışkanların gövdesi boyunca geçişine olanak sağlamaktadır. Kapalı hücreli yapıda belirtilen durum kenarlar boyunca mevcut hücre duvarları nedeniyle mümkün değildir. Hücre duvarları birbirine bitişik boşluk ağları tarafından ortaklaşa da kullanılabilir. Her iki yapının bir arada bulunabildiği malzemeler de mevcuttur [Yu ve ark., 1998]. Şekil 2.1’de açık ve kapalı hücre köpük resimleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Köpük türleri a) Kapalı gözenekli metalik köpük, b) açık gözenekli metalik köpük [Banhart ve Weaire, 2002; Pawlicki ve ark., 2003; Azzì, 2004].

Döküm, toz metalurjisi ve metalik ayrışım olmak üzere birçok metalik köpük üretim yöntemi vardır [Yang ve Nakae, 2000]. Metalik köpükler %70 ile % 90 oranında gözenekli yapıya sahip, gaz ve katı halde bulunan maddelerin bileşimidir ve genellikle düzensiz yapıya sahiptirler. Morfolojik düzensizlikler, hücre elipsliği, homojen olmayan hücre kalınlığı ve hücre boyutu dağılımının mekanik özellikleri

etkilediği tespit edilmiştir [Davies ve Zhen, 1983]. Bu nedenle ergiyik metalin köpürtülmesi sırasında gözeneklerin morfolojisi mutlaka kontrol edilmelidir [Banhart ve Weaire, 2002]. Özellikle homojen dağılımın ve dolayısı ile yeteri kadar gaz kabarcığının oluşturulması gerekir.

Metalik köpüklerin üretiminin birkaç farklı yöntemi vardır. Ancak ergitme ve döküm ile toz metalurjisi en yaygın kullanılan üretim yöntemleridir. Bazı yöntemler belirli adlarla bilinirler. Ergitme yöntemi ile iki şekilde köpük üretilebilir [Seitzberger ve ark., 1997; Yang ve Nakae, 2000]. Dışardan ergiyik içerisine gaz enjekte etmekle ve ergiyik metal içerisinde gaz oluşturacak köpürtücü maddeler ilave edilerek yapılabilir. Diğerleri imalatçı tarafından belirlenen ticari adlarını almıştır. Günümüzde ergiyik içerisine gaz enjekte edilmesi (Cymat), ergiyik içerisine köpürtücü madde ilavesi (Alporas) ve toz metalurjisi (Alulight) yöntemleri başta olmak üzere birçok üretim yöntemi bulunmaktadır [Wadley, 2002].

Metalik köpük üretiminde köpürtücü madde olarak genellikle TiH_2 , ZrH_2 gibi metal hidrürler ve $CaCO_3$ gibi bileşikler kullanılır. Kalsiyum hidrür, kalsiyum-magnezyum karbonat, kalsiyum sülfat, demir sülfat, kurşun karbonat, kurşun oksit ve sodyum nitrit gibi diğer alaşımlar ise bazı sıcaklık ve basınç şartları altında kullanılabilir [Ashby ve ark., 2000; Degischer ve Kriszt, 2002; Yu ve ark., 2008].

2.1. Kapalı Hücre Alüminyum Köpüklerin Üretim Yöntemleri

Kapalı gözenekli alüminyum köpük üretiminin genel olarak dört farklı yöntemi vardır. Ergitme, döküm ve toz metalurjisi en yaygın kullanılan üretim yöntemleridir. Dördüncü yöntem ise diğer iki yöntemin kombinasyonu ile gerçekleştirilmektedir [Raj and Daniel, 2008].

Bazı yöntemler belirli adlarla bilinirler. Diğerleri imalatçı tarafından belirlenen ticari adlarını almıştır. Genel olarak en çok bilinenler [Körner ve Singer, 2000; Montanini, 2005; Wadley, 2002]:

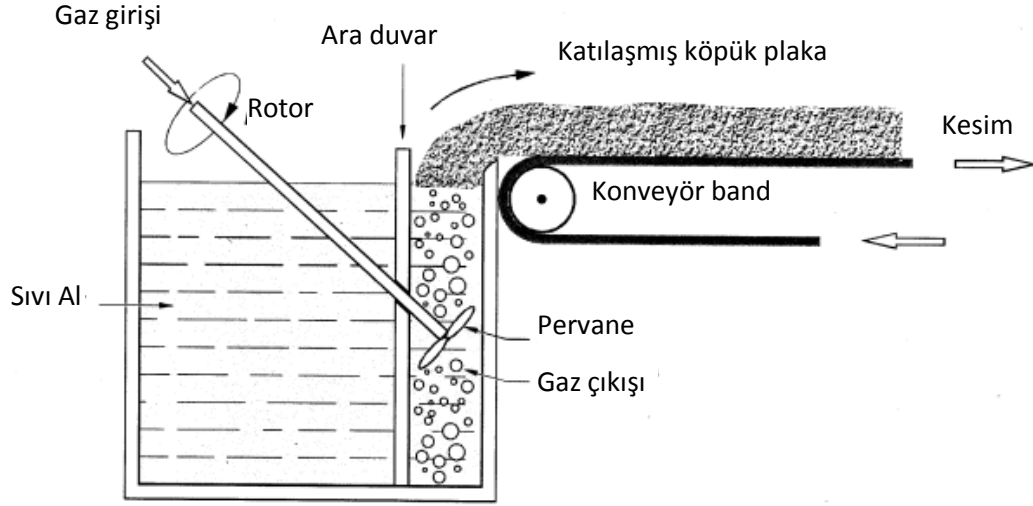
- Ergiyik içerisinde gaz enjektesinde ALCAN, NORSKY-HAYDRO, CYMAT adlandırılmaktadır. Bunlar, erimiş alaşımlı veya alaşımsız Al-SiC veya Al-Al₂O₃ içerisinde gaz verilerek üretilmektedir.
- Ergiyik metal içerisinde köpürtücü madde ilavesi ile üretim yönteminde ALPORAS olarak adlandırılmaktadır. Yöntem sıvı alüminyum alaşımı içerisinde köpürtücü maddenin (genellikle TiH₂) karıştırılarak köpürtücünün ayrışması ile çıkan basınç soğumanın kontrolü ile gerçekleştirilir.
- Toz metalurjisi ile üretim yönteminde IFAM, ALU-FOAM, SCHUNK ve ALULIGHT MEPURA olarak adlandırılmaktadır. Al tozları, alaşım tozları ve toz halindeki köpürtücü madde (TiH₂, ZrH₂ ve CaCO₃) ilave edilerek karıştırılır. Bu karışım kompakt hale getirilerek köpürtme işlemi gerçekleştirilir.

2.1.1. Ergitme yöntemi ile kapalı hücre al köpük üretim yöntemleri

Ergiyik metal içerisinde gaz enjektesi ile kapalı hücre Al köpük üretimi

Bu yöntem, NORSKY-HAYDRO, CYMAT, ALCAN firmaları tarafından güncel bir şekilde kullanılan yöntemdir [Wood, 1997; Montanini, 2005; Sugimura ve ark., 1997] . Bu yöntemde silisyum karbür, alüminyum oksit ya da magnezyum oksit parçacıkları ergiyik viskozitesini artırmak için kullanılır. Üretim ergiyik hazırlandıktan sonra ergiyik içerisinde özel bir pervane veya titreşim nozulu yardımıyla gaz (hava, azot, argon) enjekte edilmesidir (Şekil 2.2). Böylece ergiyik içerisinde homojen olarak dağılmış çok ince gaz baloncukları oluşur. Balonların ve

ergiyik metalin oluşturduğu karışım yukarı doğru yükseldiğinde bir konveyör yardımıyla çekilerek soğumaya bırakılır [Jin ve ark., 1990; Banhart, 2001].



Şekil 2.2. Gaz enjeksiyonla doğrudan köpürtme işlemi [Banhart, 2001].

Deqing ve Ziyuan (2003) gaz enjeksiyon yöntemini kullanarak metal matrisli kompozit üretimi gerçekleştirmiştir. Ürettikleri köpüğün hücre duvarı kalınlığı ve boyutu, SiC ve Al_2O_3 partikül etkisini incelemişlerdir. İlave ettikleri seramik takviyelerin dağılımı ve boyutunun etkisini incelemişlerdir. 660, 670 ve 680 °C sıcaklıkları kullanılarak köpürtme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Ergiyik haldeki Al-Si alaşımı içerisine seramik takviyeler ilave edilerek, bir şaft yardımıyla 1000 rpm hızında ve hava gazı enjekte edilerek üretim gerçekleştirilmiştir. Takviye boyutu ve miktarı arttığında hücre duvarları kalınlığının arttığını tespit etmişler. Köpürtme sıcaklığı arttığında hücre duvarlarının incelmesini, azaldığında ise hücre duvarlarının kalınlığının arttığını gözlemlemişlerdir.

Babcsan ve ark. (2003) te yaptıkları çalışmada duralcan metal matrixli kompozitleri ($AlMg1SiCu/Al_2O_3$, Al-Si döküm alaşımı/SiC) yaklaşık 10 μm veya 20 μm boyutundaki parçacıklarla kompozit alaşımı oluşturarak kullanmışlardır. Oluşturulan

MMK alaşımları Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Bu kompozitlerin spektro analizleri yapılarak içerisinde Cu, Ni, Mn ve Mg alaşımları tespit etmişlerdir.. 700 °C’de ergiyik haldeki metal içerisine oksijen, hava ve nitrojen gazı enjekte edilerek sıvı metal içerisindeki gaz baloncukları oluşturularak köpürtme işlemi yapmışlardır. Daha sonra hava ve su yardımıyla soğutma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada seramik partiküllerin, kompozit türünün ve köpürtme sıcaklığının hücre duvar kalınlığına etkisi ve enjekte edilen gaz türünün köpürmeye etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda matris alaşımının ve köpürtme sıcaklığının hücre duvarı kalınlığını etkilediğini gözlemlemişlerdir. Si ve Mg elementleri hücre duvarı kalınlığını azaltırken, köpürtme sıcaklığının azalmasıyla hücre duvarı kalınlığı arttığını tespit etmişlerdir. Sürekli köpük oluşturabilme işleminde Al_2O_3 takviyesinin SiC ye göre daha kararlı ve iyi olduğunu belirlemişlerdir. Oksijen gazının kullanımında yüzeyde aluşan oksit filmi sayesinde köpük gözenek kararlılığının arttığını bulmuşlardır [Babcsan ve ark., 2003].

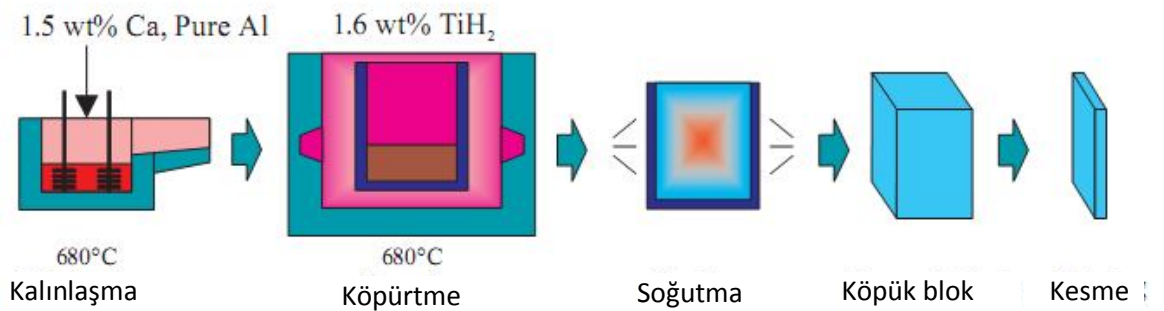
Çizelge 2.1. Üretilen MMK alaşımları [Babcsan ve ark., 2003].

Malzeme tanımı	Si, % ağıl.	Fe, % ağıl.	Cu, % ağıl.	Mn, % ağıl.	Mg, % ağıl.	Ni, % ağıl.	Partikül, % hacim
Al99				0,3			
AlSi10/SiC/20p	10,07	0,97	3,13	0,59	0,39	1,44	SiC, 20
AlSi10/SiC/10p	10,07	0,97	3,13	0,59	0,39	1,44	SiC, 10
AlSi9Mg0,6/SiC/20p	9	0,2			0,6		SiC, 20
AlSi9Mg1,2/SiC/20p	9	0,2			1,2		SiC, 20
AlMg1SiCu/ Al_2O_3 /22p	0,56	0,13	0,23	0,002	1,03	0,001	Al_2O_3 , 22
AlMg1SiCu/ Al_2O_3 /10p	0,40-0,8	0,7 maks.	0,30	0,004	0,740		Al_2O_3 , 10
AlMg1SiCu/ Al_2O_3 /6,8p	0,40-0,8	0,7 maks.	0,15-0,40	0,15 maks.	0,8-1,2		Al_2O_3 , 6,8
AlMg1SiCu/ Al_2O_3 /5,2p	0,40-0,8	0,7 maks.	0,15-0,40	0,15 maks.	0,8-1,2		Al_2O_3 , 5,2
AlSi2/ Al_2O_3 /10p	2	0,7 maks.	0,31	0,005	0,697	0,03	Al_2O_3 , 10
AlSi5/ Al_2O_3 /10p	5	0,7 maks.	0,27	0,008	0,680	0,03	Al_2O_3 , 9,5
AlSi10/ Al_2O_3 /10p	10	0,7 maks.	0,28	0,032	0,644	0,04	Al_2O_3 , 9
AlSi10Cu3/ Al_2O_3 /10p	10	0,7 maks.	2,57	0,031	0,537	0,04	Al_2O_3 , 9
AlSi10Cu3Ni1,5/ Al_2O_3 /10p	10	0,7 maks.	2,71	0,033	0,506	0,68	Al_2O_3 , 9
AlSi10Cu3Ni1,5Mg3/ Al_2O_3 /10p	10	0,7 maks.	2,03	0,035	3,249	0,73	Al_2O_3 , 9
AlSi10/SiC+ Al_2O_3 /10p+0,5p	10,07	0,97	3,13	0,59	0,39	1,44	SiC, 10; Al_2O_3 , 0,5

Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilave edilerek köpük üretimi

Bu yöntem, ALPORAS firması tarafından güncel bir şekilde kullanılan yöntemdir [Alporas, 2012]. Aynı zamanda yöntem firmanın adıyla özleşmiştir. Japonya’da Shinko Wire Company şirketi 1986 yılından beri bu yöntemi kullanmakta ve günde 1000 kg üzerinde üretim yapmaktadır.

Yapılan çoğu çalışmalarda bu yöntem kullanılmıştır [Sugimura ve ark., 1997; Miyoshi ve ark.,2000; Andrews ve ark., 2001; Markaki ve Clyne, 2001; Aly, 2007]. Ergiyik içerisine köpürtücü madde ilave edilerek metal köpük üretimi, gaz enjekte edilerek yapılan üretime alternatif olarak geliştirilmiş bir yöntemdir [Miyoshi ve ark., 2000- Babcsan ve ark., 2005]. Bu yöntemde, ergiyik içerisine gaz enjekte etmek yerine direkt olarak TiH_2 , ZrH_2 ve $CaCO_3$ gibi köpürtücü madde ilave edilerek köpürtme yapılır [Shapovalov, 1993]. Köpürtücü madde etkili sıcaklıkta çözünerek gaz açığa çıkarmakta ve köpük oluşumunu sağlamaktadır. Şekil 2.3’de ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile metalik köpük üretimi şematik olarak gösterilmiştir [Shapovalov, 1993; Song, 1998].



Şekil 2.3. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme [Miyoshi ve ark., 2000].

Bu üretim yöntemi iki aşamadan meydana gelir. İlk aşamada köpürtülecek metal veya alaşım atmosfer ortamında ve 680 °C sıcaklıkta ergiyik hale getirilir. Bu esnada viskoziteyi ayarlamak için %1.5 Ca ilave edilir. Viskoziteyi ayarlamak için ayrıyeten içerisine Ca ile birlikte Mg ilavesi ve havanın oksijeninden yararlanılarak, Al_2O_3 ,

MgO, kalsiyum-alüminyum oksit (CaAl_2O_3) veya kalsiyum oksit (CaO) ergiyik içerisine oluşması sağlanabilir. Daha sonra bu viskozitesi uygun hale gelene kadar belirli bir hızda ve belli bir süre karıştırılır [Miyoshi ve ark., 2000]. İkinci aşamada ise viskozite istenilen değere ulaştığında ergiyik içerisine, köpürmeyi sağlamak üzere parçacık şeklindeki köpürtücü madde (TiH_2 , CaCO_3) ilave edilir. İlave edilen TiH_2 ve CaCO_3 ayrışarak H_2 ve CO_2 gazı açığa çıkarır. Açığa çıkan gaz sıvı durumdaki malzemenin içerisinde baloncuklar oluşturarak köpürmeye neden olur ve daha sonra soğutulur [Babcsan ve ark., 2005].

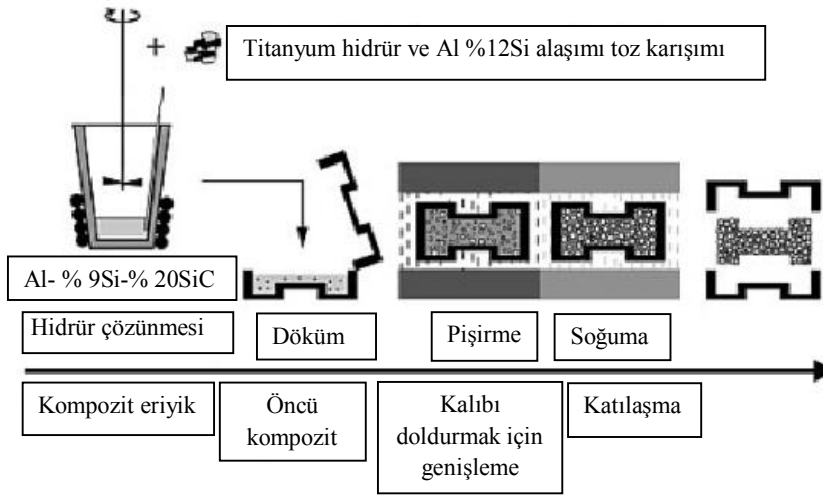
Markaki ve Clyne, (2001) yaptıkları çalışmada Alporas yöntemini kullanarak üretim gerçekleştirmişlerdir. Alporas yöntemi kullanarak ürettikleri köpük içerisinde ergimiş Al içerisine viskoziteyi arttırmak için ergimiş madde ağırlığının % 5 Ca ilave etmişlerdir. İçerisine % 1,6 TiH_2 köpürtücü madde ilave ederek köpürtme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Heterojen bir hücre morfolojisi gözlemişlerdir. Ortalama hücre boyutu 2,2 mm iken ortalama hücre duvarı kalınlığı 151 μm olarak bulmuşlardır. Hücre duvarları mikroyapısında Al dendritleri, Al-Ca-Ti ötektik bölgeleri ve Al-Ca-Ti-Fe parçacıkları olduğunu gözlemişlerdir [Markaki ve Clyne, 2001].

Homojen bir kapalı gözenek köpük yapı elde etmek için üretim parametrelerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bunun için ergiyik metalin sıcaklığının sabit tutulması, viskozitenin ayarlanması ve TiH_2 parçacıklarının homojen olarak dağıtılması gerekmektedir [Srivastava, 2007]. Böylelikle hücre duvarlarında da ince bir oksit tabakası oluşturularak gözeneklerin kararlılığı artırılır [Babcsan ve ark., 2003]. Ancak Al_2O_3 parçacıklarının eriyik metal içerisinde yeterince ıslanmaması hücre duvarlarında kararsızlığa neden olmaktadır. Bu gibi durumlarda içerisine yüksek reaktif elementler ilave ederek ıslanabilirlik problemleri arttırılabilir. Örneğin, Mg gibi yüksek reaktif elementler ergiyik metal içerisine ilave edilerek Al_2O_3 parçacıklarının ıslanabilirliği ve köpük yapının kararlılığı artırılmaktadır [Asavavisithchai, 2006].

2.1.2. Öncü gaz salınımı ile takviyelendirilmiş metalik köpük üretimi (FORMGRIP)

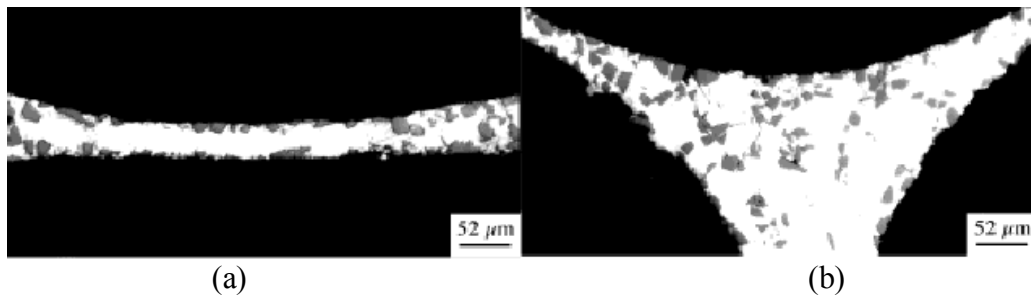
Bu yöntem, toz metalurjisi ve ergitme yöntemlerinin beraber kullanılmasıyla uygulanmaktadır. Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor kelimelerinin baş harfleri kullanılarak adlandırılmıştır. İlk aşamada TiH_2 tozları atmosfer ortamında ısıtılma işlemine tabi tutulmaktadır. Böylece yüzeyde titanyum oksit bir film tabakası oluşumu sağlanır ve bu tabaka çözünmeyi geciktirici bir bariyer rolü oynar. Daha sonra ısıtılma işlemine tabii tutulmuş köpürtücü tozları, Al esaslı alaşım tozlarıyla ağırlıkça 1/4 oranında karıştırılır (Şekil 2.4). Ardından karışım tozlar yaklaşık $620^{\circ}C$ 'da ergiyik hale getirilmiş ve yavaş yavaş soğutulmuş Al esaslı kompozit alaşımının içerisine ilave edilir. Bu işlem sırasında parçacıkların ergiyik içerisinde homojen dağılımını sağlamak için yeteri kadar hızla dönen konvansiyonel bir mekanik karıştırıcı kullanılır. İkinci aşamada ise karışım titanyum hidrürün hidrojen gazı salıp çözünmesi için ısıtılma işlemi uygulanarak köpükler elde edilebilir [Gergely ve Clyne, 2000; Gergely ve ark., 2003].

Gergely ve Clyne, (2000) yaptıkları çalışmayla Formgrip yöntemini ilk deneyen bilim adamlarındandır. Yaptıkları çalışmada, işlemin ilk aşamasında TiH_2 ($\sim 30 \mu m$) tozları atmosfer ortamında $400^{\circ}C$ / 24 saat + $500^{\circ}C$ / 1 saat ısıtılma işlemine tabi tutmuşlardır. Daha sonra ısıtılma işlemine tabii tutulmuş TiH_2 tozları, Al-%12Si ($\sim 150 \mu m$) tozları ile ağırlıkça 1/4 oranında karıştırmışlardır (Şekil 2.4). Hemen akabinde karışım tozları yaklaşık $620^{\circ}C$ 'da ergiyik hale getirilmiş ve yavaş yavaş soğutulmuş Al-%9Si/ SiC_p kompozit içerisine ilave etmişlerdir. Bu işlem sırasında parçacıkların ergiyik içerisinde homojen dağılımını sağlamak için 1200 rpm hızla dönen konvansiyonel bir mekanik karıştırıcı ile karıştırmışlardır.



Şekil 2.4. FORMGRIP yönteminin şematik gösterimi [Gergely ve Clyne, 2000].

Gergely ve Clyne, (2000) FORMGRIP yöntemi ile sıvı ergimiş kompozit viskozitesi ve fırınlama sıcaklıkları ve köpürtücü davranışı gibi parametreler kullanılarak kolaylaşabileceği sonucuna varmışlardır. Partiküllerin dağılımı veya bir araya gelmesi ergimiş kompozitin viskozitesini arttırırken aynı zamanda plato sınırlarının ve hücre duvarlarının yüzey viskozitesini artırdığını tespit etmişlerdir. Bu durum drenaj etkisini azaltarak, partiküllerin önemli bir bölümünün gaz/ergiyik ara yüzeyinde yer almalarına neden olduğunu bulmuşlardır (Resim 2.1) [Gergely ve Clyne, 2000]. SiC parçacıklarının hücre duvarları içerisine yerleşerek köpüğün dayanımını, lineer genişleme oranını ve ergiyik metalin viskozitesini artırdığı bilinmektedir [Esmaeelzadeh ve Simchi, 2007].

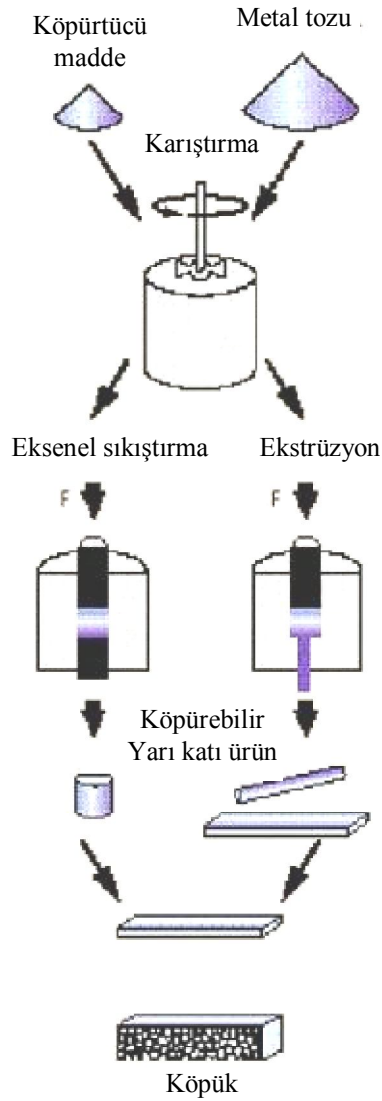


Resim 2.1. FORMGRIP yöntemi ile üretilmiş Al-9Si alaşımlı köpükte SiC parçacıklarının hücre duvarındaki dağılımı [Gergely ve Clyne, 2000]; a) hücre duvarları, b) plato sınırları.

2.1.3. Toz metalurjisi yöntemi ile kapalı hücre Al köpük üretimi

Bu yöntem Pahsak tarafından ergitme olmaksızın üretilecek hafif ve rijit malzemeler için düşünülmüştür [Pahsak, 1960]. Daha sonra 1963’de Allen tarafından kullanılmış ve patenti alınmıştır [Allen ve ark., 1963]. Toz parçacıktan üretimi gerçekleştirildiği için bu işlem “Toz Metalurjisi Yöntemi” olarak adlandırılmıştır. Almanya’da Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü (IFAM) tarafından geliştirilmiştir. IFAM’da metalik köpükler, önceden hazırlanmış metal tozlarından üretilmektedir [Banhart ve Baumeister, 1998; Ashby ve ark., 2000; Guden ve Yuksel, 2006; Peroni ve ark., 2008; Çinici, 2004].

Toz metalurjisi yöntemi (TM) ile üretim ilk önce metal-alaşım (genellikle alüminyum) ve köpürtücü madde tozlarının (genellikle TiH_2 veya ZrH_2) karıştırılmasıyla başlar (Şekil 2.5). Metal toz ve köpürtücü madde karışımı oda sıcaklığında veya sıcak olarak kalıp içerisinde preslenir [Matijasevic ve Banhart, 2006; Esmaeelzadeh ve ark., 2006; Guden ve Yuksel, 2006; Kim ve ark., 2008]. Daha sonra karışım ekstrüze edilerek veya preslenerek yarı mamul ürün haline getirilir ve belli bir sıcaklıkta haddelenir [Körner ve Singer, 2000; Yu ve ark., 1998; Banhart, 2000; Kim ve ark., 2003; Koza ve ark., 2003; Kennedy, 2004; Babcsan ve ark., 2005; Asavavisithchai ve Kennedy, 2006; Shiomi ve ark., 2010]. Böylece homojen olarak dağılmış köpürtücü madde, metal matris içerisine hapsolür. İkinci aşamada numune matris malzemenin ergime noktasına yakın bir sıcaklığa ısıtılır. Metal matris içerisinde homojen dağılımlı köpürtücü madde ergiyik içerisinde reaksiyona girerek ayrışır ve sonuçta gaz çıkışı meydana gelir. Bu gaz çıkışı ergiyik metalin genişlemesine (köpürmesine) ve oldukça gözenekli bir şekle dönüşmesine sebep olur [Yu ve ark., 1998; Banhart, 2000; Schaeffler ve ark., 2005].



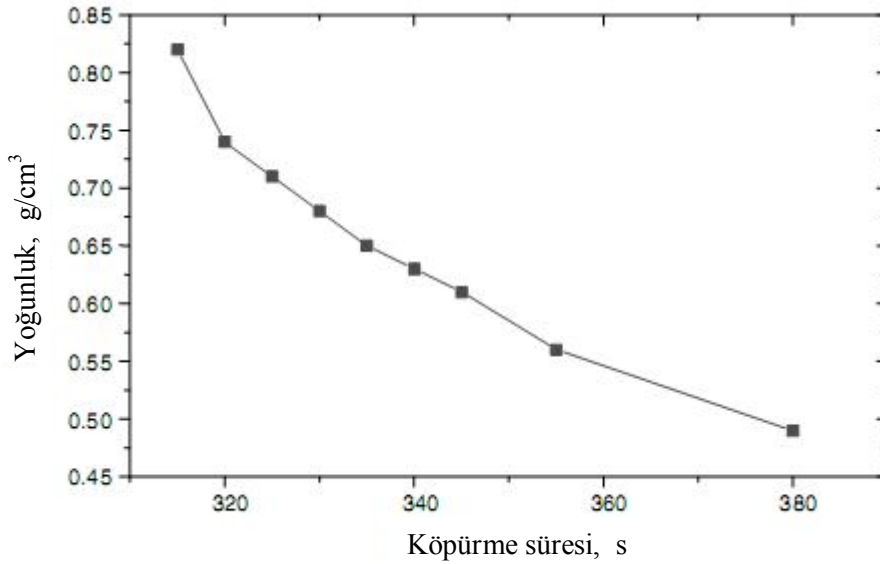
Şekil 2.5. Toz metalurjisi yönteminin üretim aşamaları [Amjad, 2001].

Homojenliği sağlamak için önceden belirlenen tozlar karıştırılır. Karıştırılan tozlar kalıp içerisine konularak preslenir. Eğer karıştırma yapılmadan, presleme işlemi bir kalıp içerisinde yapılırsa toz karışımı kısmen veya tamamen, içerisinde köpürtücü olmayan metal tozlarıyla çevrelenecektir. Köpürtmeden sonra bu köpükler yoğun veya daha az gözenekli bir içyapıya sahip olacaktır.

Köpürtme işlemi, belli bir sıcaklıkta ve belli bir süre sonra kesilirse, belli bir yoğunluk elde edilir. Köpürtme işlemine devam edilirse çökmelerden dolayı daha

düşük yoğunluk elde edilir. Bu nedenle yarı mamul parçaların tam genişlemesi için gerekli olan zaman, köpürtme sıcaklığına ve numunenin boyutuna bağlı olup birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişir [Yang ve Nakae, 2000].

Kennedy, (2004) yaptığı çalışmada Al esaslı köpükleri TM yöntemiyle üretilen basma testlerini gerçekleştirmiştir. Al tozları ile % 0,6 TiH₂ tozlarını karıştırarak 650 MPa basıncında preslemiştir. Silindirik kalıplar içerisinde köpürtme işlemini gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışmada köpürtme süresinin artmasıyla yoğunluğun azaldığını Şekil 2.6'da göstermiştir [Kennedy, 2004]. Lineer genişleme arttıkça yoğunluğu azaltır.

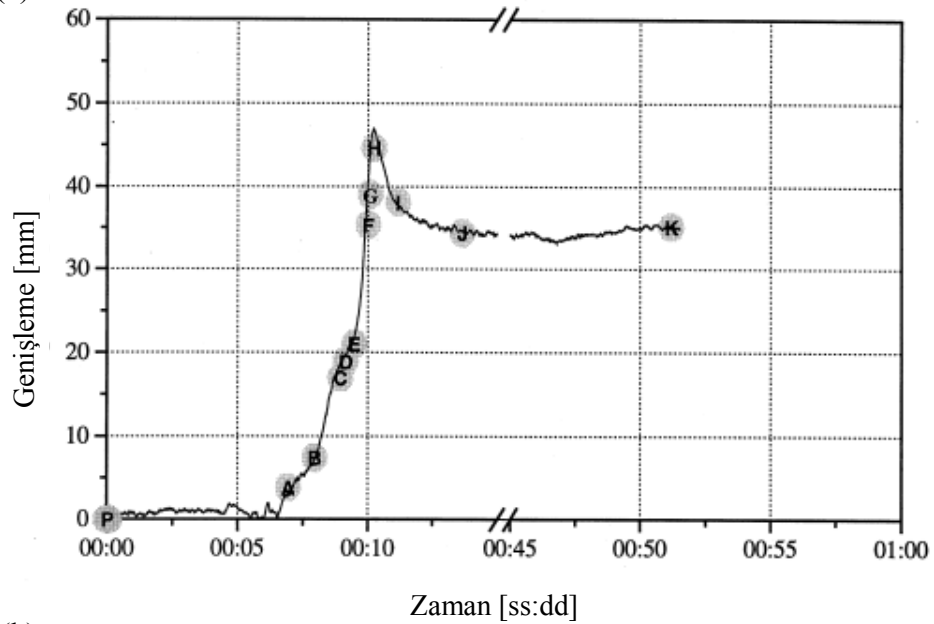


Şekil 2.6. Köpürtme süresinin yoğunluğa etkisi [Kennedy, 2004].

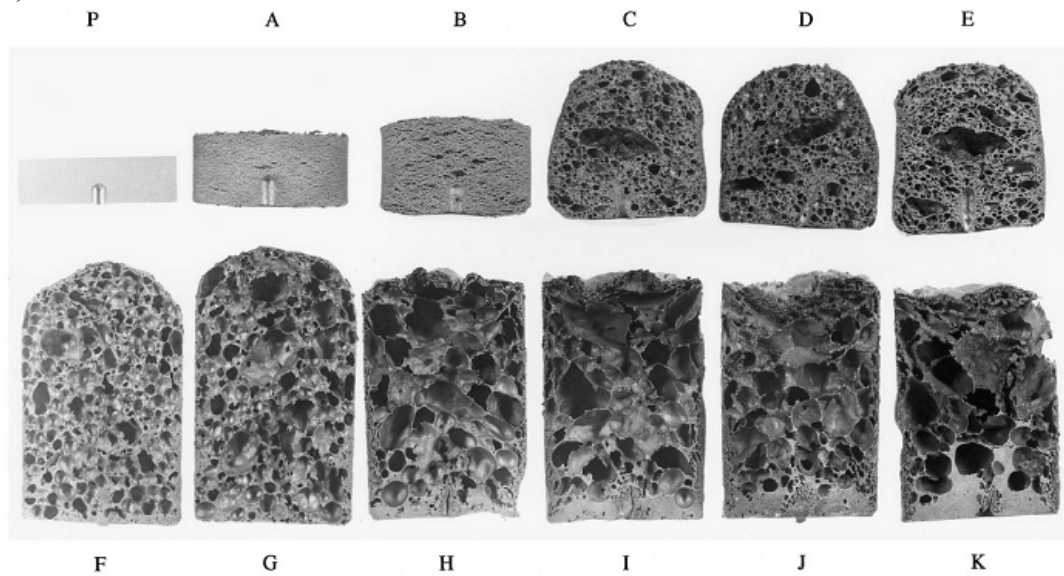
Diğer bir çalışmada ise; Duarte ve Banhart, (2000), köpürtme süresinin ve alaşım elementinin uzamaya etkisini göstermişlerdir. Al 6061 (%0.4-0.8 Si, % 0.8-1.2 Mg, <% 0.7 Fe) alaşım tozu ve AlSi7 döküm alaşımının içerisinde % 0,6 TiH₂ ilave ederek karıştırmış ve preslemişlerdir. Sıcak ekstrüzyon ile ön şekillendirmesini yapmışlardır. Köpürme sırasında genişlemeyi ölçebilmek için “Expandometer (Genişleme Ölçer)” cihazı kullanmışlardır. Her iki alaşım köpüklerinin köpürme süresi arttıkça ilk önce maksimum noktaya kadar genişlemenin arttığını, o süreden

sonra devam eden köpürme sırasında çökmelerin başlayarak genişlemeyi düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Al 6061 köpüğünün AlSi7 köpüğüne göre daha az genişleme gösterdiğini belirtmişlerdir. Çökmeler her iki alaşım köpükte de farklı gerçekleşmiştir (Şekil.2.7b- Şekil 2.8b). Al 6061 alaşımında çökmeler hem alt kısımda hem de üst kısımda gerçekleşirken, AlSi7 alaşımında köpüğün üst kısımlarında gerçekleşmekte olduğunu tespit etmişlerdir.

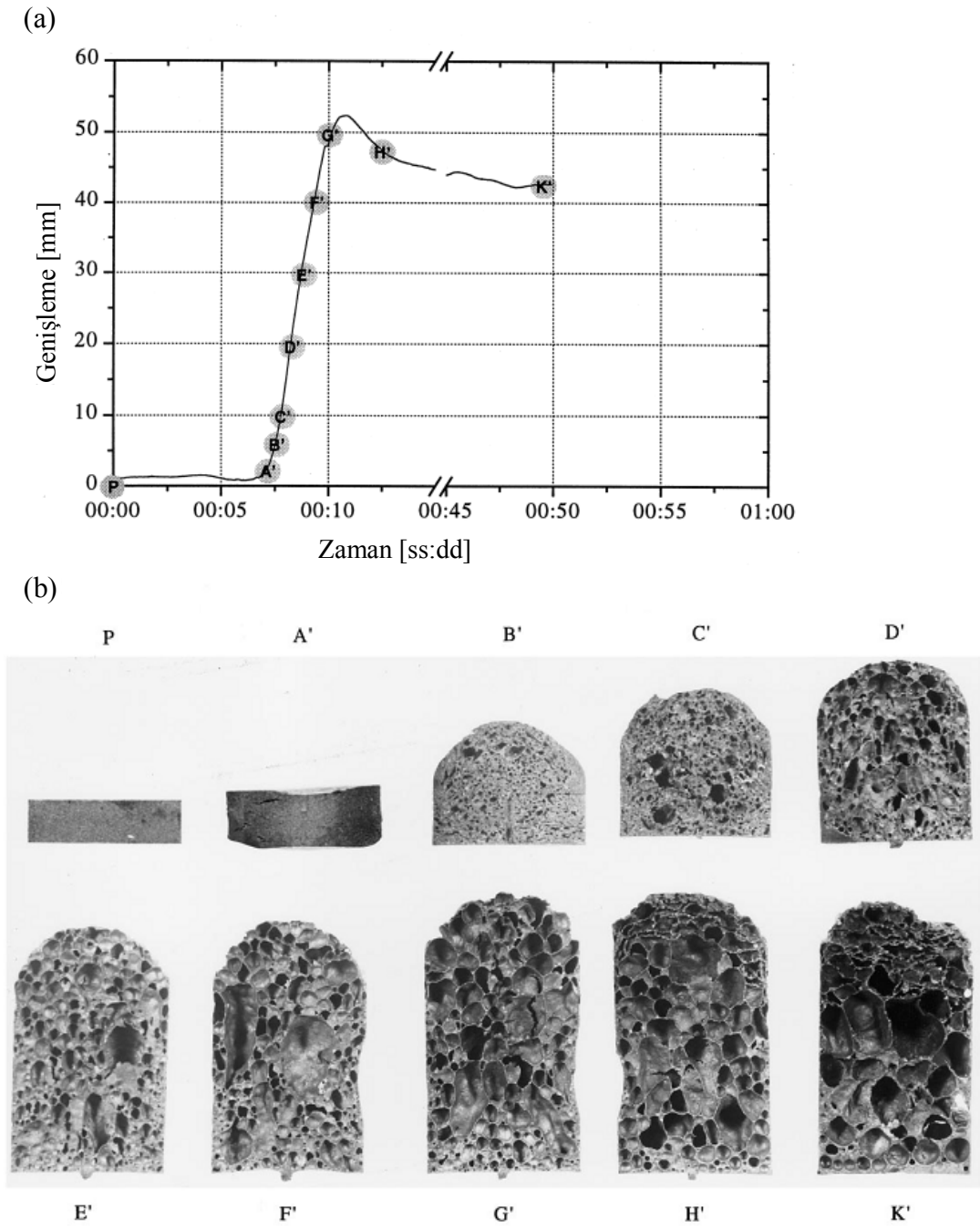
(a)



(b)



Şekil. 2.7. Al 6061 köpüğünün a) zamana bağlı genişleme grafiği; b) 800 °C’de farklı sürelerde üretilen köpük resmi.

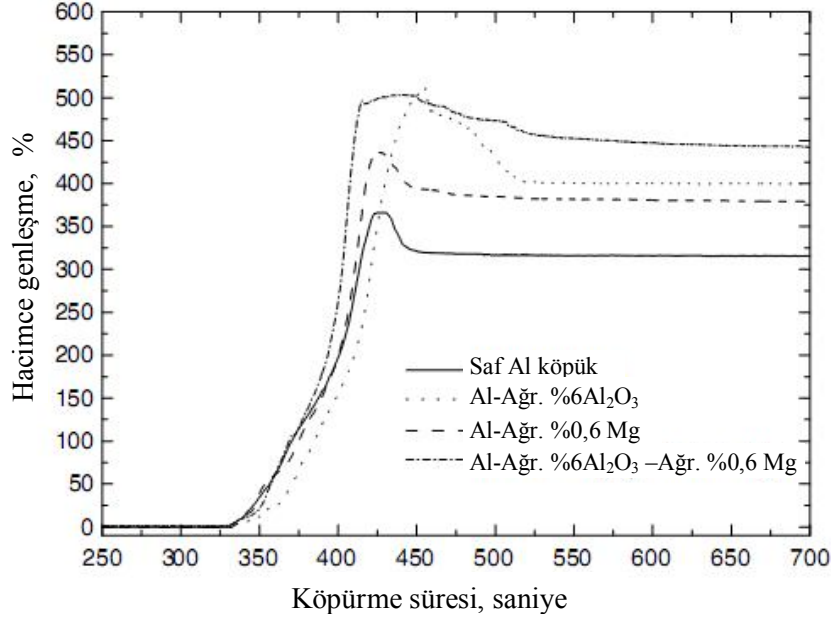


Şekil. 2.8. AlSi7 köpüğünün; a) zamana bağlı genişleme grafiği; b) 750 °C'de farklı sürelerde üretilen köpük resmi.

Al esaslı köpük malzemelerin TM ile üretiminde alaşım elementleri ve seramik takviye ilavesi de mümkündür. Kapalı hücre köpük malzemelerin köpürme kararlılığı gaz baloncukların dağılımıyla ince hücre duvarlarının yırtılması ve duvarların

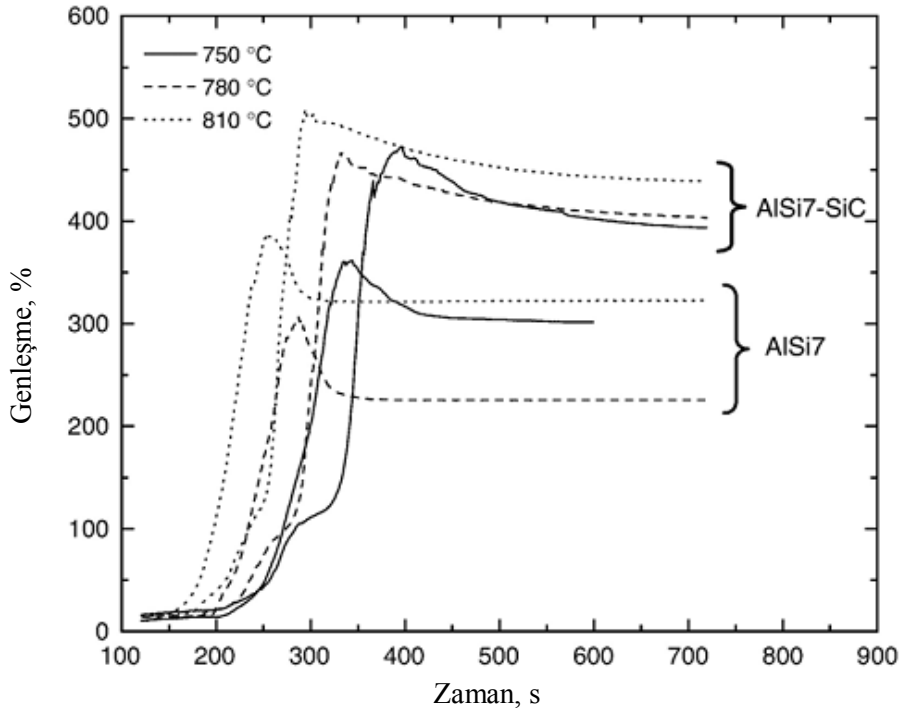
drenajına önemli ölçüde bağlıdır. Takviye ilavesiyle de yırtılma ve direnç durumları köpüğün kararlılığını artırır veya azaltabilir. Burada önemli olan sıvı fazın takviyeyi ıslatmasıdır. Islatabilirlik sıvı ve katı arayüzeyin birbirine birleşme eğilimi ve temas açılmasına bağlıdır. Al içerisine ilave edilen SiC partiküller köpük kararlılığını artırırken, partikül boyutunun artması azaltmaktadır [Ip ve ark., 1999].

Asavavisithcai ve Kennedy, (2006) yaptıkları çalışmada, TM yöntemiyle üretilen Al- Al_2O_3 kompozit köpüğe Mg ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Al tozu ile birlikte % 0,6 Mg, % 6 Al_2O_3 ve % 0,6 TiH_2 tozlarını karıştırarak preslemiştir. Dört farklı köpük (Al, Al- % 0,6 Mg, Al- % 6 Al_2O_3 ve Al- % 0,6 Mg- % 6 Al_2O_3) üretimi gerçekleştirmişlerdir. Saf Al içerisine Mg ilavesi lineer genleşme miktarını artırdığını tespit etmişlerdir. Saf Al köpüğün alaşım ve kompozit köpüğe göre hacimsel uzama miktarı daha düşük seviyede olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 2.9). Al- Al_2O_3 içerisine Mg ilavesi ile metal ve seramik takviye arayüzeyindeki ıslatabilirliği artırdığını belirtmişlerdir. Bu durumda Al seramik partikülleri ıslatırsa viskoziteyi artıracağından sıvı malzemenin drenajını azaltarak köpürmeye katkı sağladığını beyan etmişlerdir. Bunun yanı sıra kompozit malzemenin içerisine Mg ilavesi hacimsel uzama miktarını artırdığını fakat köpürme süresini azalttığını tespit etmişlerdir. [Asavavisithcai ve Kennedy, 2006].



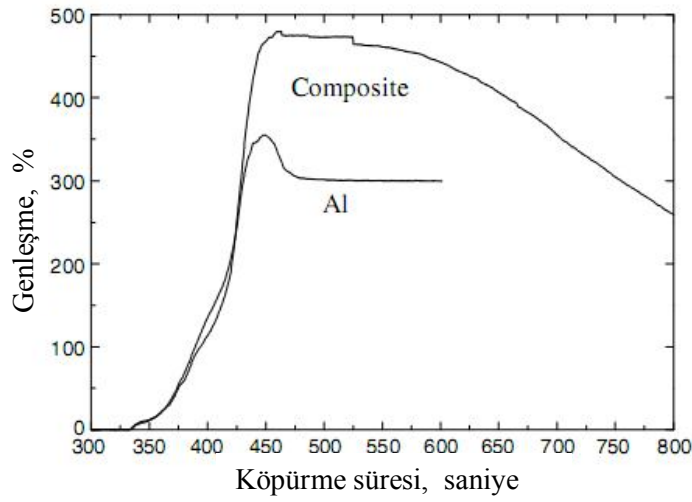
Şekil 2.9. Al köpüğün uzamasına Mg ve Al₂O₃ ilavesinin etkisi [Asavavisithcai ve Kennedy, 2006].

Benzer çalışma, Esmaeelzadeh ve Simchi, (2007) tarafından yapılmıştır. Yapılan çalışmada AlSi7, % 3 SiC ve % 0,5 TiH₂ tozları karıştırmış ve sıcak preslemişlerdir. Üç farklı sıcaklıkta köpürtme işlemi uygulamışlardır. Köpürebilirlik ve basma dayanımı özellikleri araştırmışlardır. Şekil 2.10'da AlSi7 ve AlSi7/SiC köpüklerin lineer genleşme- zaman grafiğini oluşturmuşlardır. SiC takviyesi köpürme genleşmesini artırmıştır. Bunun sebebi eğer Al seramik partikülleri ısıtırsa viskozite artar. Böylece sıvı malzemenin drenajını azaltarak köpürmeye katkı sağladığını beyan etmişlerdir. Köpük hücre yapısı düzensiz büyük hücrelerden oluşmasının yanında SiC parçacıkları hücre duvarları sınırlarında toplanmış olduğunu gözlemlemişlerdir [Esmaeelzadeh ve Simchi, 2007].

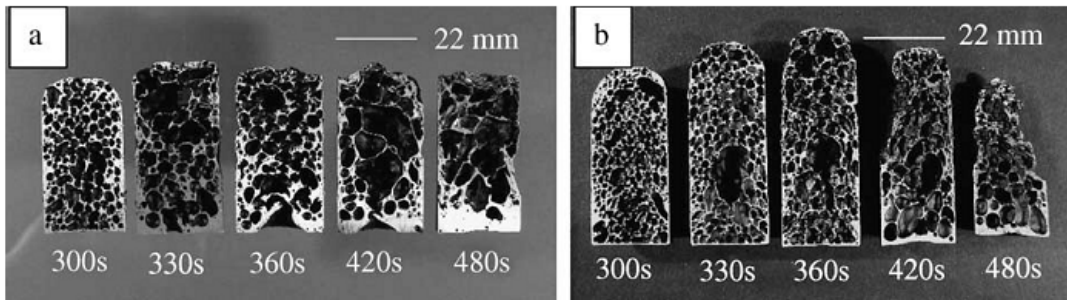


Şekil 2.10. AlSi7 ve AlSi7- SiC alaşımlarının farklı köpürtme sıcaklıklarındaki genleşme- zaman grafiği [Esmaeelzadeh ve Simchi, 2007].

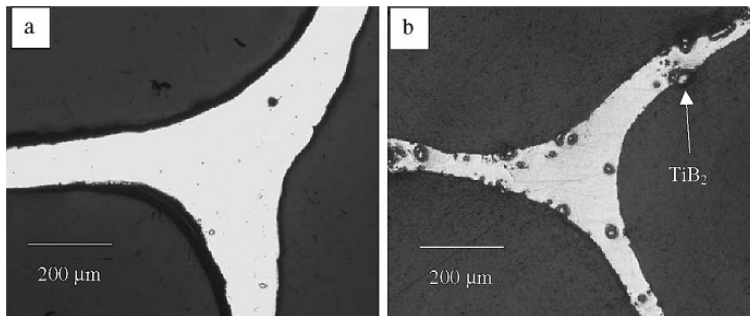
Birçok araştırmacı Al esaslı seramik takviyeli kompozit köpük üretmeyi başarmıştır. Kennedy ve Asavavisitchai, (2004) yaptıkları çalışmada, TiB_2 takviyesinin, Al köpüğün mekanik özelliğine, hücre yapısına ve genleşmeye etkisini araştırmışlardır. Al, % 6 TiB_2 ve % 0,6 TiH_2 tozları karıştırarak oda sıcaklığında kalıpta preslemişlerdir. Expandometer aracılığıyla köpürme genleşmesi ölçülmüştür. Al içerisine TiB_2 ilavesinin köpük genleşme miktarı saf Al köpüğe göre arttığını göstermişlerdir (Şekil 2.11). İçerisine TiB_2 takviyesi ilavesi ile sıvı faz miktarının azaldığını ve bununla birlikte genleşmenin arttığını belirlemişlerdir. Kompozit köpüğün uzun süre kararlı olamamasını Al'nin TiB_2 ıslatmasının iyi olmamasına bağlamışlardır (Resim 2.2). Hücre duvarlarının kalınlığı takviye ilavesi ile azaldığını belirlemişlerdir (Resim 2.3) [Kennedy ve Asavavisitchai, 2004].



Şekil 2.11. Al ve Al-TiB₂ köpüklerinin köpürtme zamanına bağlı genleşmesi [Kennedy ve Asavavisitchai, 2004].

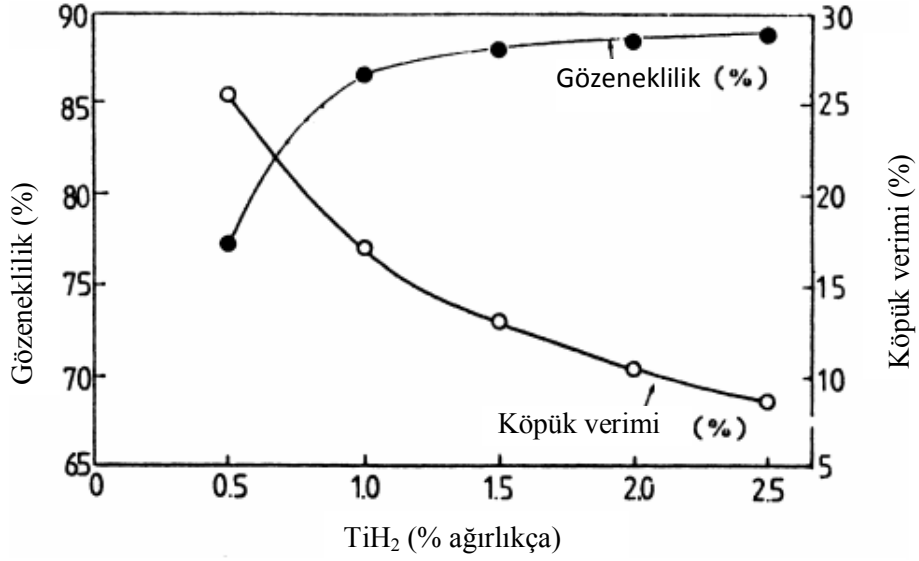


Resim 2.2. a) Al köpüğün, b) Al-TiB₂ köpüğün farklı sürelerdeki köpük resimleri [Kennedy ve Asavavisitchai, 2004].



Resim 2.3. a) Al köpüğün, b) Al-TiB₂ köpüğün hücre duvarı resimleri [Kennedy ve Asavavisitchai, 2004].

Al ve alaşımlarının köpürtülmesinde kullanılan köpürtücü madde miktarının ağırlıkça % 0,5-2,5 gibi düşük olduğu bulunmuştur [Wood, 1997; Yang ve Nakae, 2000]. Şekil 2.12’de gösterildiği gibi TiH_2 miktarı arttıkça köpürebilirlik azalırken buna bağlı olarak gözenek miktarı azalacaktır [Yang ve Nakae, 2000; Türker, 2009; Gökmen ve ark., 2008].



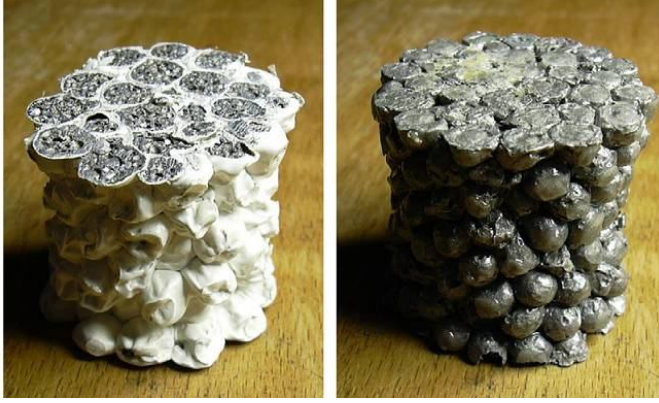
Şekil 2.12. TiH_2 ilavesinin Al köpüklerdeki gözenek oluşumu ile ilişkisi [Yang ve Nakae, 2000].

Uzun, (2009) yaptığı çalışmada, TM yöntemiyle Al alaşımlı küresel şekilli köpük üretimi gerçekleştirmiştir. İçerisinde %0,5 ve %0,75 TiH_2 bulunan numunelerde gözeneklerin homojen dağılımlı ve küresele yakın düzgün geometrik şekillerde olduğunu belirtmiştir. %1 TiH_2 içeren numunelerde ise daha düzensiz bir yapının meydana geldiği, %1,5 TiH_2 içeren numunelerde gözeneklerin birleşmesi neticesinde daha iri yapıların oluştuğunu gözlemlemiştir [Uzun, 2009]. Türker ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada benzer durumu gözlemişlerdir [Türker ve ark., 2011].

2.1.4. İleri gözenek morfolojisi (APM) tekniği ile kapalı hücre köpük üretimi

İleri gözeneklilik morfolojisi tekniği Almanya’da IFAM tarafından geliştirilmiş yeni bir köpük üretim yöntemidir [Srivastava ve Shoo, 2007; Stöbener ve ark., 2008]. Bu

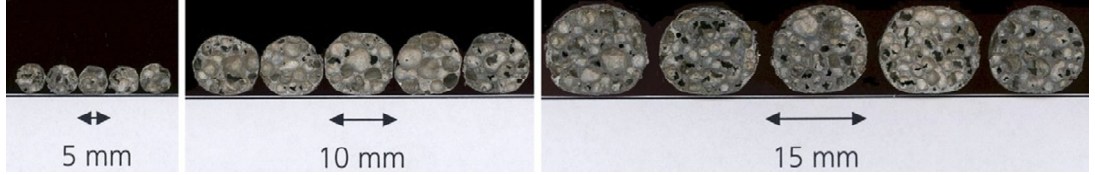
yöntem, iki temel işlemin birbirinden ayrılmasını esas alır. Bu iki temel işlem köpüğün üretilmesi ve üretilen köpük parçaların şekillendirilmesi olarak bilinir. Her bir APM işlemi küçük hacimli standart şekilli Al köpükleri temsil eder [Stöbener ve ark., 2008]. Böylelikle APM köpük parçaların IFAM ve diğer ticari firmalar tarafından tüketicilere ulaştırılması, maliyet ve iş gücü açısından tüketiciler için belirgin bir tasarruf sağlamaktadır. Bu standart şekilli parçalar normal bir yapıştırma tekniği ile bile birbirine birleştirilebilmektedir (Resim 2.4) [Srivastava ve Shoo, 2007; Stöbener ve ark., 2008; Stöbener ve ark., 2005].



Resim 2.4. Üretilen küresel şekilli köpüğün birbiri ile yapıştırılması [Stöbener ve ark., 2008].

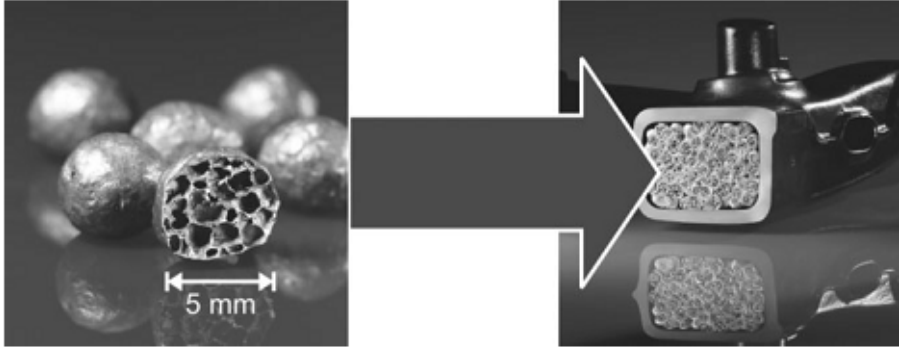
Üretimin ilk aşamasında klasik toz metalurjisi yönteminde olduğu gibi metal tozları ile köpürtücü madde tozları belirli oranlarda karıştırılır. Daha sonra karışım tozlar, yarı mamul ürün elde etmek için sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi ekstrüzyon, sıcak presleme veya haddeleme gibi farklı teknikler kullanılarak yapılabilir [Baumgardner ve ark., 2000; Degischer ve Kriszt, 2002]. Daha sonra elde edilen yarı mamul numuneler, küçük hacimlerde kesilerek fırın içerisinden geçen düz bir ızgara zemin üzerinde yerleştirilir. Ardından ergime derecesine yakın bir sıcaklıkta herhangi şekillendirme kalıbına ihtiyaç duyulmadan köpürtme işlemine tabi tutulur. Bu esnada yüzey gerilmesi, ergiyik hale gelen köpüğün küresel şekli almasına neden olur. Fakat bu parçaların geometrisi istenilen küresellikte değildir. Çünkü yerçekimi kuvveti, ergiyik halde bulunan alüminyum köpüğün deformasyonuna neden olmaktadır

[Stöbener ve ark., 2008]. Resim 2.5'te oval biçimdeki numunelerin kesiti gösterilmektedir. Köpük parçacıklarının ortalama çapı 5 mm ile 15 mm arasında değişmektedir [Stöbener ve ark., 2008]..



Resim 2.5. Farklı boyutlardaki küresel alüminyum köpüklerin kesitleri [Stöbener ve ark., 2008].

Üretilen küresel şekilli parçalar kullanılacak yerine göre yapıştırma işlemine tabi tutulur veya yerleştirilir (Resim 2.6).



Resim 2.6. Üretilen küresel şekilli köpüğün kullanılacak parçanın içerisine yerleştirilmesi [Stöbener ve ark., 2008].

2.2. Kapalı Hücre Alüminyum Köpük Metallerin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Metalik köpük yapılar polimerik olanlarla mukayese edildiğinde daha rijit bir yapıya sahip, daha yüksek sıcaklıklarda içyapısını koruyabilen (kararlı), sıcaklık direnci daha yüksek olan yapılardadır. Katı metallere kıyasla, köpük metaller daha yüksek katılık ve hücrelerin boyut, şekil ve hacimsel oranlarının ayarlanmasıyla çok geniş bir uygulama alanının taleplerine cevap verebilecek şekilde mekanik özelliklerinin

ayarlanabilmesi gibi avantajları vardır [Degisher ve Kriszt 2002]. Tamamen geri dönüşümlü 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.

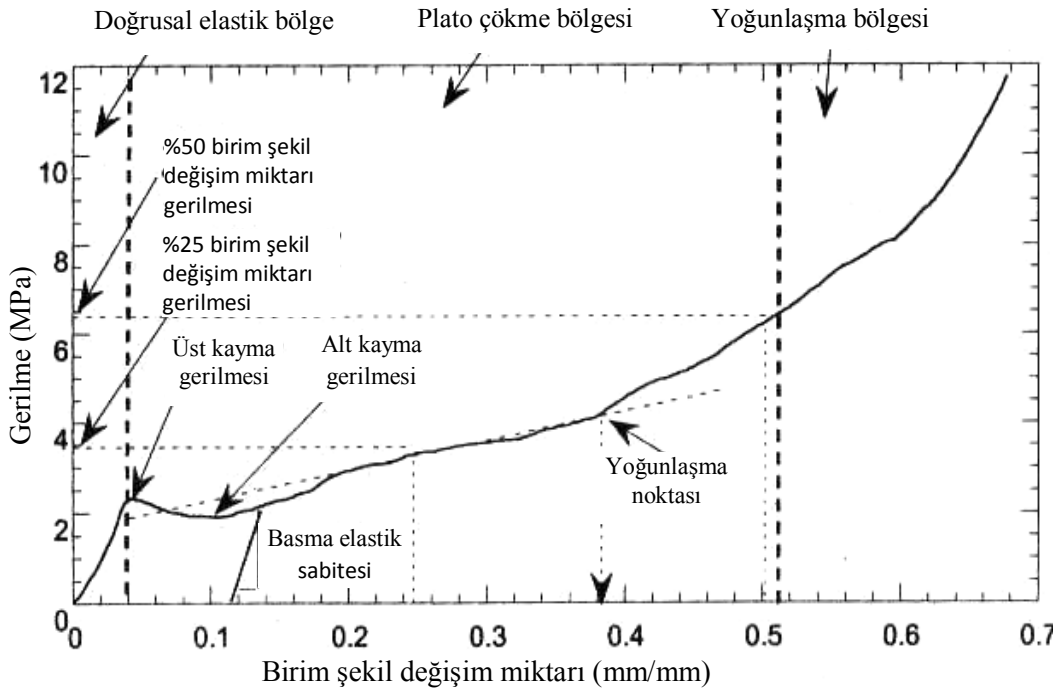
Köpük yapıların genellikle düzensiz bir içyapıya sahip oldukları bilinmektedir. Yapı içerisindeki düzenlemelerin ise belli kuralları vardır. Genel olarak 19. yüzyılda, Belçikalı fizikçi Joseph Plateau'nun açıkladığı yüzey gerilmesince belirlenen kurallara uymaktadırlar. Bu kurallara göre, hücreleri birbirinden ayıran ince duvarların sadece üçü "Plateau (plato)" olarak adlandırılan bir hat üzerinde buluşabilir. Hücre ve duvarları, birbiri ile eşit açılarla, simetrik olarak buluşur. Plateau'nun tanımladığı bu yapı, sıvı köpüklerin birçoğunda, dolayısıyla, sıvı köpüklerin katılaştırılmasıyla oluşan katı köpüklerin de çoğunda görülür [Gibson ve Ashby, 1997]. Plastik deformasyon veya akma bu platodaki gerilme ile başlar. Plato gerilmesi daha fazla veya daha az emilecek enerjiye bağlı olarak korunan bir yapı veya mekanizma üzerinde kullanılması gereken maksimum yükü belirler. Morfolojik düzensizlikler, hücre elipsliği, homojen olmayan hücre duvar kalınlığı ve hücre boyut dağılımının plato gerilmesini azalttığı tespit edilmiştir [Elbir, 2001]. Hücre morfolojisinin yanında, yapı içerisine ilave edilen takviye elemanlarının miktarının ve boyutunun plato gerilmesini etkilediği ve buna paralel olarak köpük malzemenin mekanik özelliklerinde değişimler olduğu bilinmektedir.

2.2.1. TM yöntemiyle üretilmiş kapalı hücre Al köpük metallerin basma davranışları

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al esaslı kapalı hücre köpüklerin basma davranışları gözeneksiz metal yapılara nazaran daha farklı davranışlar sergilerler. Birçok bilim adamı tarafından basma testleri yapılarak incelenmiştir [Banhart ve Baummeeister, 1998; Koza ve ark., 2003; Lehmhus ve Banhat, 2003; Kim ve ark., 2003; Kennedy, 2004; Kennedy ve Asavavisitchai, 2004; Esmaeelzadeh ve ark.,

2006; Kim v ark., 2006; Guden v Yuksel, 2006; Esmaeelzadeh ve Simchi, 2007; Yu ve ark., 2008].

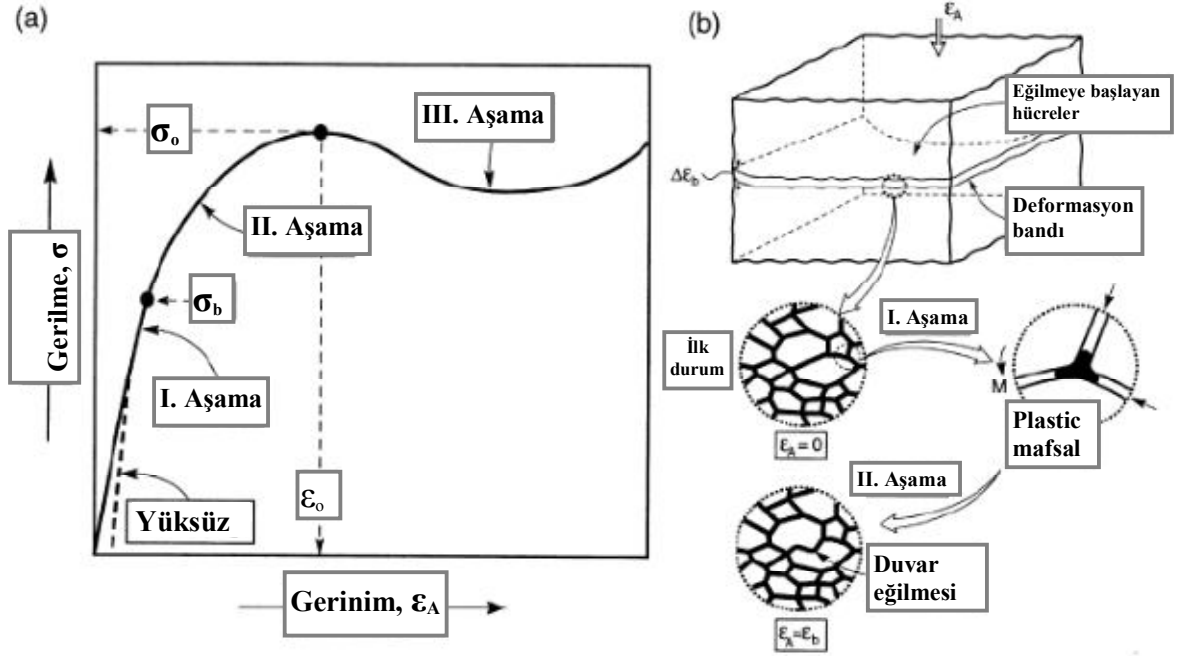
Basma testinde üç önemli bölge incelenmektedir. Bu üç bölge sırasıyla; doğrusal elastik bölge, çökme ve yoğunlaşma bölgeleridir (Şekil 2.13). Metalik köpükler tipik bir gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi gösterirler ve doğrusal elastik bölgede elastik deformasyona uğrar. Doğrusal elastik bölgede gerilme ve gerinim hücre duvarı ile kontrol edilir. Bu bölge hücre duvarlarının bükülmesi ve yırtılması ile sona erer ve çökme bölgesi başlar. Plato çökme, deformasyonun çok iyi sınırlandırıldığı elastik bölgeden deformasyonun diğer deforme olmamış kısımlara sıçramasıyla ilerler. Kritik bir genleşmede hücre duvarları birbirine değmeye başlar ve bunun sonucunda yoğunlaşma meydana gelir.



Şekil 2.13. Metal köpüklerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği [Elbir, 1999].

Bastawos ve Evans, (2000) yaptıkları çalışmada Al esaslı düzensiz gözenekli köpüklerin hücrelerinin deformasyonunu incelemişlerdir. Tek eksenli deformasyon sırasında ilk gerilme/gerinim eğrisi ($0,05 > \epsilon_A$) üç kısımdan oluştuğunu

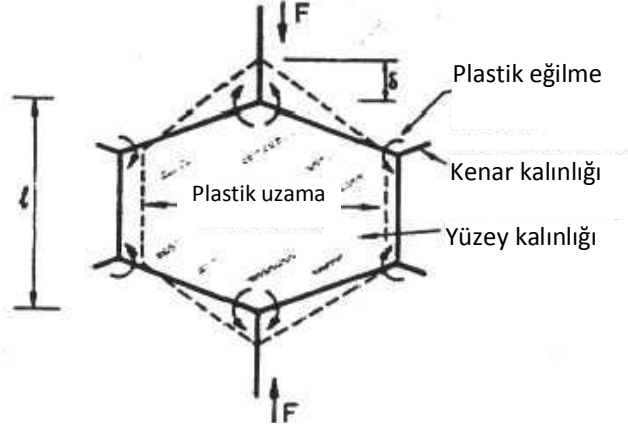
söylemişlerdir (Şekil 2.14). Birinci kısım deformasyonun doğrusala yakın olduğu yerdeki eksen gerinimlerini ($\varepsilon_A < \varepsilon_b$) gösterdiğini, fakat doğrusal eğiminin yüklemesiz durumdaki eğiminden daha düşük olduğunu göstermişlerdir. İkinci kısmı, ε_0 'a yaklaşırken fark edilir pekleşmeyle gerinimde azalan bir artış olduğu doğrusal olmayan kısım olarak isimlendirmişlerdir ($\varepsilon_b < \varepsilon_A < \varepsilon_0$). Üçüncü kısım, ε_0 daki maksimum stresten başlar, sonra aşamalı bir genel pekleşme etrafında gerilme değişimleriyle gerinimdeki ($\varepsilon_0 \leq \varepsilon_A$) yumuşamayla devam eden kısım olduğunu belirtmişlerdir [Bastawos ve Evans, 2000].



Şekil 2.14. Kapalı hücre Al köpüğün; a) Deformasyon bölgesindeki üç kısım b) basma deneyinde hücrelerin şematik gösterimi [Bastawos ve Evans, 2000].

Köpük içerisindeki hücreler homojen dağılımlı ve aynı şekilli değildirler. Bu sebepten dolayı basma deneyi esnasında deformasyon mekanizmaları devreye girmektedir. Kapalı gözenekli metalik köpüklerde, plastik çökme gözenek duvarları üzerinde meydana gelir. Petek şekilli bir köpük hücresine uygulanan gerilme teorik olarak modellendiğinde, plastik çökme, gözenek duvarlarının basma yönünde katlanmasıyla oluşur (Şekil 2.15). Katlanma için gerekli kuvvet miktarı düşüktür. Fakat basma esnasında gözenek duvarlarının katlanması için gerekli kuvvet, köpüğün

akma noktasına önemli oranda katkıda bulunur. Bu durum deformasyon artışı sırasında yapılan işin hesaplanmasıyla bağlantılıdır [Elbir, 2001].

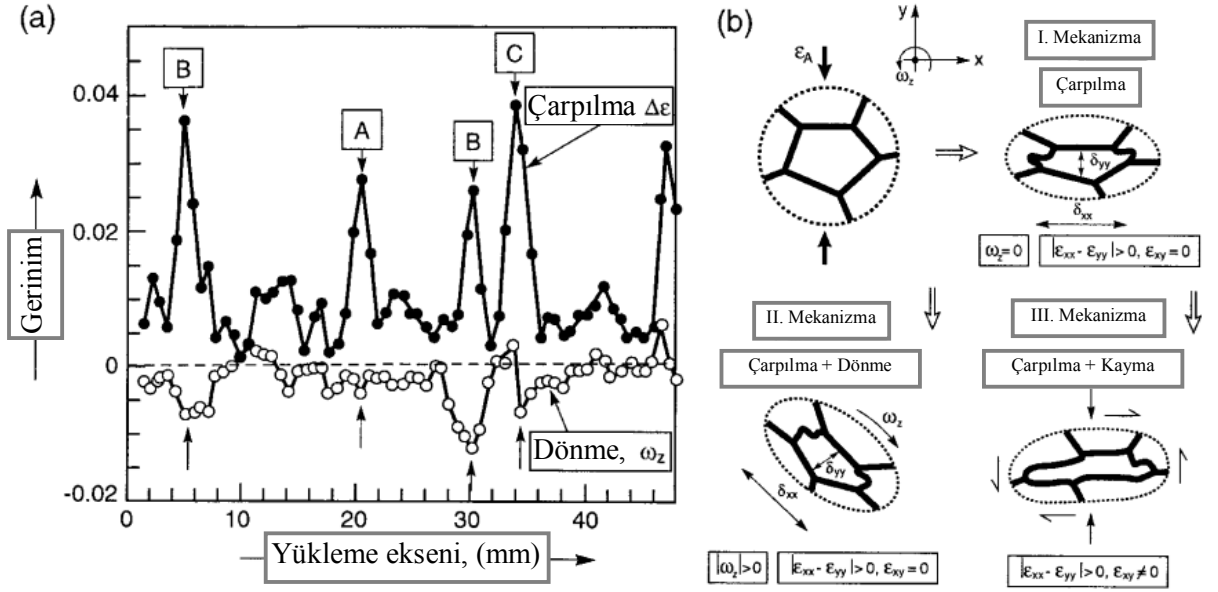


Şekil 2.15. Petek şekilli hücrenin teorik olarak plastik çökmesinin modeli [Elbir, 2001].

Metalik köpükler, metal veya alaşımlarından üretildiği için belli bir plastik şekil değiştirme bölgesine sahiptir. Bu plastik bölge doğrusal elastik bölge üstündeki yüklemelerde plastik çökme ile başlar. Köpüklerin doğrusal elastik deformasyon özellikleri Young modülü ve kayma ile hesaplanabilir [Elbir ve ark., 1999]. Kapalı gözenekli köpükler diğer gözenekli yapılara göre daha karmaşıktır. Eğer gözenek duvarları ince olursa çatlama veya kırılma meydana gelebilir. Bu gözenek duvarlarında bazı deformasyon gerilmeleri ortaya çıkar. Bu gerilme kuvvetini, köpük malzemesinin sahip olduğu gerilme kuvveti etki ederek arttırır [Degischer ve Kriszt, 2002].

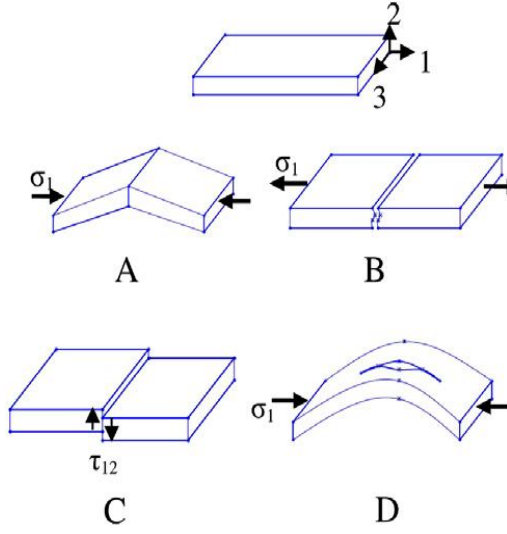
Köpük içerisindeki hücreler homojen dağılımlı ve aynı şekilli olmadığı durumlarda petek modeline nazaran birden çok farklı deformasyon mekanizmaları devreye girecektir. Şekil 2.16'da X-ışınları görüntüleme ile hücrelerde meydana gelen deformasyonları ve yükleme eksenindeki şekil değişikliği/gerilme grafiği gösterilmektedir. Üç farklı deformasyon mekanizması gerçekleşmektedir. Birinci mekanizma tek eksende dönme olmaksızın gerçekleşen büyük hücre çarpılmasını göstermektedir. Şekil 2.16a'da gösterilen A noktasıdır. İkinci mekanizma, B noktasıdır, benzer çarpılmayı içermektedir. Fakat Şekil 2.16-b'de görüldüğü gibi saat

yönünde dönerek kombine olmuştur. Bu dönme komşu hücrelerin saat yönünün tersine dönmesiyle sağlanmaktadır. Üçüncü mekanizma, C noktasıdır. Makaslama düzlemindeki çarpılma ile oluşmaktadır. Bu yerleşim, gerinimi en yüksek noktaya çıkartır. Dönme bandı yerleşim merkezinin etrafındaki simetrik pozitif ve negatif en yüksek noktaya sahiptir (Şekil 2.16a-b) [Bastawos ve Evans, 2000].



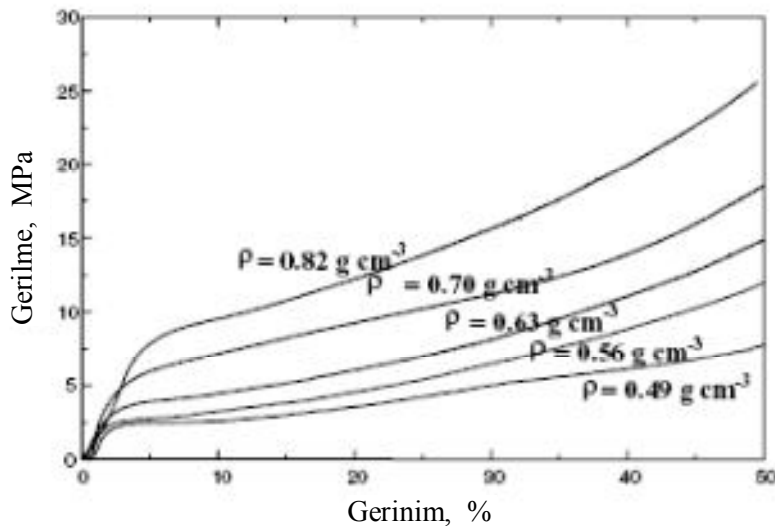
Şekil 2.16. a) Eksenel pozisyonun fonksiyonu olarak çarpılma ve eksenel gerinimler grafiği; b) Çarpılma mekanizmaları [Bastawos ve Evans, 2000].

Köpük hücrelerinin deformasyonları sırasında hücre duvarlarının deformasyona uğrama şekilleri enerji emme mekanizmalarını oluşturmaktadır. Şekil 2.17’de dört enerji emme mekanizması görülmektedir. Mod A hücre duvarı ve hücre kenarında plastik mafsal şeklinde eğilme ile oluşur. Düşük gerilmede bir, iki veya üç mafsal oluşturan hücre duvarında akma başlar. Bu sırada, basma yönünde hücre duvarında buruşma olmaksızın eğilmeye sebep olur (Şekil 2.17-A). Mod B çekme ile hücre duvarında gerilme yönüne dik olarak sünek yırtılma ile meydana gelir (Şekil 2.17-B). Mod C ise aynı şekilde gerilme yönüne dik şekilde kayma ile gerçekleşir (Şekil 2.17-C). Mod D hücre duvarının burkulmasını içerir (Şekil 2.17-D). Yüksek gerilme seviyelerinde basma eksenin dik hücre duvarı burkulması ile oluşur. Çatlama basma eksenine paralel meydana gelir [Mu ve ark., 2010].



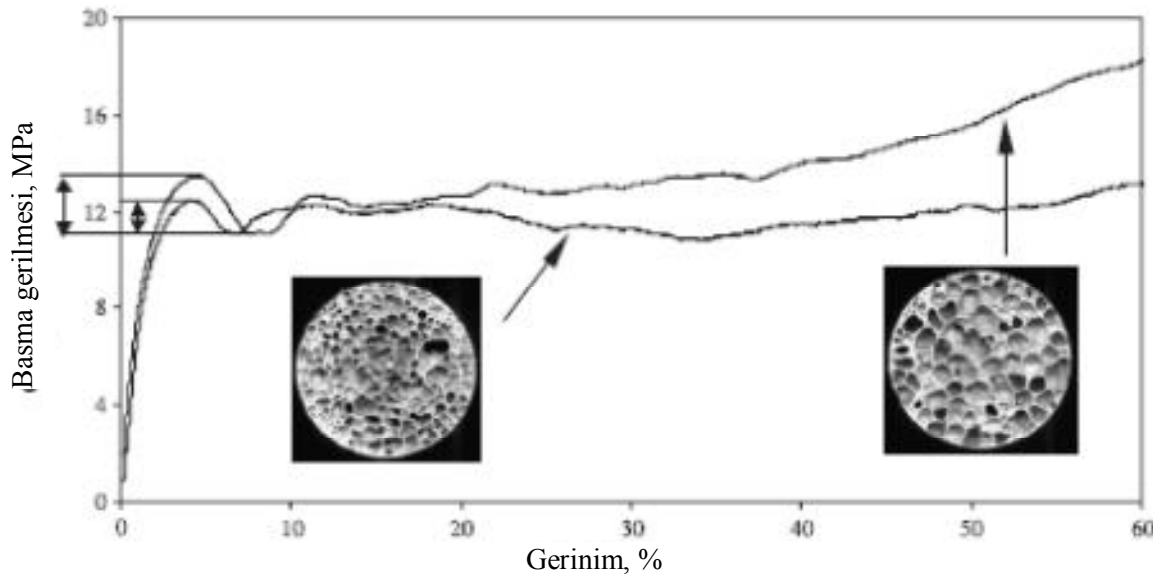
Şekil 2.17. Enerji emme mekanizmaları [Mu ve ark., 2010].

Köpük parçaların basma dayanımı onların yoğunlukları ile de ilgilidir. Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilmiş farklı yoğunluktaki köpük parçaların tipik gerilme/gerinim eğrileri Şekil 2.18’de gösterilmektedir. Bu eğrilerin formu, özellikle iyi tanımlanmış plato bölgesinin oluşmadığını ve köpük yüzeyinin hala bozulmamasıyla parçalarda gözlenen kararlılığı göstermektedir. Yoğunluğun artmasıyla basma gerilmesi artmaktadır (Şekil 2.18, Şekil 2.21) [Banhart ve Baumeister, 1998; Koza ve ark., 2003; Kennedy, 2004].



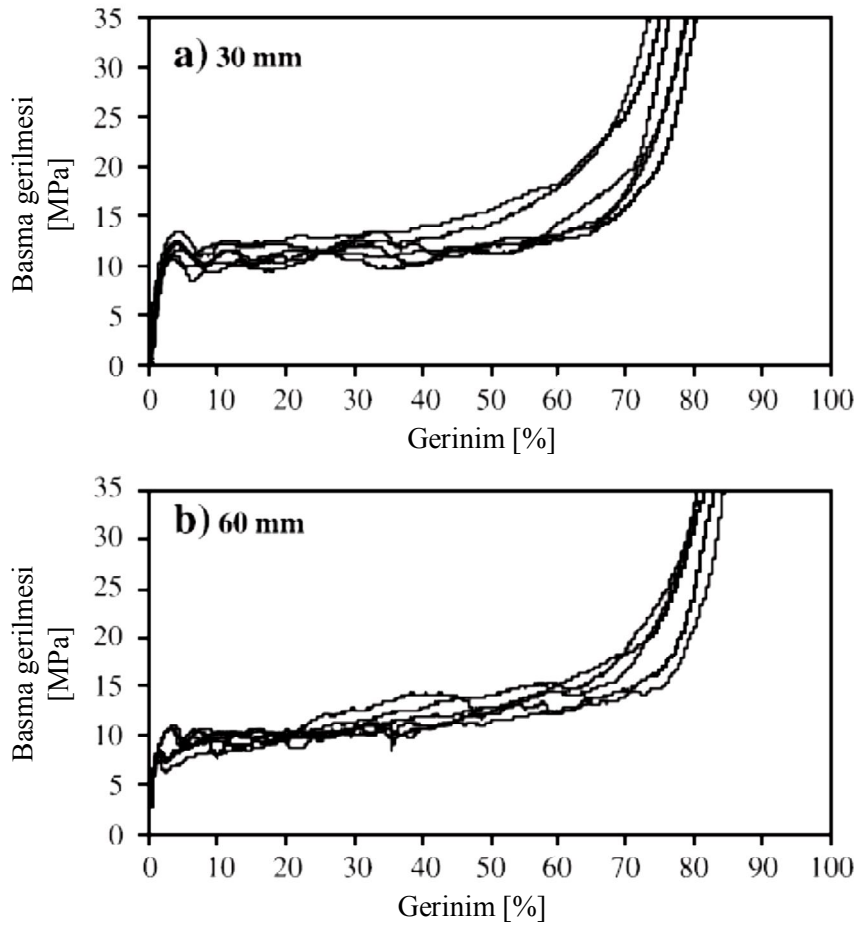
Şekil 2.18. Farklı yoğunluktaki saf Al köpüklerin gerilme/gerinim eğrileri [Kennedy, 2004].

Gerilme maksimum yükselmeden sonra önemli bir şekilde düşer. Bu düşüş literatürde en yüksek gerilme ile en düşük gerilme arasındaki fark olarak anılır. Bu olay hücre tabakasının yıkılmasının etkisidir ve bu nedenle ilgili gerilme hücre duvarının boyutuyla orantılıdır. Benzer yoğunluktaki köpüklerin gözenek boyutları arttıkça gerilmede artacaktır (Şekil 2.19) [Koza ve ark., 2003].

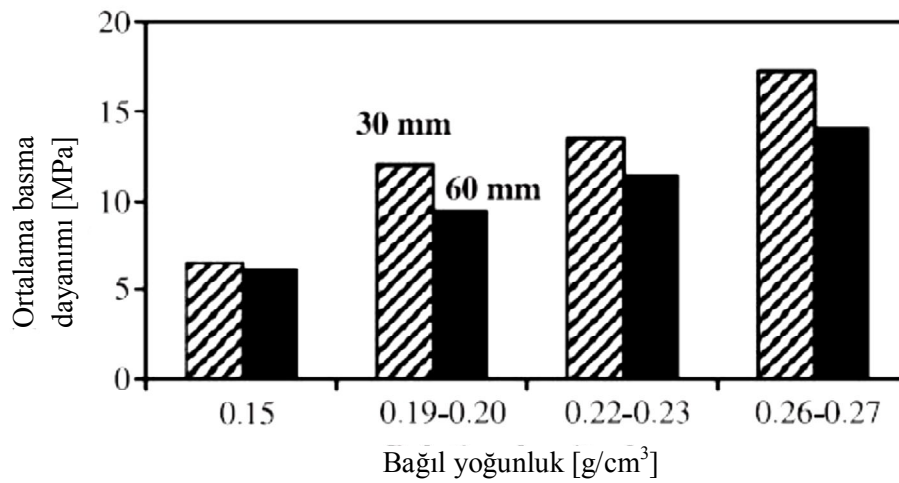


Şekil 2.19. Aynı yoğunluktaki AlSi10 köpüklerin gerilme/gerinim grafiği [Koza ve ark., 2003].

Yoğunluk arttıkça basma gerilmesi artar (Şekil 2.21). Homojen olmayan köpürmelerde bu durum çok önemlidir. Çünkü numunelerin basma deneyi anında çökme, yoğunluğu az olan üst kısımdan başlar ve hatalar boyunca çökmeler devam ederek ilerler. Basma yapılan numunelerin boyları azaldıkça plato bölgesi biraz daha fazla azalacağı için basma gerilmesi artacaktır. Şekil 2.20'da 30 ve 60 mm yüksekliğindeki köpük numuneler için gerilme/gerinim grafiği gösterilmiştir [Koza ve ark., 2003].

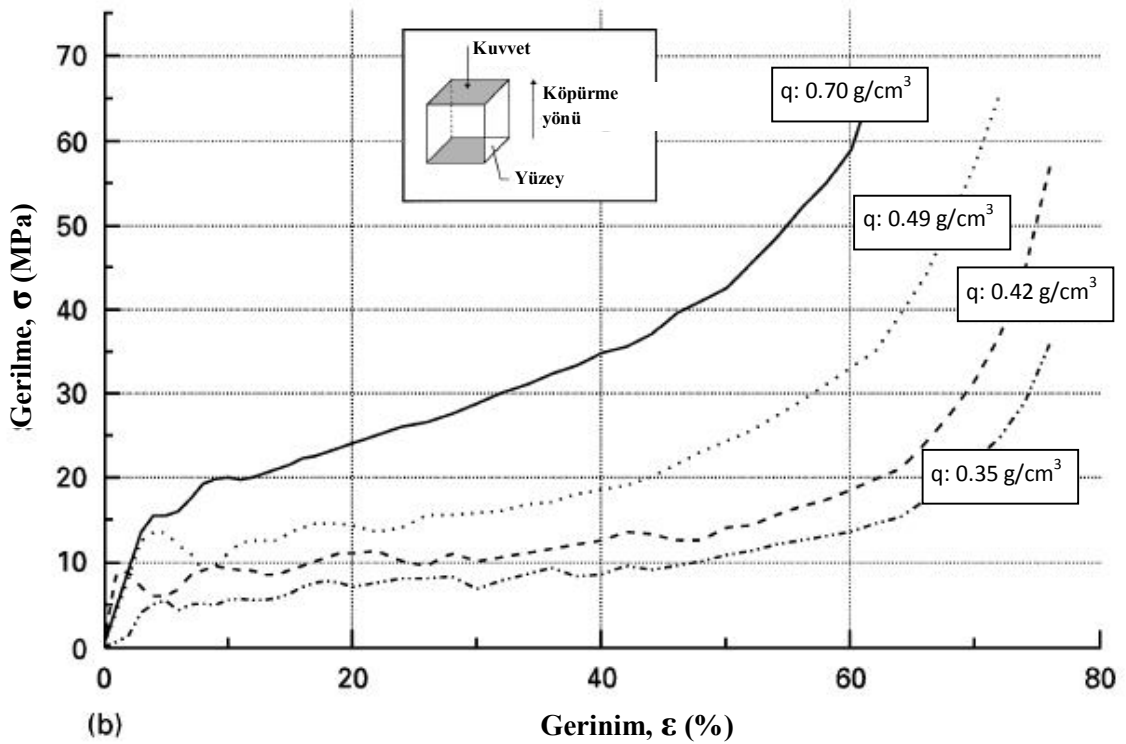
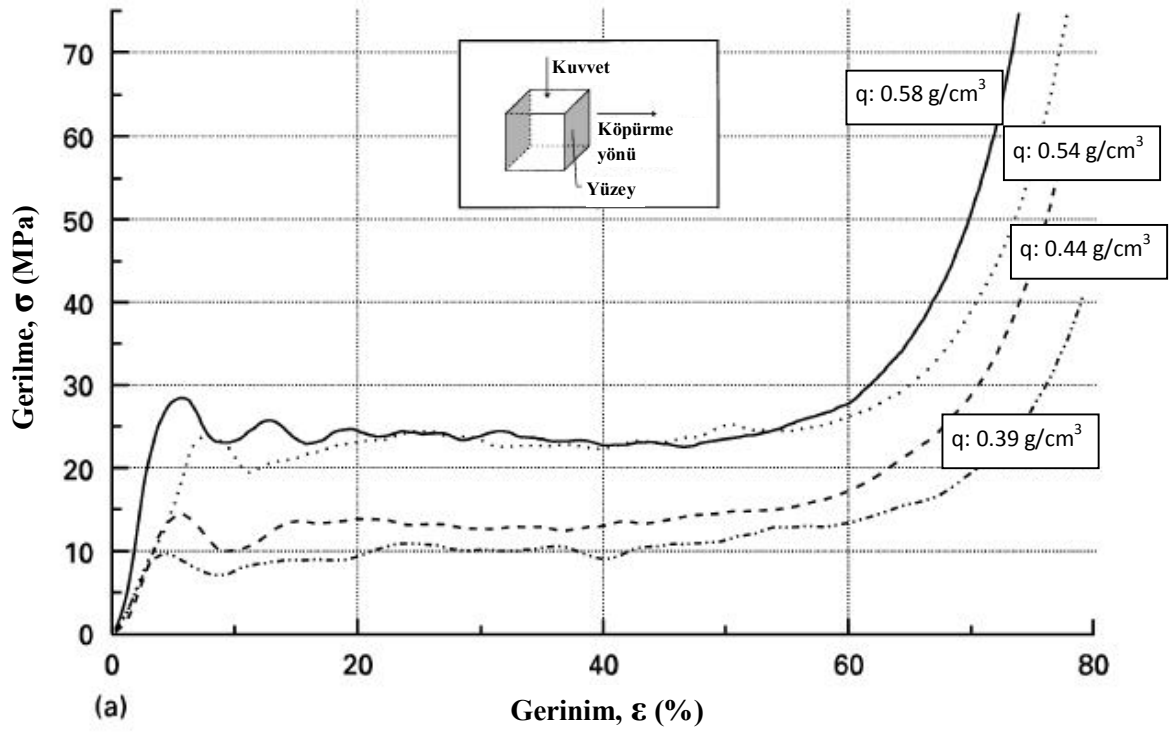


Şekil 2.20. 30 ve 60 mm boyundaki AlSi10 köpük numunelerin (yoğunluk: 0,19-0,20) gerilme/gerinim eğrileri [Koza ve ark., 2003].



Şekil 2.21. 30 ve 60 mm boyundaki farklı yoğunluklardaki AlSi10 köpük numunelerin sütunsal grafiği [Koza ve ark., 2003].

Alaşım içeren TM ile üretilen köpük malzemelerin köpürtme doğrultuları (yönleri) de birçok araştırmacı tarafından önemli bulunup incelemeye alınmıştır. Banhart ve Bumeister, (1998) Al- %6 Si- %4 Cu köpüğün köpürtme yönüne bağlı mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Köpürtme yönüne dik basma uygulandığında maksimum gerilmeden sonra şekil değişikliğinin (gerinimin) artmasıyla gerilme çok belirgin artış göstermemektedir (Şekil 2.22). Fakat köpürtme yönünde yapılan basma testinde düşük yoğunluklu köpüklerin dışında şekil değişikliğinin artmasıyla gerilme artmaktadır. Köpük hücreleri tozların ilk birleşim (tozların yarı katı şekillendirilmesi) yönüne dik düzlemde uzamasıyla şekillenir. Uzama boyunca hücreler büyür ve çoğunlukla küresel olurlar. Fakat aksi bir durum söz konusu olursa, hücreler tam küresel değil de küresele yakın oluşacaktır. Yöne bağlı olarak değişmesinden dolayı da düzensiz hücreli köpükte, köpürtme yönündeki gerilmesi, gerinimin artmasıyla artacaktır. [Banhart ve Bumeister, 1998].



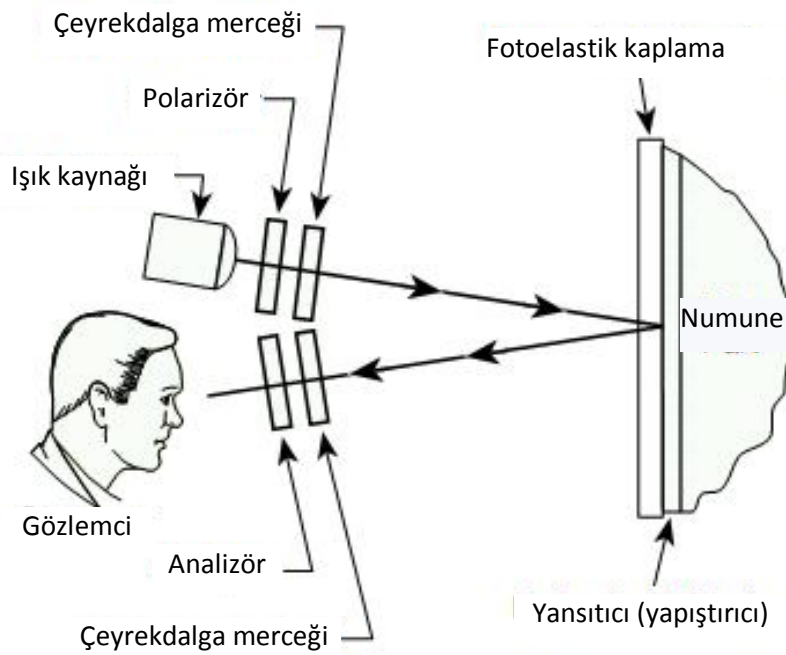
Şekil 2.22. Al- %6 Si- %4 Cu köpük malzemenin; a) Köpürtme yönüne dik, b) köpürtme yönünde yapılan basma deneyi gerilme/gerinim grafikleri [Banhart ve Bumeister, 1998].

3. FOTOSTRES ANALİZ YÖNTEMİ

Fotoelastisite test cihazları bir cisim üzerindeki gerilmelerin dağılımı ve şiddeti hakkında bilgi veren cihazlardır. Bu cihazların ölçme prensipleri, araldit, cam, bakalit, poliüretan gibi belli bazı saydam veya saydama yakın malzemelerin gerilmeye maruz kalmadıkları zaman optik olarak izotropik olduğu fakat gerilmeye maruz kaldıklarında anizotropik olduğu ve bir kristal gibi davrandığı gerçeğine dayanır [Azeloğlu ve ark., 2008].

Polarize ışık altında bazı saydam malzemelerin oluşturduğu renkli desenlerin gözlenmesi fotoelastik durumu açıklar. Bu yöntemle karışık yapılar içinde oluşan gerinim ve gerilmeleri gözle görülebilir ışık taslakları haline dönüştürülebilir. Polarize ışık demeti yüklenmiş, üzerine kuvvet uygulanmış, fotoelastik kaplama yapılmış bir malzemeden geçerken, malzemeyi farklı hızlarda kat eden dikey titreşimlere dönüşür. Buna fotoelastik etki denir. Bu durum polarize filtre veya polariskop yardımıyla gözlenebilir [Kujawski, 2011].

Kullanılmakta olan cihazların en yaygın olarak kullanılanı Reflektif polariskop cihazıdır. Reflektif polariskop bir malzeme üzerindeki gerinimi ölçerek, bu sayede parça veya yapı üzerindeki gerilme değerlerinin durağan veya hareketli yükler altında incelenmesini sağlar. Cihaz polarize ışık kaynağı, filtreler, transdüzer (compansator) ve kamera olmak üzere dört ana kısımdan oluşmaktadır. İncelenecek numune polimer esaslı polarize ışığa duyarlı bir reçine (fotoelastik kaplama) ile kaplanmaktadır. Bu kaplama, içerisinde alüminyum parçacıkları olan bir yapıştırıcı ile numune üzerine tutturulmaktadır. Yapıştırıcı kuruma işlemi tamamlandıktan sonra incelemeye hazır hale gelir [Vishay, 2010; Uzol, 2008].



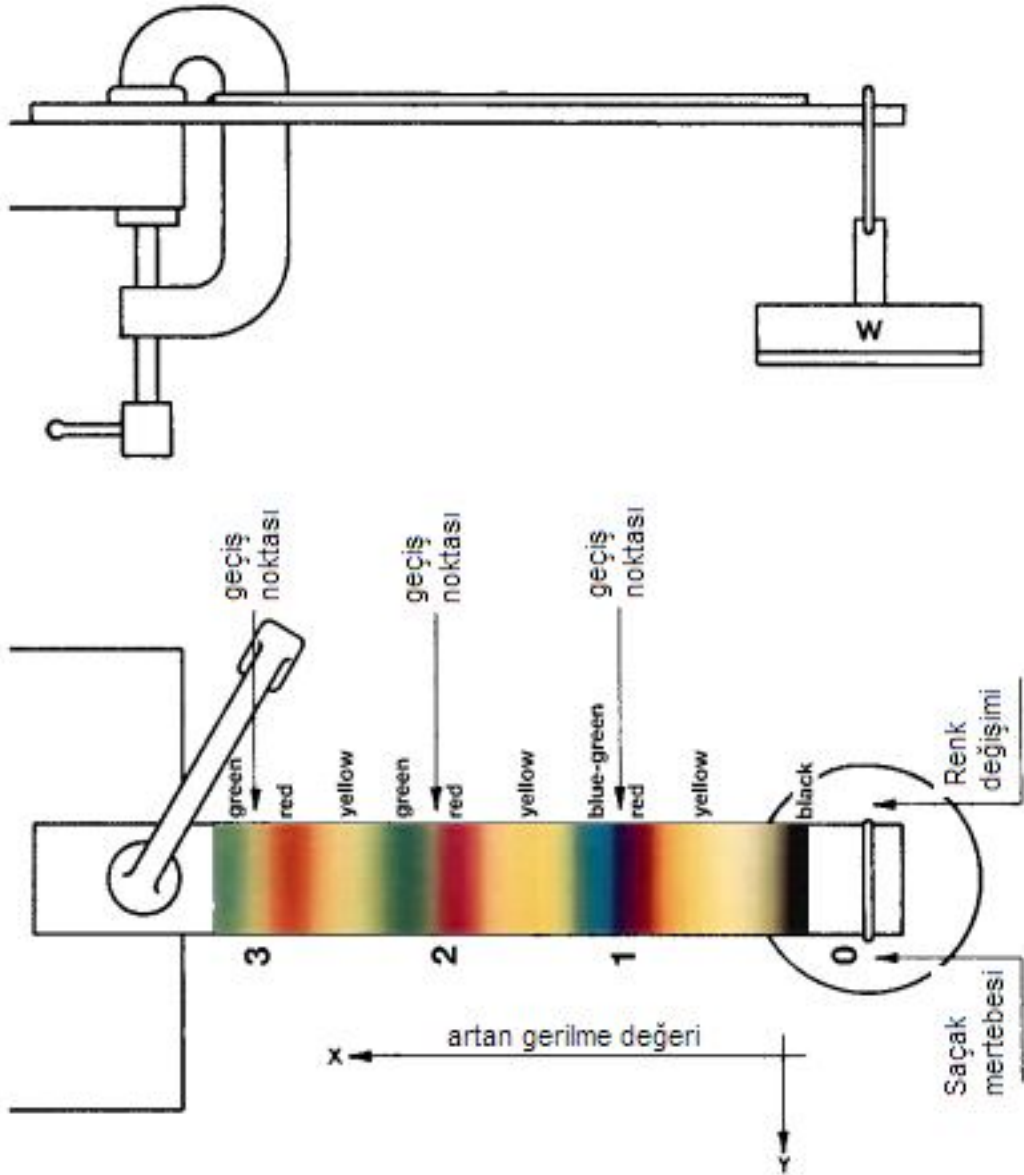
Şekil 3.1. Reflektif polariskop cihazı çalışma prensibi şematik gösterimi [Vishay, 2011].

Hazır hale getirilen numune incelenmek üzere polarize ışık kaynağından çıkan ışık kaplanan bölgeye yansıtılır (Şekil 3.1). Fotoelastik kaplamaya çarpan ışık yapıştırıcı içinde bulunan alüminyum parçacıklarından yansıyarak gözlemcinin baktığı filtreye ulaşır. Yansıyan görüntü renk saçaklarından ibaret olup, bunlar haritalar üzerindeki eş yükselti eğrileri gibi bilgi vermektedir.

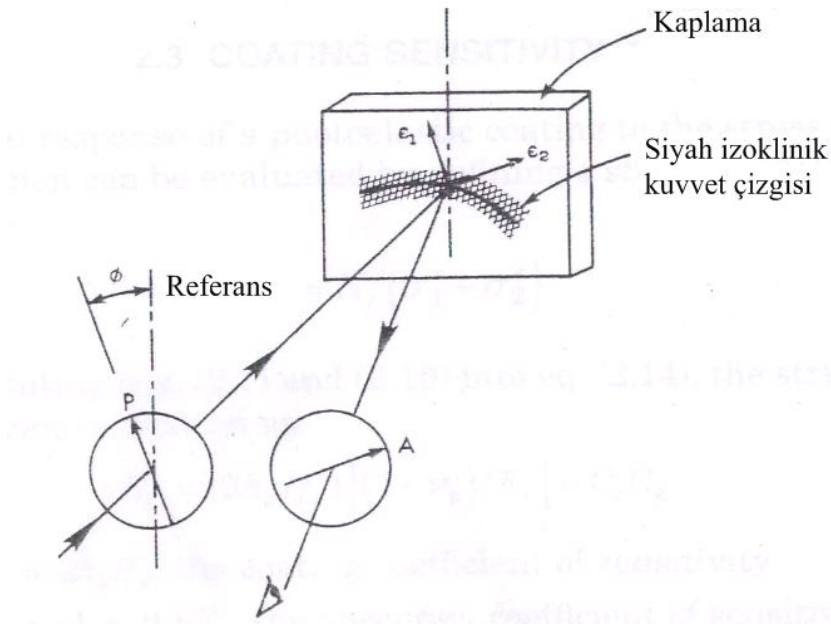
Fotoelastik malzemede kırmızı ve yeşil renkler arasındaki kuvvet çizgileri fringe olarak tanımlanır. Kuvvet çizgilerinin sayısı arttıkça gerilmede oransal olarak artar. Bu renkli bantlar veya kuvvet çizgileri birbirine yaklaştıkça, gerilme değişimi fazla olur. Düzenli renk görünümü ise düzenli dağılım gösteren gerilme alanlarını ifade eder [Özkır, 2007; Uzo, 2008].

Genel olarak düzlemsel polariskopta iki tip çizgi vardır. Şekil 3.2'tende görüleceği gibi bunlardan birincisi belirli renk çizgilerinin sıralı olarak gözlemlendiği alanlardır. Bunlara izokramatik kuvvet çizgisi denir ve gerilmenin yoğunlaştığı bölgelerde

gözlenir. Diğeriyse polariskopta siyah olarak görülen alanlardır ve bunlara izoklinik kuvvet çizgisi denir (Şekil 3.2). Bu kuvvet çizgileri gerilmelerin yönleriyle ilgilidir ve izokramatiklerle üst üste binebilirler [Özkır, 2007; Uzo, 2008].



Şekil 3.2. Renk saçaklarının (Fringe order) ve İzokromatik kuvvet çizgilerinin görünümü [Vishay 2011].



Şekil 3.3. İzoklinik kuvvet çizgilerinin görünümü [Vishay 2011].

Modelin iyi olarak analiz edilebilmesi ve görüntü alınabilmesi için izokromatik kuvvet çizgilerinin net olarak gözlenmesi gerekir. Bu nedenle izokromatik kuvvet çizgilerinin görülmesini kolaylaştırmak için izokliniklerin elimine edilmesi gerekir. İzokliniklerin eliminasyonu sirküler polariskop ile gerçekleştirilebilir ve bunun filtresi çeyrek dalga tabakası olarak adlandırılır (Şekil 3.3). Bu filtre sayesinde ışığın bir kısmının rotasyonu engellenir ve izoklinik kuvvet çizgileri etkisiz duruma getirilir [Özkır, 2007; Uzo, 2008].

3.1. Fotostres Cihazı ile Yapılabilecekler

Cihaz iki boyutlu elastik Hook yasasını kullanarak bu gerinim farklarından asal gerilme farklarını otomatik olarak hesaplar. Bu yöntem sayesinde;

- Yüklemeye altında aşırı yüklü veya yüksüz kritik bölgelerin tespiti,
- Delik, çentik, fatura (fillet), vb. geometrilerden dolayı oluşan gerilme yığılmasının ve azami gerilmelerin ölçülmesi,

- c) Minimum ağırlık- maksimum güvenilirlik için parçaların yüzeyde optimum gerilme dağılımına sahip olacak şekilde tasarlanmasını,
- d) Kaplanmış numune üzerinde herhangi bir nokta üzerinde asal gerilmelerin ölçülmesi,
- e) Gerilme ölçümlerinin çalışma sahasında veya laboratuvar ortamında rahatlıkla yapılabilmesi,
- f) Değişik yük ve gerilme türleri için tekrarlı olarak test yapılabilmesi,
- g) Montaj gerilmelerinin ve kalıntı gerilmelerin belirlenmesi ve ölçülmesi,
- h) Akma sınırının belirlenmesi ve plastik deformasyon sonucunda gerilme dağılımının belirlenebilmesi,
- i) Test parçası tekrar kaplanmaksızın farklı yükleme şartlarında tekrar tekrar test yapılır

işlemleri gerçekleştirilebilir.

3.2. Fotostres Cihazının Kullanıldığı Yerler

Reflektif Polariskop her alanda kullanımı yukarıda sıralanan kabiliyetinden dolayı mümkün olmaktadır. En büyük avantajı model yapmaya gerek kalmadan doğrudan yük altındaki kiriş-kolon, makine parçaları ve canlı anatomisinde kullanıma sunulan biyomekanik ve biyomateryal parçaların üstündeki gerilmeleri göstermesidir. Reflektif Polariskop cihazının diğer bir avantajı ise çok küçük yükler altında bile yapılabilmesidir.

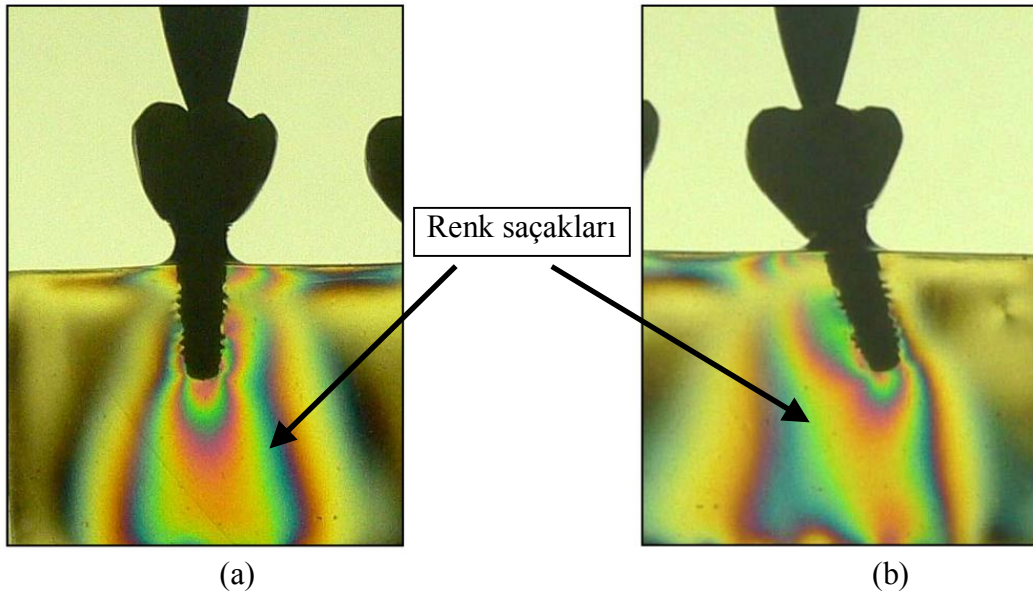
Özkır (2007) çalışmasında fotoelastik stres analizi yöntemiyle 4 değişik tasarıma sahip, düz ve eğimli yerleştirilmiş implantların çeşitli restorasyon tipleriyle gelen kuvvetlere verdikleri cevap karşılaştırmalı olarak incelemiştir. İncelediği implant tipleri, vidalı silindir (ITI), basamaklı silindir (Frialit2), kök formunda (Camlog Rootline) ve boyun bölgesi mikro yivli silindiriktir (Astra). Hazırlanan modellerde implantlardan biri düz, diğeri kullanılacak desteğe göre mesiale 15° eğimli

yerleştirmiştir (Resim 3.1). Fotostres ölçümlerini 150N'luk yük ile yapmıştır [Özkır, 2007].

Yaptığı gözlemler sonucunda, eğimli yerleştirilen implantlarda düz yerleştirilen implantlara göre biraz daha düşük derecede stres biriktiğı ancak dağılımının homojen olmadığı gözlemiştir (Resim 3.2a-b) [Özkır, 2007].

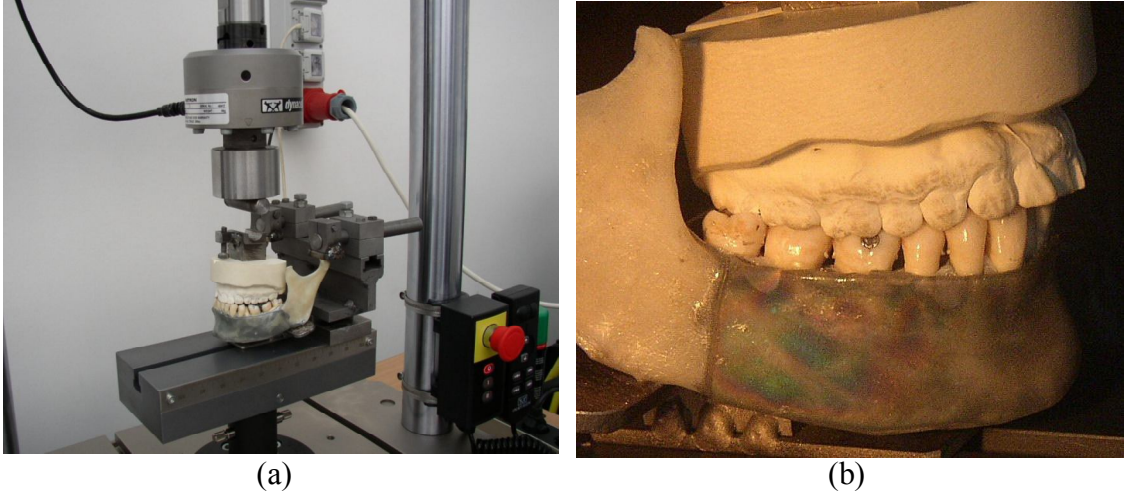


Resim 3.1. Frialit2 implantlar ve kronlar [Özkır, 2007].



Resim 3.2. a) Dik yerleştirilmiş Frialit2 implantın yüklenmiş hali b) Eğimli yerleştirilmiş Frialit2 implantın yüklenmiş hali [Özkır, 2007].

Gáspár ve ark. (2005) yapay alt çene ve diş protezi tasarlayarak fotostres yöntemi ile deneysel bir çalışma yapmıştır. Bir ağız kemik sistemi prototipi oluşturarak alt çeneye fotostres analizi yapmıştır (Resim 3.3). Resim 3.3b’de alt çeneye gelen yük ile birlikte çekilen fotostres görüntüsünde kaplama üzerinde renk saçakları çok belirgin bir şekilde görülmektedir.



Resim 3.3. a) Ağız yapısı prototipi ve deney düzeneği, b) Oluşan fotostres görüntüsü [Gaspar ve ark., 2005].

Azeloğlu ve Alpay (2009) yük kancasındaki gerilmelerin farklı metotlarla incelenmesi ve gerilme dağılımının fotostres deneyi ile doğrulamaya çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada yük kancaları için yaklaşık hesap yöntemi vererek, Timoshenko’nun eğri eksenli çubuk teoremini basit kancaya uyarlayarak ve Bach yaklaşımı kullanarak kanca üzerindeki gerilmeleri hesaplamışlardır. Ardından sonlu elemanlar yöntemini kullanarak basit kancanın gerilme analizi yapmışlardır. Elde edilen gerilme dağılımını fotostres deneyiyle doğrulamışlardır [Azeloğlu ve Alpay, 2009].

Fotoelastisite deneyi sonuçları analitik yöntemlerle ortaya konan ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen gerilme dağılımını doğrular nitelikte olduğunu tespit etmişlerdir (Resim 3.4). Buna göre, kritik kesitte konkav tarafta çeki gerilmelerinin oluşturduğu bir maksimum gerilme bölgesinin olduğu, aksi kısımda ise bundan

daha küçük değerde, bası gerilmelerinden oluşan bir gerilme dağılımı olduğunu fotostres deneyi ile bulmuşlardır [Azeloğlu ve Alpay, 2009].



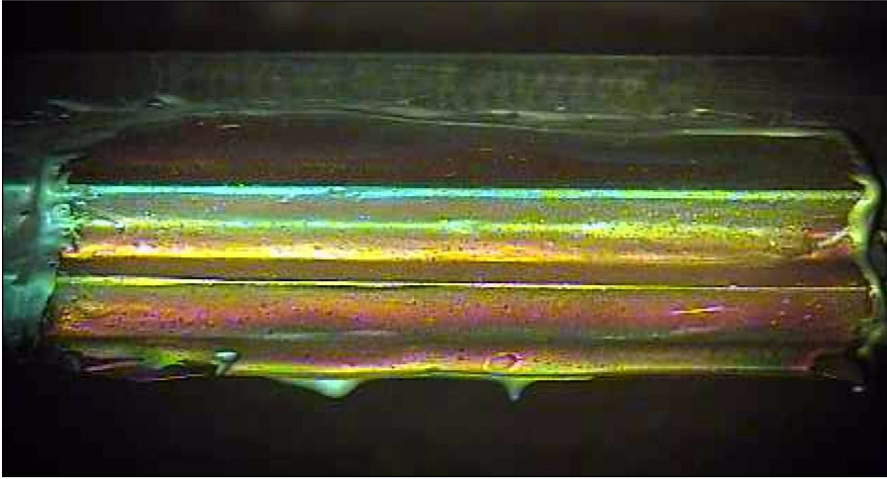
Resim 3.4. Yük kancasından fotostres görüntü resmi ve renk saçaklarının görünümü [Azeloğlu ve Alpay, 2009].

Çevik, (2009) yaptığı çalışmada kaynaklı birleştirmelerde oluşan kalıcı gerilmelerin birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Yapı çeliği lama malzemeler kullanmıştır. Alt lamaya yatay çekme presinde aksenal çekme yükü uygulanarak farklı öngerilmeler oluşturmuştur. Belirtilen öngerilmelere maruz alt lama üzerine yerleştirilen üst lama, bindirme köşe kaynağı ile öngerilmeli lamaya birleştirmiştir. Kaynaklı birleştirme tamamlandıktan sonra alt lamalardaki öngerilme kaldırmıştır. Yaptığı deneyde köşe kaynaklı birleştirmede farklı kalıcı gerilmeler oluşturmuştur. Kaynak dikişlerinde oluşturulan kalıcı gerilmelerin analizi için fotoelastisite tekniği uygulamıştır. Vishay PALC 3 Photostress programı ile kaynak dikişlerindeki kalıcı gerilmeleri ölçmüştür [Çevik, 2009].

Yaptığı çalışmada kaynak bölgesine kaplamanın nasıl yerleştirildiği Resim 3.5’te gösterilmiştir. Gerilme analizi yaptığı levha malzemelerde, tek ekseninde bir gerilme olduğu ve oluşan gerilmelerin teorik olarak oluşması gereken değerlere yakın olduğunu tespit etmiştir (Resim 3.6) [Çevik, 2009].



Resim 3.5. Öngerilmeli kaynak dikişinin yüksüz durumda fotoelastik görüntüsü [Çevik, 2009].



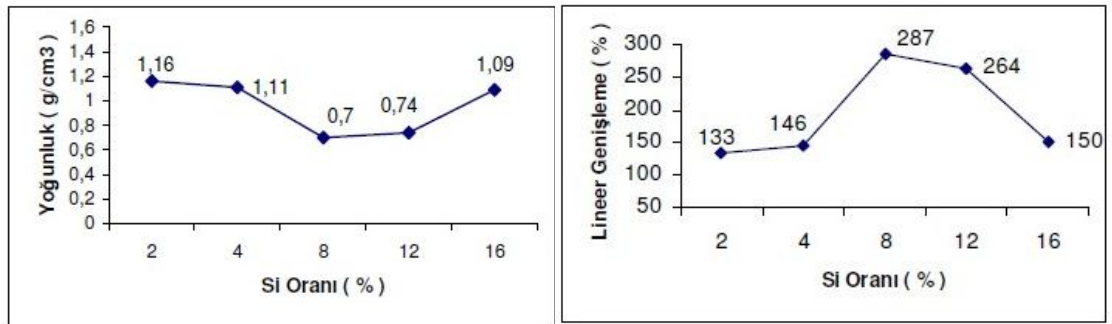
Resim 3.6. Öngerilmeli kaynak dikişinde maksimum kalıntı gerilme oluştuğunda fotoelastik görüntüsü [Çevik, 2009].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzeme Seçimi

Kapalı hücre Al köpük üretimi için yapılan literatür araştırması sonrası metalik köpük malzemesi ağırlıkça Al, % 8 Si ve % 0,8 Mg karışım toz seçilmiştir. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen köpük malzemelerde Si ilavesi önemli bir parametreyi teşkil etmektedir. Koza ve ark., (2003) yaptıkları çalışmada Si ilavesini ağırlıkça % 10 olarak kullanmışlardır. Köpük hücreleri ve hücre şekilleri eş eksenli yapı görüntüsüne benzer homojen birbirine yakın hücre boyutlu köpükler üretebilmişlerdir. Aynı yoğunlukta fakat farklı boyutlarda gözenekli köpükler üretmişlerdir.

Ağırlıkça % 8 Si alaşımının seçilmesi köpürme için gerekli olan en uygun lineer genleşme ve daha düşük yoğunluklu köpük üretebilme için kullanılmıştır [Uzun ve ark., 2010]. Uzun ve ark., (2010) yaptıkları çalışmada, lineer genleşmenin % 8 Si içeren numunede en fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ürettikleri köpüğün yoğunluk olarak en düşük % 8 Si ilavesi ile olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 4.1).



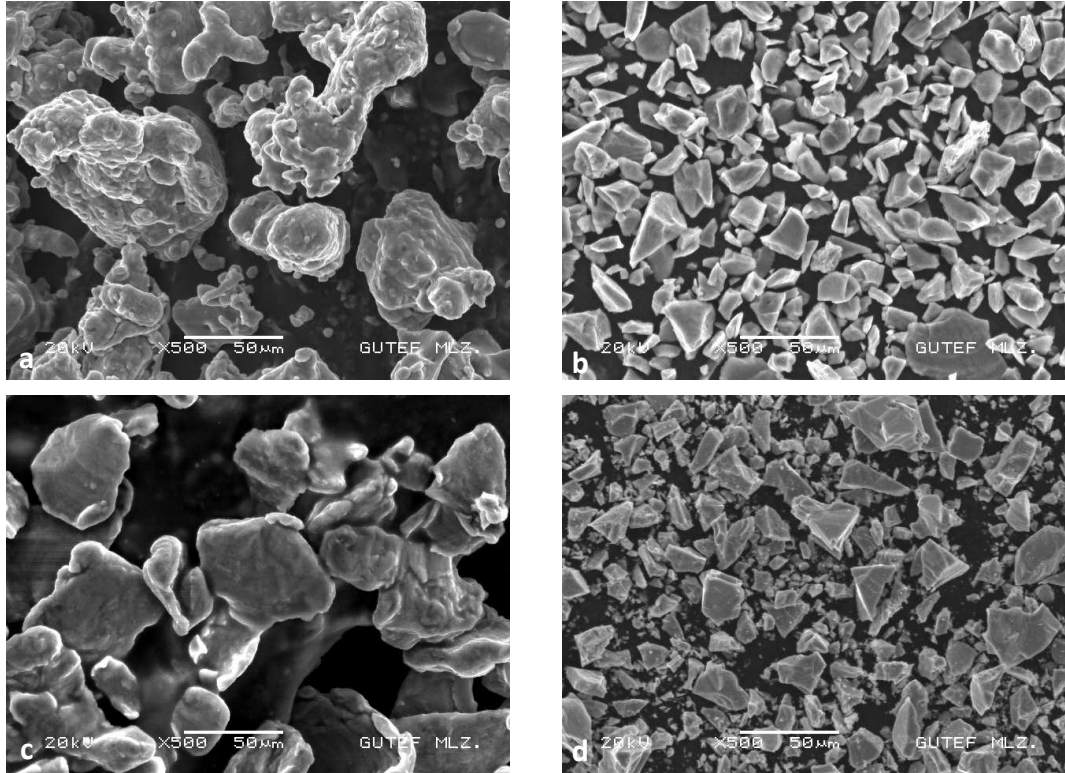
Şekil 4.1. Si oranının yoğunluk ve lineer genleşme parametrelerine etkisi [Uzun ve ark., 2010].

Mg ilavesi, Al-Si ikilisinin %12 Si ilavesinde oluşturduğu ötektik yapıya benzer bir yapıyı oluşturmaktadır. Mg ilavesi, Mg_2Si fazını oluşturmakta, bu faz ile köpük malzeme düşük süneklik/yüksek sertlik özelliğine sahip olmaktadır [Markaki, 2001].

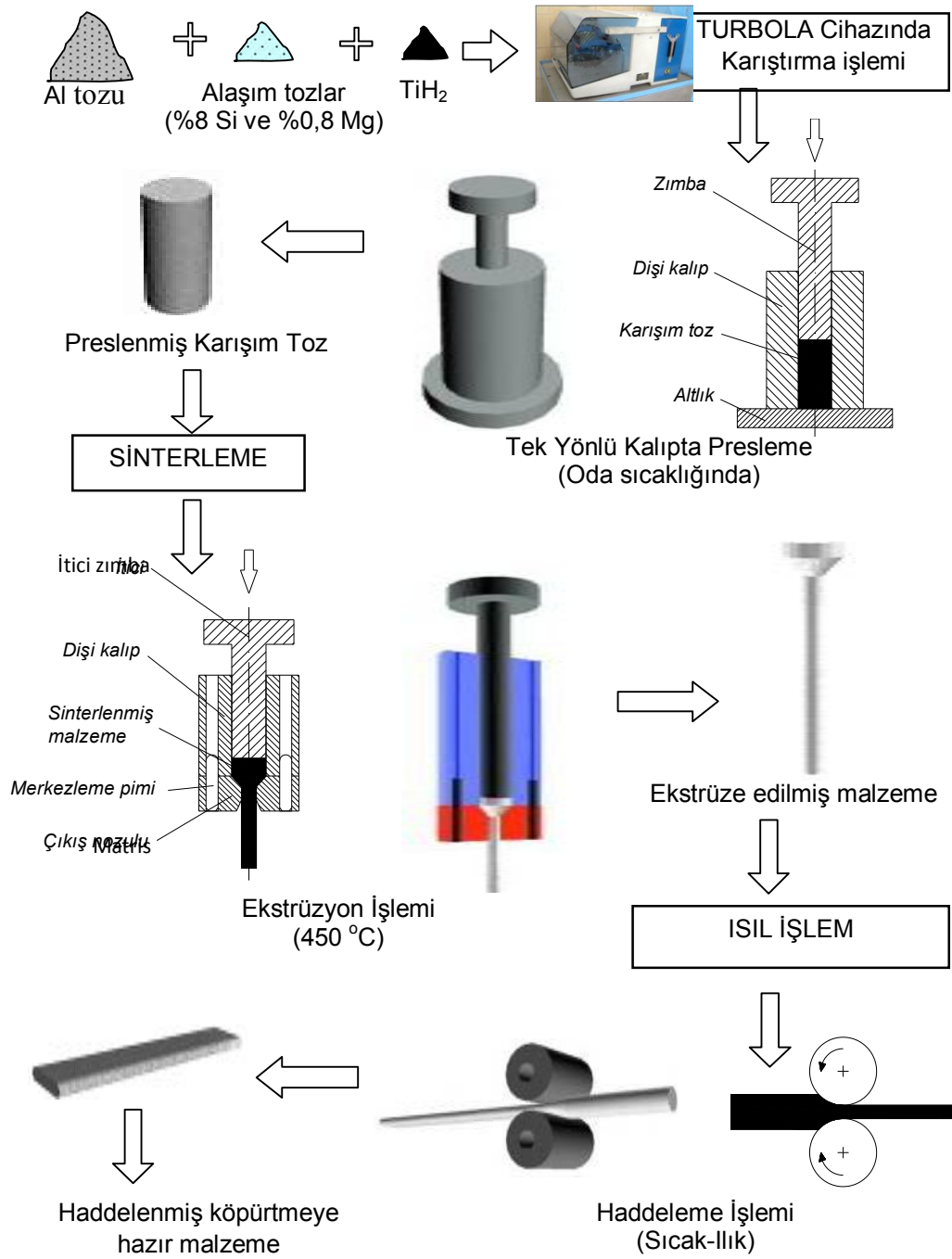
Mg ilavesiyle sağlanan dayanımdaki artışla birlikte köpürebilme kabiliyetindeki iyileşmede göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle, düşük miktarda ağırlıkça %0,8 Mg ve %8 oranındaki Si ilavesiyle sağlanan AlSiMg toz karışımı metalik köpük üretimi için uygun olarak belirlenmiştir.

4.2. Ön Malzeme (Preform) Üretim Yöntemi

Preform malzeme üretimi için Al, Si, Mg ve köpürtücü madde olarak TiH_2 tozları kullanılmıştır. Resim 4.1’de tozların Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntüleri gösterilmiştir. Gaz atomizasyon yöntemiyle üretilmiş Al tozları ECKA firmasından temin edilmiştir. 160 μm altı ve 150 μm altı tane boyutundaki Al ve Mg tozları düzensiz şekillidir (Resim 4.1.a-c). Si tozları 20 μm altı iken TiH_2 ise 44 μm (325 mesh) altı, köşeli ve açılı parçacık şekilli tozlar kullanılmıştır (Resim 4.1.b-d).



Resim 4.1. Metalik köpük üretiminde kullanılan tozların SEM görüntüleri; a) Al, b) Si, c) Mg ve d) TiH_2 .



şekil 4.2. Ön malzeme üretim işlem basamaklarının şematik gösterimi.

Toz metalurjisi yöntemiyle köpürtmeye hazır preform numuneler üretilmiştir. Tozların tartı işlemleri Sartorius marka 0,1 mg hassasiyetteki terazide yapılmıştır.

Çizelge 4.1’de gösterilen oranlarda 3 eksenli karıştırma cihazında (Turbola) 45 dakika süre ile karıştırılıp karışım tozlar hazırlanmıştır.

Çalışmalarda kullanılmak üzere diğer alaşım tozları oranı sabit olmak üzere TiH_2 , %0,8 ve %1,2 oranlarında kullanılarak K888 ve K8812 kodlu 2 farklı malzeme üretilmiştir. Çizelge 4.1’de kullanılan toz malzemelerin oranları, boyutları ve saflık oranları verilmiştir. Şekil 4.2’de ön malzeme üretiminin işlem basamakları şematik olarak gösterilmiştir.

Üretilen köpük malzemelerin yoğunluk ve hücre boyutuna göre kodlamaları yapılmıştır. İstenilen yoğunluk ve hücre boyutunda köpük üretebilmek için kullanılan işlem parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çalışmalarda kullanılan toz malzemelerin özellikleri ve köpürtme işlem parametreleri.

	Kimyasal içeriği (% ağırlıkça)				Köpük üretim işlemi			
	Al %99,9 saflıkta	Si %99,9 saflıkta	Mg % 99,95 saflıkta	TiH_2	Köpürme süresi (dak)	Preform kalınlığı (mm)	Köpürme sıcaklığı (Fırın Sıcaklığı) (°C)	İşlem
Toz tane boyutu (µm) Köpük malzeme kodu	< 160	< 20	< 149	< 44				
K88121	Kalan	8	0,8	1,2	21	10	720	Kalıpla birlikte ısıtma
K88122					13	9	760	Ön ısıtmalı kalıp içerisinde
K88123					14	8	720	
K88124					10	9	760	
K88125					16	10	720	
K88126					15	10	720	
K88127					18	9	720	
K88128					16	8	760	Kalıpla birlikte ısıtma
K8881				0,8	16	8	720	Ön ısıtmalı kalıp içerisinde

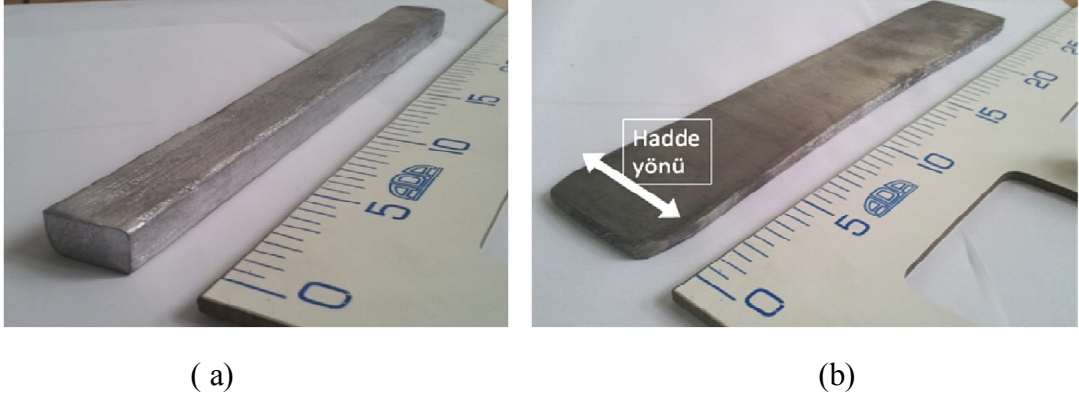
Karışım tozları oda sıcaklığında 300 MPa basınçta preslenerek 62 mm çapında 85 mm yükseklikte ham mukavemette silindirik blok numuneler üretilmiştir. Blok numunelerin 1 saat süre ile 500 °C’de sinterlenmesinin ardından 8:1 oranında 450 °C’de sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Ekstrüzyon oranı Eş. 4.1’deki formül ile hesaplanmıştır. 62 mm çapındaki silindirik numunelerden ekstrüzyon sonrası 25X15 mm ebatlarında dikdörtgen kesitinde preform malzemeler üretilmiştir (Resim 4.2.a).

Ekstrüzyon oranı (R);

$$R = \frac{A_0}{A_s} \quad (4.1)$$

A_0 = İlk takoz kesiti,

A_s = Çıkan ürün kesiti



Resim 4.2. a) Ekstrüze edilmiş ve b) haddelenmiş numune.

15 mm kalınlığında ekstrüze edilmiş numunelere Şekil 4.2.b’de gösterildiği yönde 8, 9 ve 10 mm kalınlıklara kadar 400 °C’de sıcak/ılık hadde işlemi uygulanarak, köpürmeye hazır levha biçimli preform numuneler üretilmiştir. Haddeleme öncesi kamara tipi fırında 400 °C’ye tavlanan ekstrüze numunelere başlangıçta sıcak haddeleme yapılırken işlem sonuna doğru numune sıcaklıkları ılık işlem sıcaklığına (~150-200 °C) kadar düşmüştür. Haddeleme sürecinde malzemede köpürme

gerçekleşmeyecek ve hadde deformasyonu esnasında pekleşme sebepli çatlaklar meydana gelmeyecek sıcaklık aralıklarında çalışılmıştır.

4.3. Köpürtme İşlemi

Köpürtme işlemi sırasında kontrol edilmesi zor değişkenler devreye girmektedir. Bunlardan iki tanesi değişen gözenek boyutları ve ona bağlı değişen ısıl iletkenliktir. Oluşan malzemenin yoğunluğu ve gözenekliliği arasında Eş. 4.2’de gösterildiği gibi bir eşitlik bulunmaktadır [Hegman ve Babcsan, 2005].

$$P = \frac{\left(V - \frac{m}{\rho}\right)}{V} = 1 - \frac{\rho^*}{\rho} \quad (4.2)$$

Burada p gözeneklilik, V köpük hacmini, ρ ve ρ^* sırasıyla preform malzeme ve köpük malzeme yoğunluğunu temsil etmektedir.

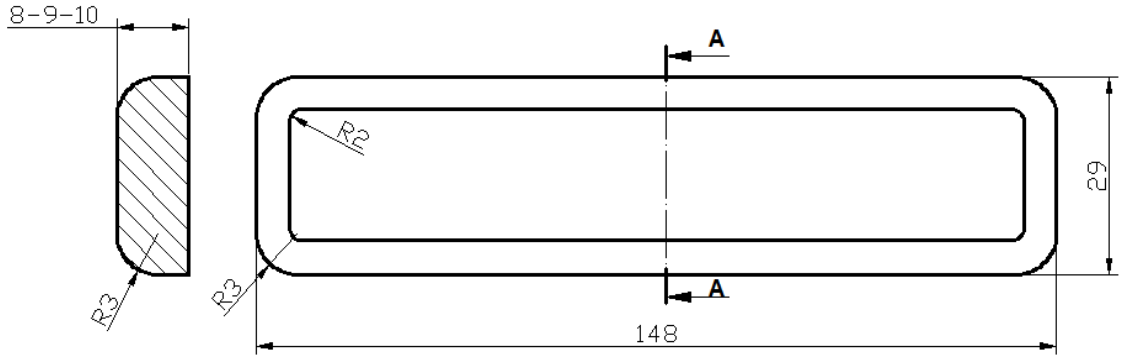
Isıl iletkenlik ve gözenek boyutu arasında birkaç yaklaşım bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan bir tanesi Eş. 4.3’te gösterilmektedir.

$$\lambda = p \lambda_{\text{gaz}} + (1-p) \lambda_{\text{katı}} \quad (4.3)$$

Burada λ paralel yöntem ısıl iletkenlik, λ_{gaz} , $\lambda_{\text{katı}}$ gaz ve katı ısıl iletkenliği sembolize etmektedir [Sullins ve Daryabeigi, 2001; Hegman ve Babcsan, 2005]. Her iki eşitlik (Eş. 4.2 ve Eş. 4.3) birbiri ile düşünüldüğünde köpürme esnasında içerde oluşan baloncuk boyutları değiştikçe hücre duvarlarındaki ısıl iletkenliğin de değiştiği düşünülebilir. Eş. 4.3’e göre düşünülecek olursa gözeneklilik (p) arttıkça gazın ısıl iletkenliği katı hücre duvarların iletkenliğine göre daha belirgin rol oynamaktadır.

Özellikle büyük kesitlere sahip preformlardaki bütün kesit ya da hacim boyunca ısı iletim farkı ve homojensizlik köpürme sürecinin de heterojenliğine sebep olmaktadır. İlk ısı girdisinin olduğu preformun kenar, alt ve üst yüzey bölgeleri ile orta bölgelerinin köpürme süreleri değişir. İlk ısı girdisinin preformun kenar ve yüzeylerinde başlattığı köpürme reaksiyonu ile oluşan içi hidrojen gazı dolu gözeneklerin ve hücre duvarlarının Eşitlik 4.3'te belirtilen ısı iletkenliğine bağlı olarak köpürme reaksiyonu iç bölgelere yayılır. Isı iletiminde yukarıda belirtilen etkenlerin meydana getirdiği homojensizlik, homojen köpürtme ve köpük üretme işlemine engel olur. Bu nedenle kalın kesitlerde üretilen köpük malzemelerde, kalınlık arttıkça homojen köpürme problemleri ortaya çıkar. Köpürme sürecindeki ısı iletimini kalıbın şekli, boyutu, ısı iletkenliği ve preformun iletkenliğinin belirlediği tespit edilmiştir [Degischer ve Kriszt, 2002].

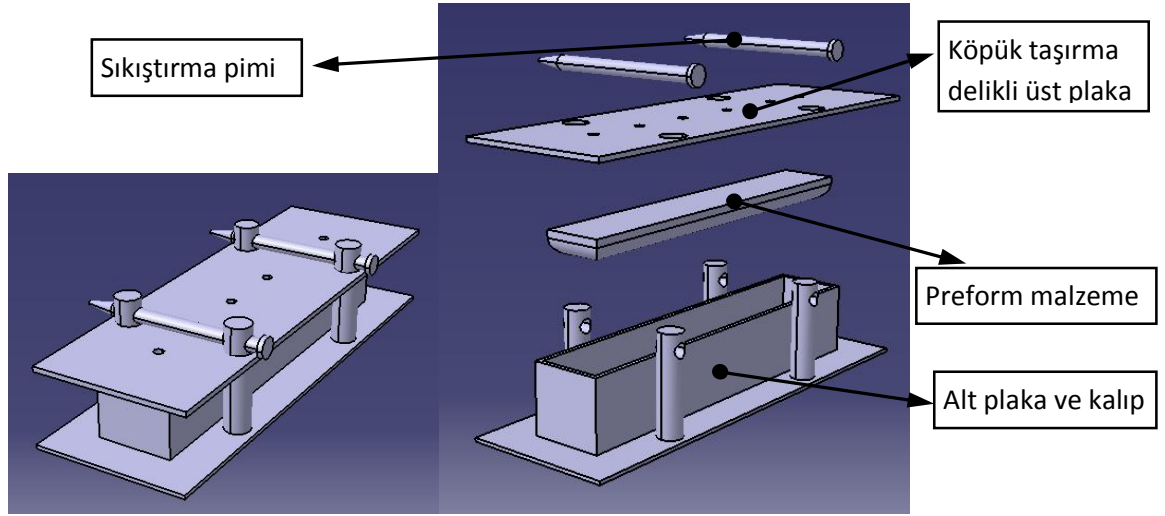
Haddelenmiş preform malzemeler kalıp ölçülerinde tesviye edilerek köpürtmeye hazır hale getirilmiş numune Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Köpürtme kalıbında kullanılan tesviye edilmiş preform malzeme.

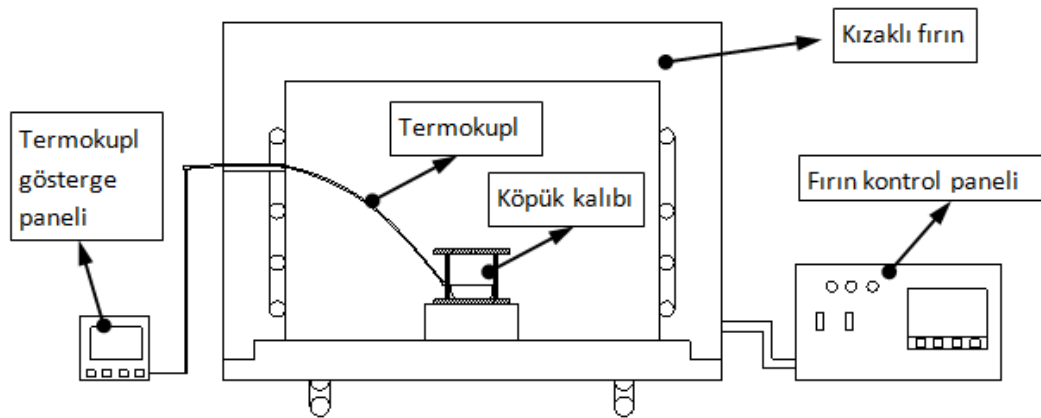
Köpürtme işlemleri, özel tasarlanan ve imal edilen mufel tipi $600 \times 600 \times 300 \text{ mm}^3$ kamara hacminde, alt tablası sürgülü hareket edebilen 13 kW gücündeki fırında yapılmıştır.

Şekil 4.4'te çelik malzemeden imal edilen köpük üretme ve şekillendirme kalıbının resmi verilmektedir.



Şekil 4.4. Köpürtme kalıbı.

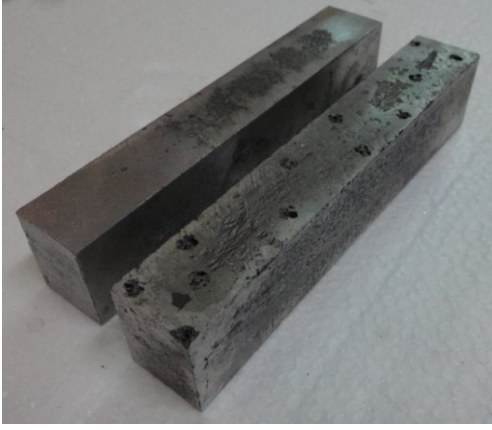
Preform levha malzemeler kalıp içerisine yerleştirildikten sonra 760 °C sıcaklığındaki fırın içerisinde köpürme gerçekleştirilmiştir. Köpürme sırasındaki kalıp sıcaklığı ve fırın sıcaklığının farklı olduğu tespit edilmiş ve Şekil 4.5'teki gibi sıcaklık ölçüm düzeneği hazırlanmıştır. En az üçer deneme yapılarak kalıp ve gösterge sıcaklık farkları tespit edilmiştir. 8, 9 ve 10 mm preform kalınlıklarında numuneler sırasıyla 660, 670 ve 680 °C kalıp sıcaklıklarında köpürtme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.5. Köpürme sıcaklığı tespiti deney düzeneği.

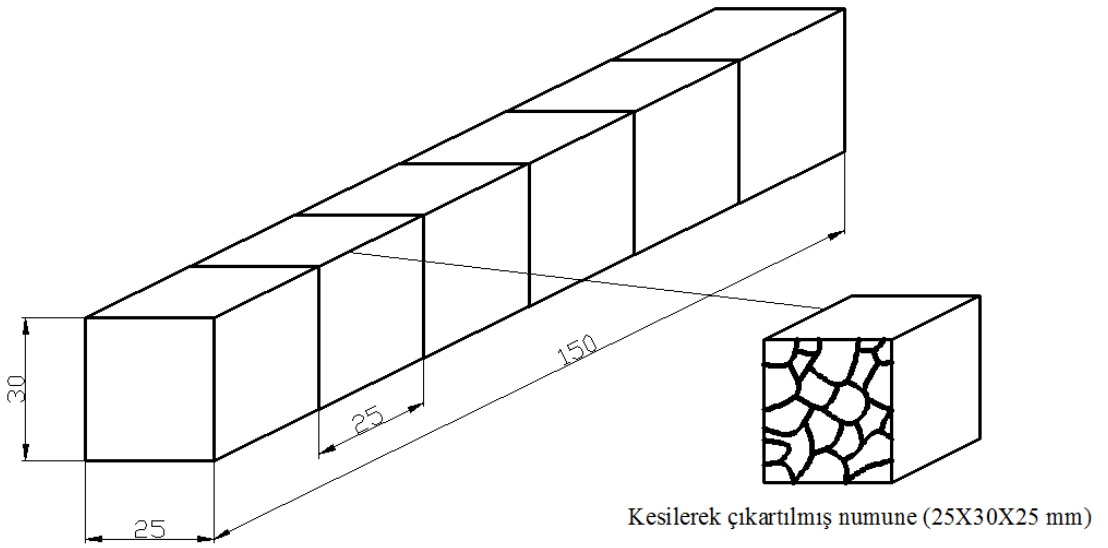
Ön ısıtmalı kalıpta köpürtme işleminde kalıp sıcaklığı ~400°C iken (harici termokupl ile ölçülmüştür) preform malzeme kalıp içerisine konularak Çizelge 4.1'de gösterilen

köpürtme sıcaklığında köpürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Köpürtme sıcaklığında belirli süre bekletildikten sonra kalıp boşluğunu dolduran metalik köpük, kalıpla birlikte fırından çıkartılarak sirkülasyonlu havada soğumaya bırakılmıştır. Soğuma tamamlandıktan sonra 150X30X25 mm boyutlarındaki metalik köpük malzeme kalıptan çıkartılmıştır (Resim 4.3).



Resim 4.3. Metalik köpük numuneler.

Blok halindeki köpük parça 25X30X25 mm boyutlarında Şekil 4.6'da gösterildiği gibi kesilerek basma deneyi ve fotostres deney numuneleri hazırlanmıştır. Blok numunelerin uçlarındaki parçalar deneylerde kullanılmamıştır.



Şekil 4.6. Üretilen köpük malzemenin numune ebatlarında kesilmesi.

4.4. Metalografik Çalışmalar

4.4.1. Preform ve köpük malzeme mikroyapı karakterizasyonu

Preform ve köpük malzeme mikroyapısı (Ekstrüze haldeki numune) optik mikroskop, SEM, EDS ve XRD aracılığıyla karakterize edilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde genellikle Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000 M marka optik mikroskop ve Jeol 6060 LV model tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Noktasal ve çizgisel elementsel analizler tarama elektron mikroskobuna bağlı IXRF marka EDS (enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Rigaku Ultima IV X-Işını Difraktometresi ile $5^{\circ} < 2\theta < 90^{\circ}$ tarama aralığı, $0,02^{\circ}/\text{dak}$ tarama hızı ve $\text{CuK}\alpha$ radyasyon ışınımı kullanılarak XRD analizi yapılmıştır.

4.4.2. Köpük malzeme makroyapı karakterizasyonu

Hücre şeklinin belirlenmesinde ve boyutunun ölçümünde köpük numunelerin 1:1 oranında tarama (scan) fotoğrafları alınarak görüntü analizi yapılmıştır. Hücre boyut hesabı iki boyutlu (2D) hücre çapı hesaplama yöntemi ile belirlenmiştir [Körner ve ark., 2005]. Köpük hücre boyutunun hesaplanmasında Eş 4.4'te verilen formül kullanılmıştır.

$$D_{2D} = \frac{2}{N} \sum_i \sqrt{\frac{A_i}{\pi}} \quad (4.4)$$

Burada, D_{2D} ; gözenek alanını, i ve N toplam gözenek sayısı, A köpük resmi üzerinden AutoCAD programıyla hesaplanan değerdir. A değerinin hesaplanması Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Köpük numune görüntüsü üzerinde AutoCAD programı ile alan oluşturma, alan ve çevre hesaplaması.

Köpük hücrelerinin küresellik derecesi iki boyutlu (2D) görüntü üzerinden şekil faktörü hesaplanarak belirlenmiştir. Eş 4.5'te verilen şekil faktörü formülü [Degischer ve Kriszt, 2002] kullanılmıştır,

$$\text{Şekil faktörü}(F) = \frac{4\pi}{n} \sum_i^n \frac{a_i}{l_i^2} \quad (4.5)$$

Burada, n ; toplam hücre sayısı, i hücre sayısı, a_i hücre alanı ve l_i hücre çevre uzunluğudur. a_i ve l_i köpük resmi üzerinden AutoCAD programıyla hesaplanan değerdir. Şekil faktörü değerinin 1 olması hücrenin tamamen küresel olduğunu gösterir. İdeal köpük yapısı için şekil faktörü yaklaşık 0,9 olduğu kabul edilir [Degischer ve Kriszt, 2002].

4.4.3. Hücre duvar kalınlıklarının ölçümü

EQ-MM500T-USB, MTI marka optik mikroskop yardımıyla köpük hücre duvar kalınlıkları her yoğunluk ve hücre boyutundaki malzemeler için ölçülmüştür. Ölçümler bilgisayara kurulu olan bir yazılımla yapılmıştır.

4.4.4. Yoğunluk ölçümü

Yoğunluk ölçümleri, preform (köpürtülmemiş) malzeme ve köpürtme sonrası malzemeler için ölçülmüştür. Preform malzemelerin yoğunluk ölçümleri Sartorius marka 0,0001 g hassasiyette ölçüm yapabilen dijital terazide Arşimet prensibi ile yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri suda yüzdürme (buoyancy) yöntemi ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk hesaplamalarında Eş 4.6'da verilen formül kullanılarak belirlenmiştir.

$$\frac{\rho_n}{\rho_{su}} = \frac{W_h}{W_h - W_{su}} \Rightarrow \rho_n = \left(\frac{W_h}{W_h - W_{su}} \right) \cdot \rho_{su} \quad (4.6)$$

Burada, ρ_n ; numunenin yoğunluğu, ρ_{su} ; oda sıcaklığındaki suyun yoğunluğu (0,9969038 g/cm³), W_h ; numunenin havadaki ağırlığı ve W_{su} ise numunenin su içerisindeki ağırlığıdır.

Köpük malzemelerin yoğunluğu ise numunelerin büyük olmalarından dolayı üretilen numunelerin havadaki ağırlıkları, sabit hacimli üretilen köpük hacmine bölünerek Eş. 4.7'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{m}{V_k} \quad (4.7)$$

Burada, ρ köpük yoğunluğunu, m köpük ağırlığı ve V_k köpük hacmini göstermektedir.

4.5. Basma Deneyi

Köpürtülen numunelere basma deneyi Instron 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip universal test cihazında oda sıcaklığında yapılmıştır. Testlerde hareketli başlık hızı 0,2 mm/dak seçilmiştir. Gerilme ve yer değişim değerleri deney

sırasında basma cihazına bağlı bilgisayardan hem grafik hemde veri olarak elde edilmiştir. Aynı grup numunelerden en az üç numune deneye tabi tutulmuş ve deney sonuçlarının ortalama değere denk numune değerleri kullanılmıştır.

Köpük parçalar üzerine uygulanan yüklemeler sonrası hücre duvarlarındaki deformasyonlar gözlenmiştir. 25X30X25 mm boyutlarındaki karşılıklı iki yüzeyi açık köpük numuneler kullanılmıştır. Şekil değişiklikleri Sony marka kamera aracılığıyla görüntülenmiştir. Deneyler sırasında sürekli yükleme ile köpük genelinde meydana gelen ilk hücre kırılmaları ve çökmeler gözlenmiştir.

4.5.1. Elastikiyet modülü ve basma gerilmesi hesaplamaları

Köpük malzemelerin üretimi sırasında tamamen kontrol edilemeyen içyapısı sebebiyle aynı kimyasal kompozisyona sahip farklı köpük parçalar içinde mekanik özelliklerin aynı olduğunu söyleyemeyiz. Literatürdeki deneysel çalışmalar kapalı hücreli köpüklerin birbirinden oldukça farklı özellikler gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Hücrelerin şekil değişimi sırasında gözenek duvarları hem eğilir hem de genişler veya bozular. Gibson ve Ashby'nin (1997) geliştirdiği kübik hücre modeli yaklaşımına göre gözenekli malzemelerin elastik modülleri ve plato gerilmeleri ile yoğunlukları Eş. 4.8 ve Eş. 4.9'de gösterildiği gibi ilişkilendirilmiştir.

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \phi) \frac{\rho^*}{\rho_s} + \frac{P_0(1-2\nu^*)}{E_s(1-\rho^*/\rho_s)} \quad (4.8)$$

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} \approx 0,3\phi^{3/2} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + 0,4(1-\phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) + \frac{P_0 - P_{at}}{\sigma_{ys}} \quad (4.9)$$

Burada, E^* ; gözenekli malzemenin elastik modülü, E_s gözenekli malzemenin hücre duvarlarını oluşturan malzemenin elastik modülünü, σ_{pl}^* plato gerilmesi, σ_{ys} gözenekli malzemenin hücre duvarlarını oluşturan malzemenin akma gerilmesi, ρ^* gözenekli malzemenin yoğunluğu, ρ_s malzemenin yoğunluğu, ϕ kapalı gözenekli

malzemelerde gözenek duvarlarındaki katı oranı, P_0 atmosferik basıncı ifade etmektedir. Basınç değeri atmosfer basıncına eşit olduğu durumlarda Eş 4.10 ve Eş 4.11' da verildiği gibi eşitlik kullanılmaktadır [Gibson ve Ashby., 1997, Kim ve ark., 2003].

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + C_1' (1-\phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (4.10)$$

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_2 \phi^{3/2} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C_2' (1-\phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (4.11)$$

Burada, C_1 , C_1' , C_2 ve C_2' hücre geometrisine bağlı sabitler. Düzenli altıgen (bal peteği) kapalı hücreli köpük malzemelerde plato sınırları şekli, $C_1=C_2=1$ olarak vermektedir [Andrews ve ark., 1999, Gibson ve Ashby., 1997]. Bu durumda Eş 4.12 ve Eş. 4.13'deki gibi olmaktadır.

$$\frac{E^*}{E_s} = \phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + (1-\phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (4.12)$$

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = 0,3 \phi^{3/2} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + (1-\phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (4.13)$$

Düz yüzeye sahip bir birim ondört yüzlü polihedron (tetrakaidekahedral) (3D) kapalı hücrenin sonlu elemanlar simülasyonu ile hesaplandığında Eş 4.14 ve Eş 4.15'te verildiği gibi gösterilmiştir [Simone ve ark., 1998, Andrews ve ark., 1999, Raj ve Daniel, 2008].

$$\frac{E^*}{E_s} = 0,32 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + 0,32 \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (4.14)$$

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = 0,33 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + 0,44 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (4.15)$$

Bu eşitliklerde görüldüğü gibi göreceli yoğunluk Al köpüklerin mekanik özelliklerinde çok önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Köpük üretiminde en önemli sorun homojen yoğunluklu köpük üretimi gerçekleştirmektir. Genel olarak köpük yoğunluğu kontrol edilebilir. Fakat bölgesel olarak; eşit olmayan ısıtma oranı ve köpük hacim sıcaklık dağılımı, gözenek şekil anizotropisi ve yapısal kusurların neredeyse bunu imkansız kıldığı söylenir [Kim ve ark., 2003, Koza ve ark., 2003].

Raj ve Daniel (2008) yaptıkları çalışmada Regresyon analizi yapmışlardır. Gibson ve Ashby tarafından verilen düzenli altıgen kapalı hücre köpük elastik modülü modelinde eksiklik olduğunu belirtmişlerdir. Bu model iki bölümden oluşur. $(\rho^* / \rho_s)^2$ ve (ρ^* / ρ_s) sırasıyla hücre kenar ve hücre yüzey etkileri temsil eder (Eş 4.12). Ancak, Regresyon analizinde hücre yüzey etkisine (ρ^* / ρ_s) teriminin tekrar dahil edilmesini önemsiz bulmuşlardır. Eş 4.17’te verilen göreceli yoğunluğun karesi kullanıldığında elastikiyet modülü en iyi korelasyon katsayısı ile regresyon modeli elde etmişlerdir. Buna göre hücrenin kenar etkileri, hücre yüzey etkilerinden daha fazla önemli olduğunu belirtmişlerdir. Buna ek olarak, Gibson ve Ashby’nin modülünde mekanik özelliklere hücre boyutunun ve hücre anizotropisinin etkisini dahil etmediğini belirtmişlerdir [Raj ve Daniel (2008)]. Bu nedenle Eş 4.16 ve Eş 4.17’deki formülleri oluşturmuşlardır.

Köpüğün plato gerilmesi;

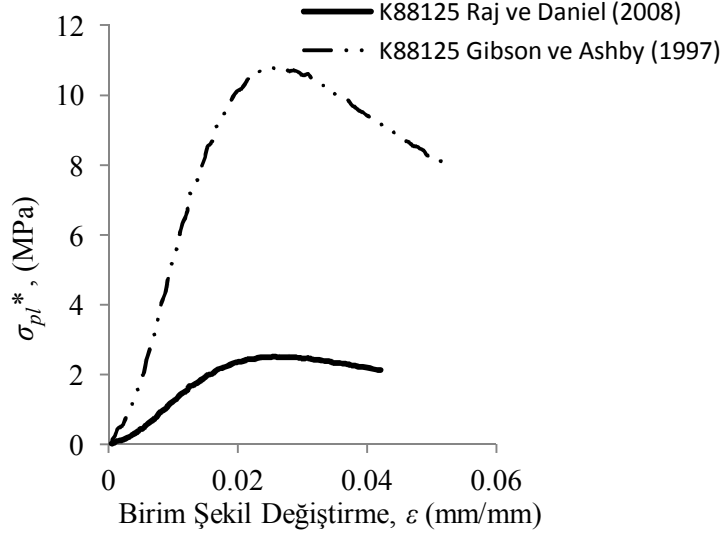
$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = 0,126465 + 2,241373 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} - 2,11381 \left(\frac{d}{D} \right) - 0,08403 \left(\frac{K}{K_p} \right) \quad (4.16)$$

Burada; D pota çapı, d ortalama hücre çapı, K hücre anizotropi oranı, K_p ideal hücre anizotropi oranı belirtmektedir. d/D oranı hücre çapı etkisini, K/K_p hücre anizotropi etkisini göstermektedir.

Köpüğün elastikiyet modülü;

$$\frac{E^*}{E_s} = 0,0019 + 0,204548 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + 0,037841 \left(\frac{d}{D} \right) - 0,00136 \left(\frac{K}{K_p} \right) \quad (4.17)$$

Yapılan basma testi verileri kullanarak E^*/E_s oranı için Eş 4.12 ve Eş 4.17, $\sigma_{pl}^*/\sigma_{ys}$ oranı için Eş 4.13 ve Eş 4.16 hesaplamaları her iki yaklaşım için yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 4.8’de Gibson ve Raj yazarların oluşturdukları formüller kullanılarak σ - ϵ eğrileri oluşturulmuştur. Karşılaştırma için yoğunluğu $0,65 \text{ g/cm}^3$ K88125 köpük malzeme kullanılmıştır. Her iki formülde de aynı yoğunluk kullanılmasına rağmen metalik köpük malzeme hücrelerinin farklı şekil ve hücre boyutlarının plato gerilmesinde meydana getirdiği farklılık açıkça görülmektedir.



Şekil 4.8. K88125 metalik köpük malzemede Eş 4.13 ve Eş 4.16 kullanılarak hesaplanan σ_{pl}^* , köpük plato akma gerilmesi.

Gibson ve Ashby'nin (1997) geliştirdikleri eşitliklerden elde edilen veriler Raj ve Daniel (2008) elde edilen sonuçlardan oldukça yüksek plato gerilme değerleri vermiştir. K88125 köpük malzemenin Eş 4.13 ile hesaplanan plato akma gerilmesi Eş 4.16 ile hesaplanan plato gerilmesinin yaklaşık dört katı kadar fazladır. Raj ve Daniel'in hücre boyutunu hesaplamalara ilave etmesi bu farkı oluşturmuştur. Burada Eş 4.16'da $(\rho^*/\rho_s)^{3/2}$ değeri hücre duvarı etkisini ifade etmektedir. Hücre duvarı etkisine, hücre boyutu (d/D) ve şekil faktörü/ideal şekil faktörünün (K/K_p) negatif etkisi plato akma gerilmesini daha kabul edilebilir aralıklara getirmiştir [Raj ve Daniel, 2008].

Ayrıca elastikiyet modülü hesaplamalarında Eş 4.12 ve Eş 4.17 kullanılarak kıyaslama yapılmıştır. K88125 köpük malzemenin elastikiyet modülü Eş 4.12'a göre hesaplandığında 7,01 GPa bulunurken, Eş 4.17'e göre 1,27 GPa sonucuna ulaşılmaktadır. Bu arada oluşan büyük gerilme farkının sebebi hücre boyutu ve şekil faktörü olduğu belirlenmiştir.

Literatür ve deneysel deneyimlere dayanılarak köpük malzemelerin plato gerilmesi ve elastikiyet modülleri sadece yoğunluk değerleri ile değil hücre şekli, hücre boyutu ile alakalı olduğu benimsenmiştir. Yapılan çalışmalarda Raj ve Daniel (2008) oluşturdukları ampirik formüller kullanılmıştır.

4.6. Fotoelastisite Deneyi

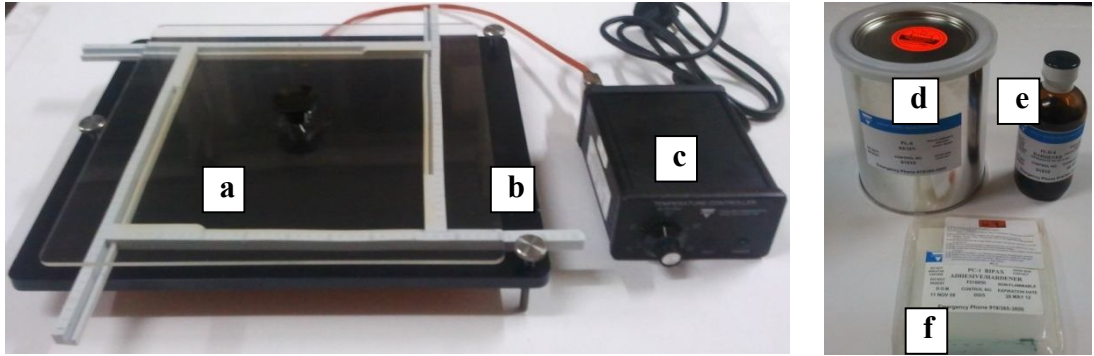
4.6.1. Fotoelastik kaplama hazırlanması ve yapıştırma

Bu çalışmada, köpük hücre duvarlarındaki gerilmeleri tespit edebilmek için fotoelastisite tekniğinden faydalanılmıştır. Metal malzemeler için önerilen, PL-8 (Reçine) ve PLH-8 (Sertleştirici) fotoelastik kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. Kaplama malzemesini gerilme tayini yapılacak malzemeye yapıştırmak için ise PC-1 BIPAX (Reçine/Sertleştirici) kullanılmıştır [Vishay IB-221-D, 2010; Vishay B-236-5, 2010]. PL-8'in bazı fiziksel özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. PL-8 fotoelastik reçinenin bazı fiziksel özellikleri [Vishay B-236-5, 2010].

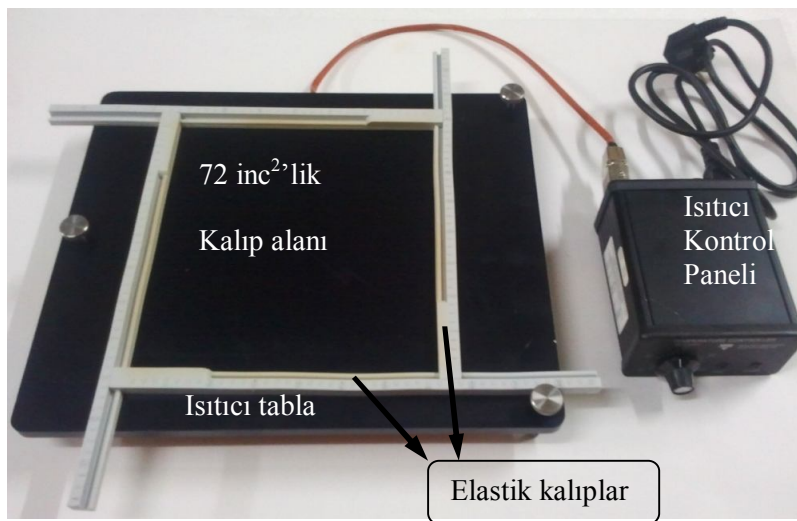
Uzama oranı (GPa)	% 3–5
Optik gerilme katsayısı (K)	0,08
Poisson katsayısı	0,36
Kaplama malzemesi yoğunluğu (g/ inç ²)	18,5
Elastik modülü (GPa)	2,9
Hassas olduğu sıcaklık (°C)	70
Kullanılabilen maksimum sıcaklık (°C)	205

Resim 4.4'te Fotoelastisite tekniğinde kullanılan kaplama hazırlamada kullanılacak cihaz ve sarf malzemelerin resmi gösterilmiştir. Hazırlama işleminde yardımcı olarak hassas terazi, ısıtıcı, termometre, laboratuvar eldiveni, tahta karıştırıcı, aseton, gazlı bez, şeffaf teflon plaka, plastik ve kâğıt bardak araç ve gereçleri kullanılmıştır.



Resim 4.4. Kaplama malzemesi üretimde kullanılan cihaz ve malzemeler; a) Şeffaf kapak, b) Isıtıcı tabla ve kalıplama kenarlıkları, c) Isıtıcı kontrol ünitesi, d) Reçine (PL-8), e) Sertleştirici (PLH-8), f) PC-1 BIPAX Reçine/Sertleştirici aç kullan paket.

Kaplama malzemesi hazırlamak için önce ısıtıcı tabla düzeneği kurularak zemine paralel olacak şekilde teraziye alınmıştır. Isıtıcı tabla üzeri ayırıcı kimyasal (Relaensing Agent) ile yağlanarak üzerine seffaf teflon plaka yerleştirilmiştir. Sıvı kaplama malzemesinin teflon plakaya yapışmaması ve kolay ayrılması için teflon tabakanın üzeri de ayırıcı kimyasal ile yağlanmıştır. Isıtıcı tablanın sıcaklığı 37 °C'ye ayarlanmış ve bu sıcaklıkta sabitlenmiştir [Vishay IB-221-D, 2010; Vishay B-236-5, 2010]. Isıtıcı tabla üzerinde kaplama malzemesi kalınlığı (1 inç) için hesaplanan genişlik ve uzunlukta elastik parçalarla kalıp hazırlanmıştır (Resim 4.5).



Resim 4.5. Kaplama malzemesi hazırlama düzeneği.

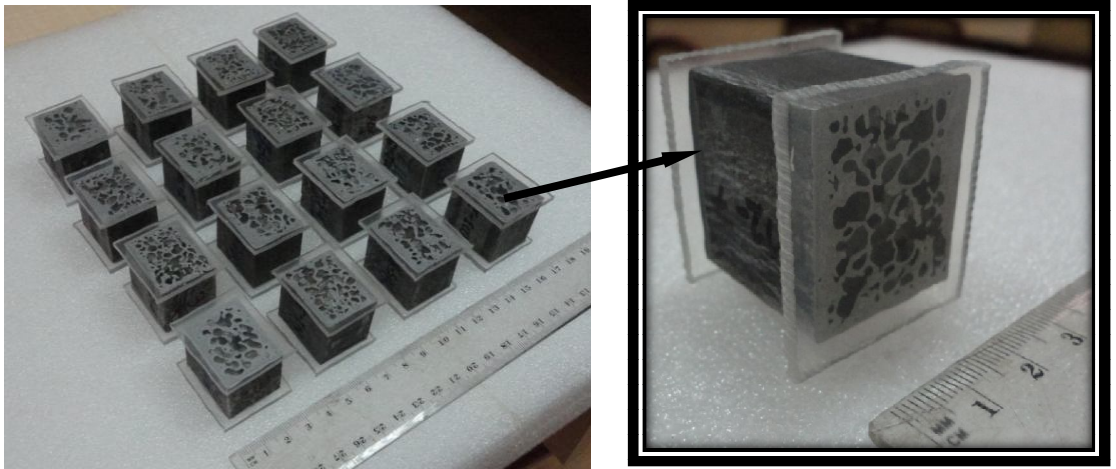
Kaplama malzemesinin miktarının hesaplanmasında Eş. 4.18 kullanılmıştır [Vishay B-236-5, 2010],

$$W = 18.5 \times A \times t \quad (4.18)$$

Burada, W; toplam alana gelecek kaplama miktarı, A; alan (en x boy), t; istenilen kalınlık, kaplama yoğunluğu; 18,5 g/inç³'tür.

Kaplama malzemesi, 72 inç³ hacim için hazırlanmıştır. Köşelerde oluşabilecek hatalı kısımları daha sonra kesip çıkarabilmek için bir miktar fazla üretilmiştir. Bunun için 115 gr PL-8 ve 20 g PLH-8 kullanılmıştır. PL-8 ve PLH-8 aynı kapta karışım sıcaklığının ekzotermik reaksiyon ile 52 °C'ye çıkana kadar karıştırma işlemi devam etmiştir. Üretilen kaplama malzemesi ısıtıcı tablanın üzerindeki kalıp içerisine dökülüp, katılaşması için 24 saat beklenmiştir. Katılaşan kaplama malzemesi 29x34 mm ebatlarında kesilerek yapıştırma işlemine hazır hale getirilmiştir.

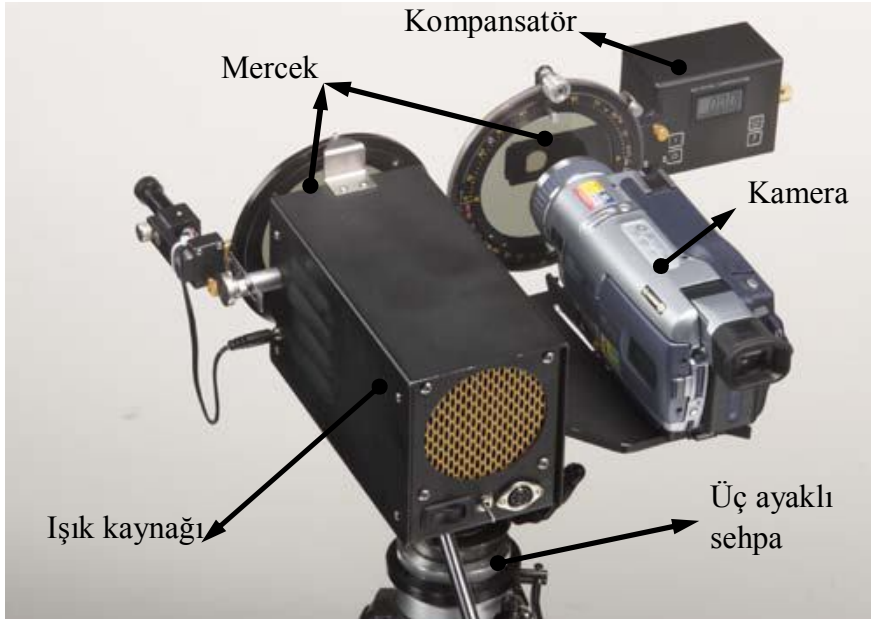
Kaplamanın kesilen köpük yüzeyine yapıştırılması için köpük yüzeyleri temizlenmiştir. PC-1 BIPAX aç kullan paket karıştırıldıktan sonra yüzeye sürülerek kaplama köpük yüzeyine yapıştırılmıştır ve katılaşması beklenmiştir. Resim 4.6'da yapıştırılan numunenin fotoğrafı gösterilmiştir.



Resim 4.6. Fotoelastik kaplama yapıştırılmış köpük malzeme.

4.6.2. Fotoelastisite Cihazı

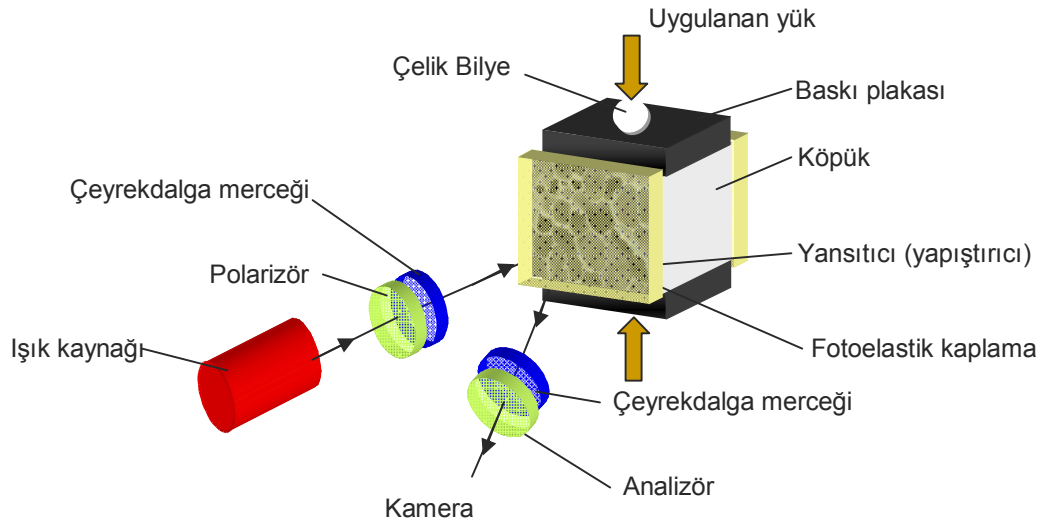
Görüntülemesi yapılacak numunelere kaplama malzemesi yapıştırıldıktan sonra Resim 4.7’de gösterilen LF/Z-2 model polariskop (fotoelastisite cihazı) kullanılarak fotostres görüntüleri alınmıştır.



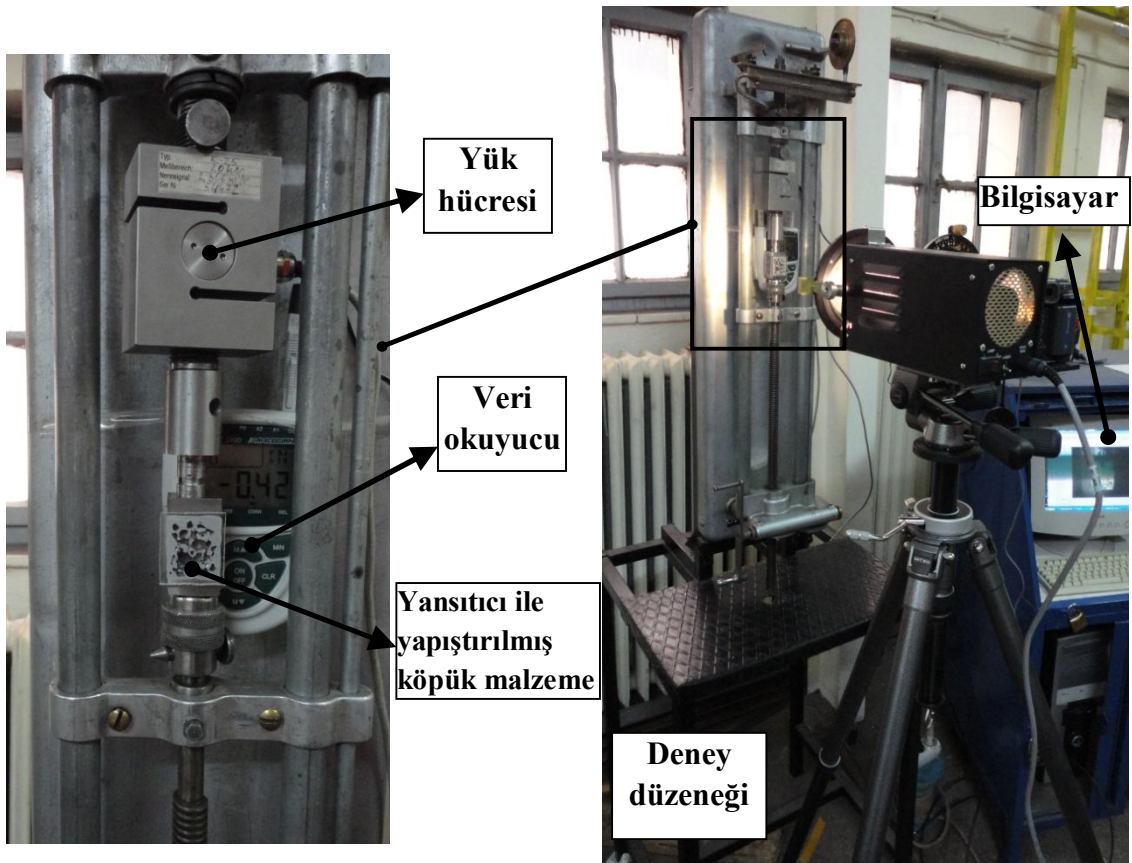
Resim 4.7. LF/Z-2 model polariskop.

4.6.3. Fotoelastisite deney setinin hazırlanması

Şekil 4.9’da fotostres deney düzeneğinin şematik olarak gösterilmiştir. Köpük malzemelerin baskı yapılacak yüzeylere homojen yük dağılımı sağlanması için üst baskı plakasına yük iletimi çelik bilye ile yapılmıştır. Dikey pozisyonda çekme/basma yapabilen 10 kN kapasiteli kolla hareket verilen sistem kullanılmıştır (Resim 4.8). Ahlborn/Almemo 2490-2L veri okuyucusuna bağlı yük algılayıcısı (Load Cell) ile yükler ölçülmüştür. Resim 4.8’de görüldüğü gibi yansıtıcı ile yapıştırılan köpük parçalar sisteme yerleştirilerek fotostres görüntüleri alınmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.9. Fotostres deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi.

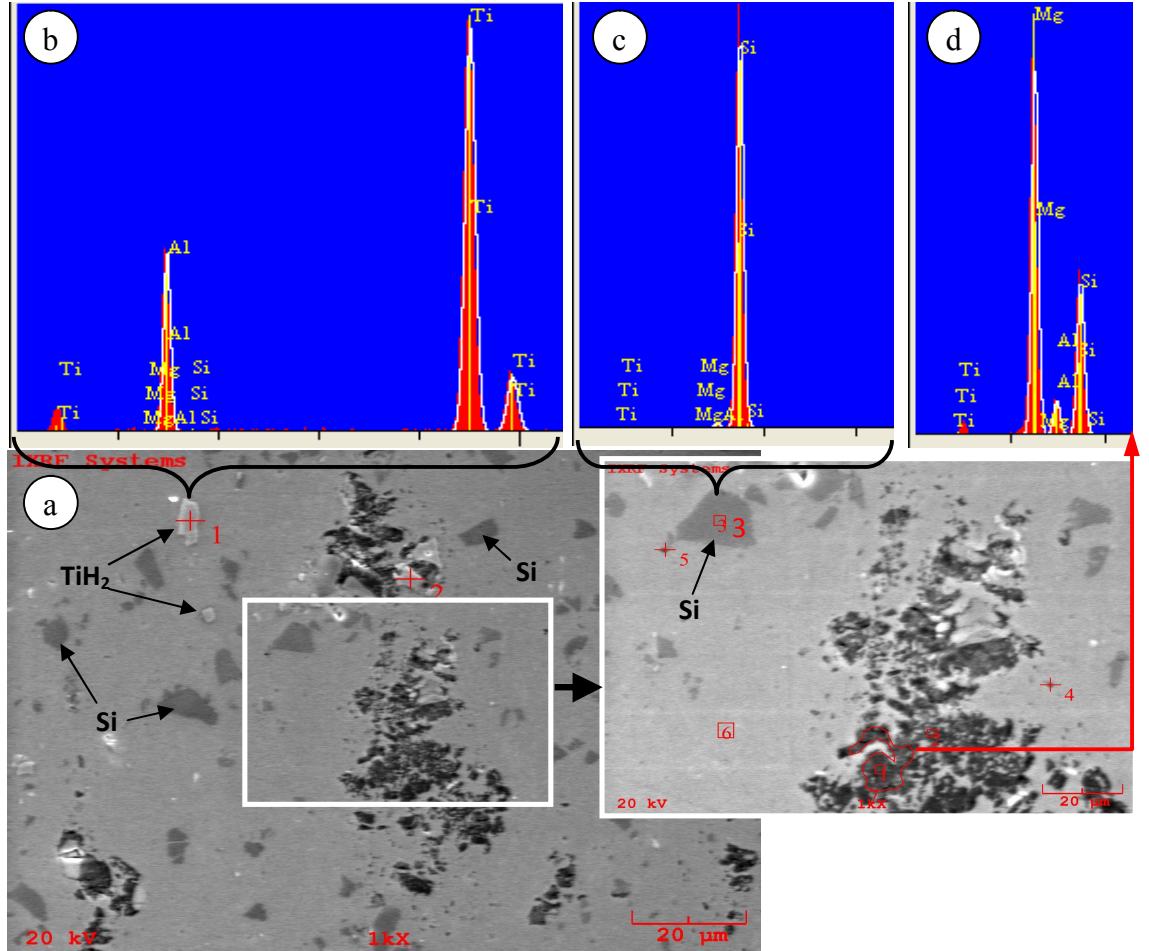


Resim 4.8. Fotoelastisite deney seti.

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Preform Malzemenin Mikroyapı Karakterizasyonu

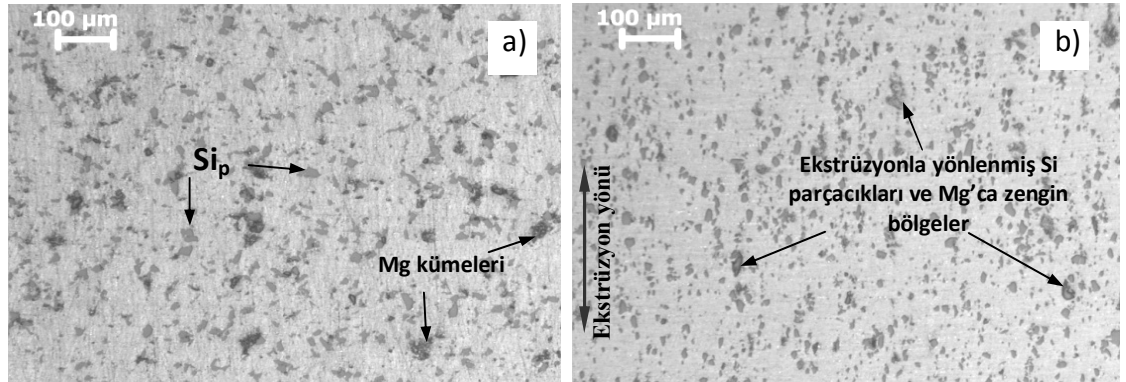
Şekil 5.1’de Sinterlenmiş ve ekstrüze edilmiş AlSiMg alaşımı malzemenin Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntüsü ve EDS analiz sonuçları verilmiştir. Ana SEM fotoğrafında (Şekil 5.1.a) “1” numara ile EDS kodlaması yapılan açık gri renkli parçacığın ağırlıkça %78 oranında Ti içerdiği ve bu parçacıkların TiH_2 parçacıkları olduğu belirlenmiştir. Zira boyutsal olarak karışım sürecinde kullanılan TiH_2 parçacıkları $<44\mu m$ altı boyutlarındadır.



Şekil 5.1. a) Ekstrüze numune SEM görüntüsü, b) TiH_2 parçacığı EDS analiz sonucu, c) Birincil Si parçacığı EDS analiz sonucu ve d) Mg’ca zengin bölge EDS analiz sonucu.

Kümeleşmiş bölgenin büyütülmüş fotoğrafında verilen “3” nolu koyu gri renkli parçacıklar ise Si parçacıklarıdır. Kümeleşmiş bölge içinde tanımlanan bir alanın ise yoğun olarak Mg içerdiği görülmektedir.

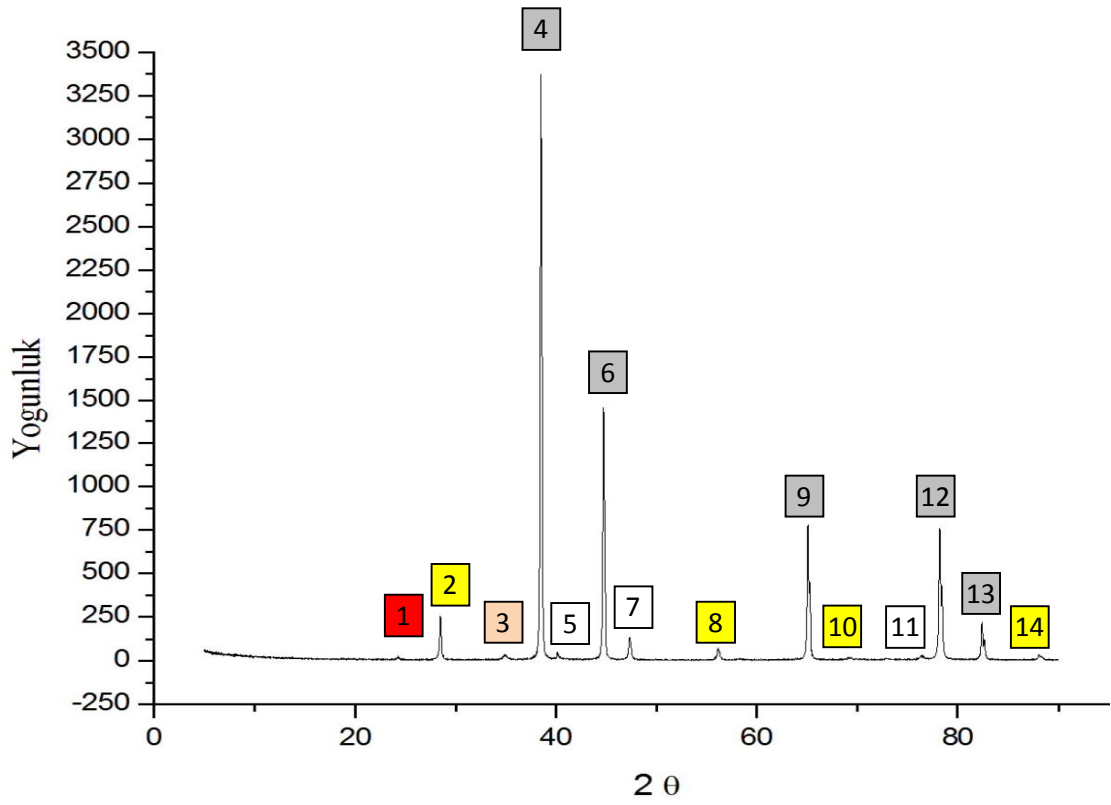
Sinterlenmiş ve ekstrüze edilmiş numunelerin mikroyapıları Resim 5.1’de görülmektedir. Sinterleme sonrası mikroyapıda Si ve Mg partiküllerinin Al matris içerisinde genel olarak homojen dağılımlı olduğu söylenebilir (Resim 5.1.a). Ancak, ekstrüze edilmiş numunede, ekstrüzyonla oluşturulan deformasyonun etkisiyle, ekstrüzyon doğrultusunda Si, Mg ve TiH_2 parçacıklarının yönlendiği açıkça görülmektedir (Resim 5.1.b). Ekstrüze numunelerin XRD analizi sonucunda kısmen de olsa Mg’ca zengin bölgelerde Mg_2Si intermetalik fazının oluştuğu düşünülmektedir (Şekil 5.2). Zajac ve ark. (1996) yaptıkları çalışmada, Al-Si-Mg alaşımlarında soğuma koşullarına bağlı olarak iki farklı Mg_2Si fazı oluştuğunu belirtmişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda, 400-500 °C aralığında Mg_2Si kübik β - fazı ve 400 °C altındaki sıcaklıklarda hegzagonal kristal yapıdaki metastabil β' - olarak çökeldiğini belirlemişlerdir. Hızlı soğutulan biyetlerde silisyum ve magnezyum çökelti oluşturmada yapı içinde tutulurlar, bu durum ekstrüzyon sıcaklığında yüksek deformasyon direncine sebep olur. Yavaş soğuma esnasında kaba β - Mg_2Si çökeltileri oluşur, bu kaba çökeltiler yüksek sıcaklıklarda kararlıdır ve ekstrüzyon esnasında çözünmeleri zordur [Zajac ve ark., 1996].



Resim 5.1. a) Sinterlenmiş numune, b) Ekstrüze edilmiş numune mikroyapısı.

Resim 5.1.a-b’de gösterilen mikroyapı resminde belirgin bir gözeneklilik mevcut değildir. Üretilen blok numunelerin teorik yoğunluğu $2,68 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Sinterlenmiş numunelerin Arşimet yöntemiyle ölçülen yoğunluğu ise $2,60 \text{ g/cm}^3$ tür. Sinterlenmiş numune yoğunluğunun teorik yoğunluğa oranı % 97 dir. Sinterlenen malzemeye uygulanan sıcak ekstrüzyonla uygulanan deformasyon sonrası yoğunluk $2,65 \text{ g/cm}^3$ ’e yükselmiş ve % 99 a varan yoğunluk sağlanmıştır. Ekstrüzyon sonrası haddeleme işlemi ile numunelerin yoğunlukları $2,66 \text{ g/cm}^3$ ölçülmüştür. Bu durumda ulaşılan maksimum yoğunluk ise % 99,3 tür.

Alüminyum ekstrüzyon uygulamalarında önceden ısıtılmış bir kalıp içerisine sıcak numune yüklendiğinde karmaşık ısıl değişimler başlar. Ekstrüzyon esnasındaki değişiklikler, numune sıcaklığı, numuneden kalıba olan ısı transferi, deformasyon ve sürtünme ile ortaya çıkan ısıya bağlıdır. Ekstrüze edilen diğer metallerle karşılaştırıldıklarında alüminyum, kayma akışında önemli bir farka sahiptir. Bu fark en önce numunenin merkezinin ekstrüzyon olması ve daha da şiddetli kayma deformasyonlarına sebep olan dış sınır tabakanın daha sonra akmasıdır. Numune alıcı yüzeyine bastırmak için gereken kuvvet numune malzemesinin kayma gerilmesini aştığı anda yapışma sürtünmesi meydana gelir ve numune kayma vasıtasıyla deformasyona uğrar [Saha, 2000]. Yapılan ekstrüzyon işleminde benzer şekildeki deformasyonla şekillenen ürün sıcaklığı artar. Artan sıcaklık ile birlikte TiH_2 ’nin bir kısmı ayrışarak yapı içerisinde Ti elementi serbest kalır. Bu ısıl etki sebebiyle ekstrüze numunede $\beta\text{-Mg}_2\text{Si}$ fazı oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 5.2’de gösterilen XRD analizindeki 1, 5 ve 7 numaralı piklerle gösterilen bu intermetaliğin eser miktarda da olsa ekstrüze numunede kübik yapılu Mg_2Si çökeltisi oluşturduğunu göstermektedir.

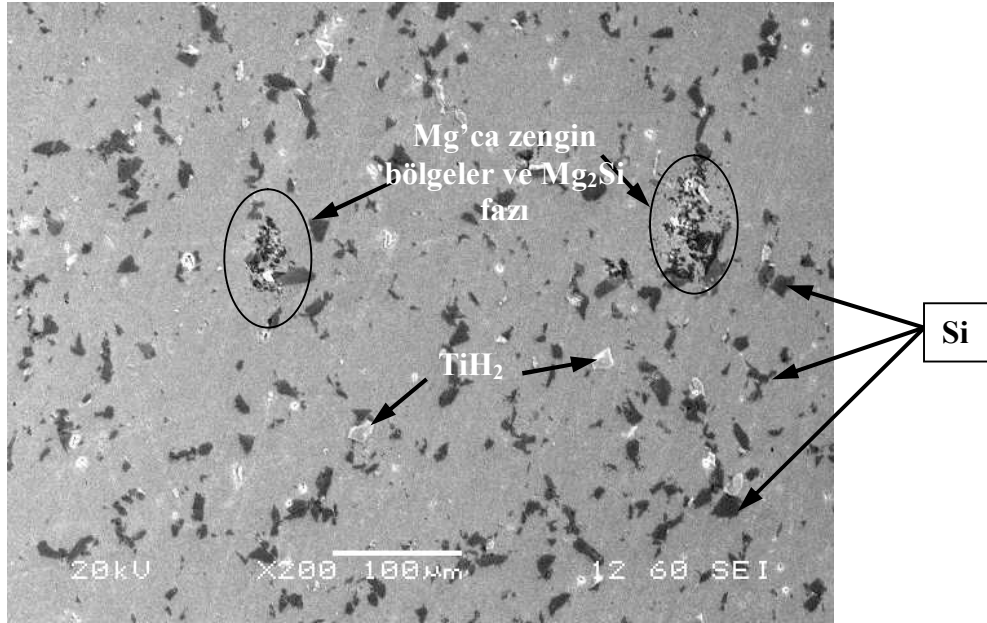


Pik no	Faz	Analiz sonucu		ICDD (PDF data)		Kafes yapısı
		2 θ	Int.	2 θ	Int.	
1	Mg ₂ Si	24.22	18.333	24.24	41	Kübik
2	Si	28.458	256.667	28.443	100	Kübik
3	Ti	34.952	36.25	35.09	25	Hegzagonal
4	Al	38.484	3373.75	38.47	100	Kübik
5	Mg ₂ Si	40.14	50	40.12	100	Kübik
	Ti	40.14	50	40.17	100	Hegzagonal
6	Al	44.73	1457.92	44.73	47	Kübik
7	Si	47.32	136.25	47.30	55	Kübik
	Mg ₂ Si	47.32	136.25	47.43	15	Kübik
8	Si	56.12	71.6667	56.122	30	Kübik
9	Al	65.1	778.333	65.13	22	Kübik
10	Si	69.11	22.08	69.13	6	Kübik
11	Si	76.39	30.83	76.38	11	Kübik
	Ti	76.39	30.83	76.218	9	Hegzagonal
12	Al	78.23	758.333	78.227	24	Kübik
13	Al	82.43	213.75	82.435	7	Kübik
14	Si	88.04	39.16	88.029	12	Kübik

Al
 Si
 β -Mg₂Si
 Ti
 İki faz çakışık pik

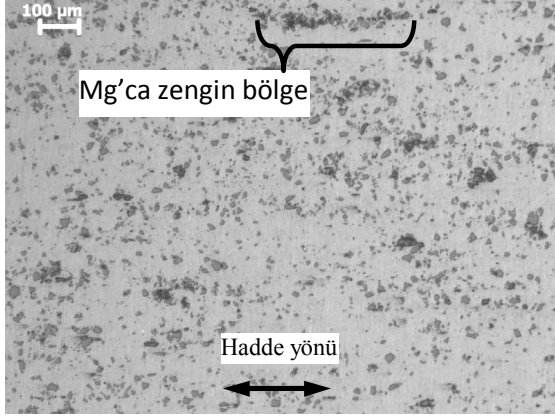
Şekil 5.2. Ekstrüze numunenin XRD analiz sonucu.

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen ve ekstrüze edilen numune SEM görüntüsü Resim 5.2’de verilmiştir. Açık gri renkte görünen parçacıklar TiH_2 ’yi siyah parçacıklar ise Si’u göstermektedir. Çember içine alınmış bazı bölgelerde ise Şekil 5.1’de verilmiş olan analiz sonuçlarından da görülebileceği gibi Mg’ca zengin bölgelerdir. Bu sebeple Al matris içerisinde gösterilen bu bölgelerdeki siyah partiküllerin ekstrüzyon sürecinde parçalanmış Mg partiküllerini ve Mg_2Si çökeltilerini içerdiği düşünülmektedir. Deformasyon işlemlerinin TiH_2 ’ün homojen dağılımına etkisi olmadığı belirlenmiştir. TiH_2 hem Al matris hem de Mg, Si partiküllerinin çevresinde homojen olarak dağıldığı gözlenmiştir.



Resim 5.2. Ekstrüze preform malzemede genel parçacık dağılımları

Resim 5.3’te ekstrüze numunenin % 50 haddeleme işlemi sonrası mikroyapısı görülmektedir. Ekstrüzyon sonrası haddeleme miktarı artıkça hadde yönünde Si partiküllerinin ve Mg kümelerinin yönlenmesinde artış belirlenmiştir.



Resim 5.3. % 50 haddelenmiş numunede Si ve Mg dağılımları

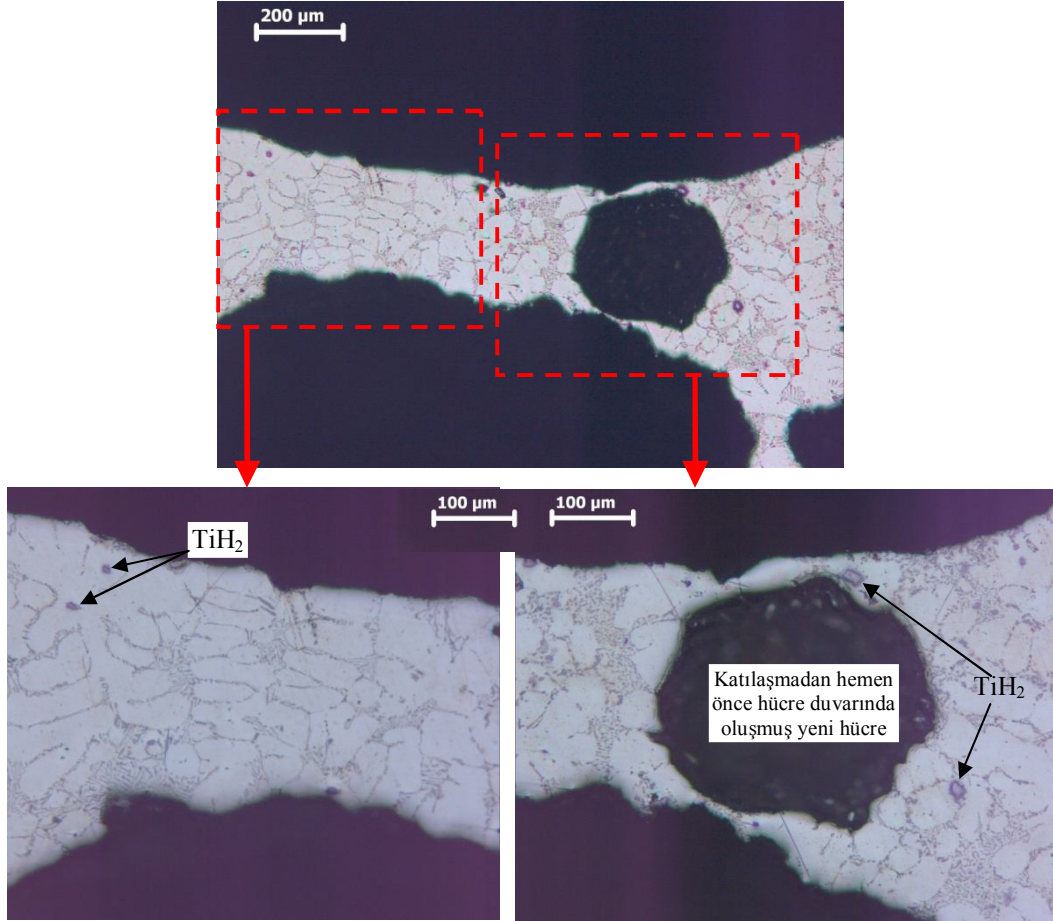
5.2. AlSiMg Alaşımı Köpük Malzemenin Karakterizasyonu

5.2.1. Mikroyapı karakterizasyonu

Uygulanan köpürtme metodu ile fırın sıcaklık göstergesinden 720 veya 760 °C okunmasına rağmen köpürme kalıp içi sıcaklığı preform kalınlıkları değiştiğinde değişmiştir. 8, 9 ve 10 mm preform malzeme kalınlıkları için sırasıyla kalıp sıcaklıkları 660, 670 ve 680 °C olarak belirlenmiştir. Köpürme sırasında ısı iletimi önemli bir rol oynamıştır. Fırın ve/veya kalıp sıcaklığının (köpürmenin sonlandırıldığı andaki sıcaklığı) yüksek olması, köpürtme süresini ve buna bağlı hücre boyutunu değiştirdiği tespit edilmiştir.

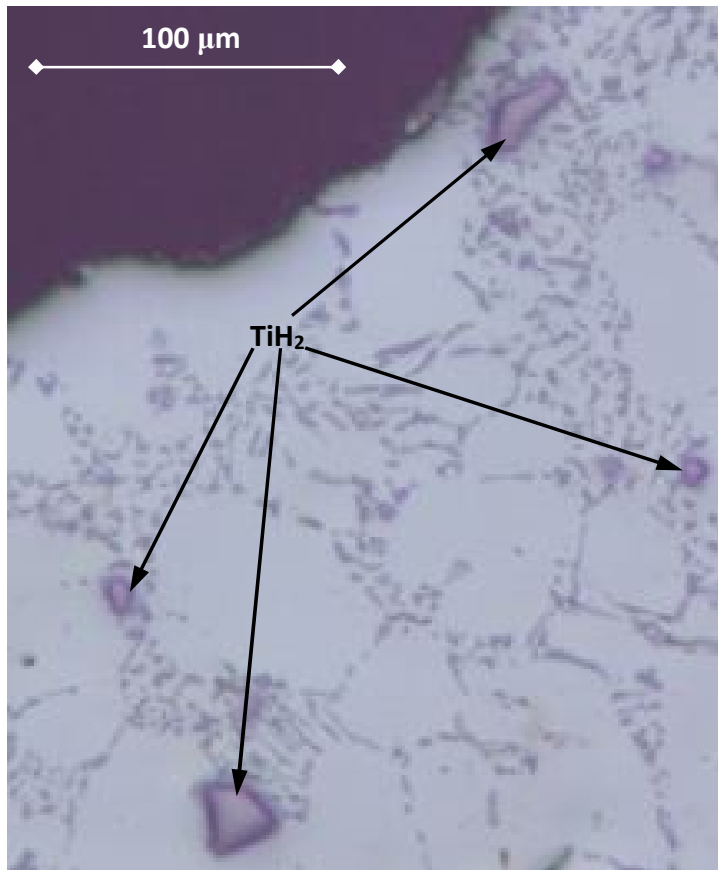
Köpürme sırasında ısı iletimini, dinamik olan köpük hücrelerinin morfolojisi belirlemektedir. Hücre boyutunun değişmesi ve düzensiz bir hücre duvarının oluşumu ısı iletiminde bölgesel farklılıklar göstermiştir. Bu nedenle, malzeme sıcaklığının köpürme sürecinde homojen olmaması katılaşma sürecinde farklı mikroyapılar oluşturmuştur. Hücre duvarı ince olduğunda soğuma hızının çok yüksek olduğu tahmin edilebilir. Bir çok durumda hücre duvarlarında oluşan dendrit veya ötektik fazı hücre duvarının kalınlığı ile aynıdır [Degischer ve Kriszt, 2002; Hupfer, 2003]. Resim 5.4 ve Resim 5.6'da farklı kalınlık ve şekilde katılaşan hücre duvarlarının oda sıcaklığında mikroyapı resimleri gösterilmiştir. Resim 5.4'te yapı

içerisinde sutunsal α -Al dendritleri ve Al-Si ötektik fazı gözlenirken Resim 5.6'teki yapıda eş eksenli α -Al dendrit fazı, Al-Si ötektik fazı ve birincil Si fazı gözlenmiştir. Hücre duvar kalınlığı azaldıkça daha hızlı ısı kaybı ve katılaşma ile yeterli sürenin olmamasından dolayı bir miktar Si ötektik yapmayıp birincil Si olarak katılaşmıştır. Genel olarak Si fazının plaka şeklinde hücre duvarlarında katılaştığı gözlenmiştir. Bu mikroyapılar Kaufman, Nafisi, Apelian ve arkadaşlarının çalışmalarında belirlenen modifiye edilmemiş Al-Si ötektik içeren mikroyapıya benzerlik göstermiştir [Kaufman ve Rooy, 2004; Nafisi ve Ghomashchi, 2006; Apelian, 2009].

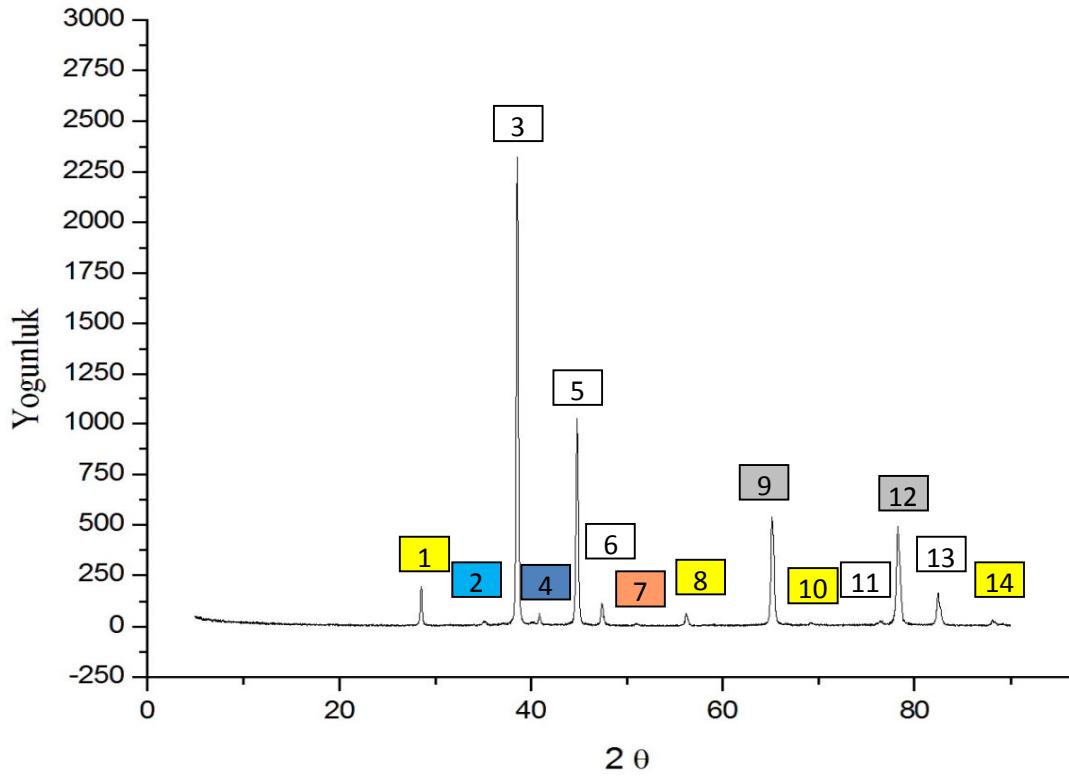


Resim 5.4. AlSi8Mg0,8 köpük malzeme hücre duvarı mikroyapı resmi (%5 HF dağlamada).

Köpürtme işleminden sonra yapıda Ti'ca zengin bölgelerde ayrılmamış TiH_2 mevcuttur (Resim 5.4 ve Resim 5.5). Baloncukların oluşması ile baloncuk duvarlarında ısı dağılımı farklılaşması ve TiH_2 parçacığının etrafında muhtemel bir Ti-Al intermetalik tabaka oluşumu ile bazı bölgelerde TiH_2 'nin ayrışması için yeterli süre oluşturmamaktadır (Resim 5.5). TiH_2 parçacıklarını çevreleyen intermetalik tabaka oluşumu nedeniyle, difüzyon bariyeri oluşumu ayrışmayı yavaşlatmaktadır [Degischer ve Kriszt, 2002; Müller ve Mosler, 2001]. Diğer baloncukların büyümesi ve köpük kalıbını doldurması için geçen sürede ayrışma gerçekleşmediğinden TiH_2 yapıda çözünmeden kalmıştır. Bu partiküllerin genellikle AlSi ötektiği içinde bulunması da dikkat çekicidir ve bu fazın çekirdeklenmesine etkisi olduğu düşünülmektedir.



Resim 5.5. Hücre duvarı mikroyapısı (%5 HF dağlamada).

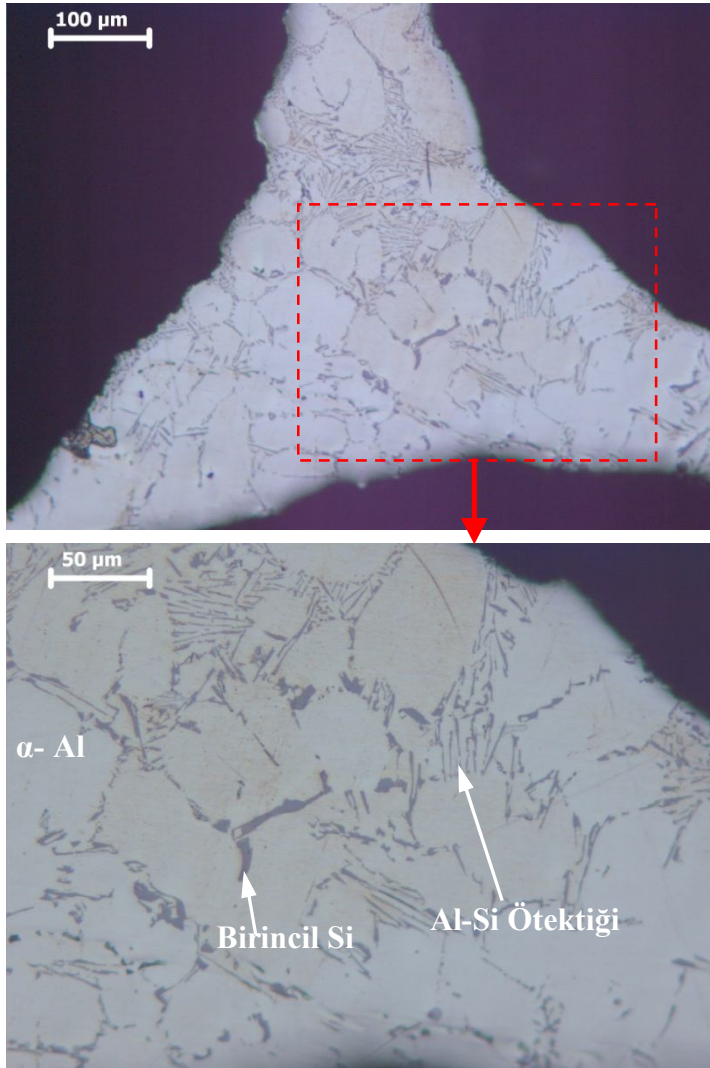


Pik no	Faz	Analiz sonucu		ICDD (PDF data)		Kafes yapısı
		2 Θ	Int.	2 Θ	Int.	
1	Si	28.49	196.25	28.44	100	Kübik
2	Ti	35.10	28.75	35.093	25	Hegzagonal
3	Al	38.52	2325.83	38.47	100	Kübik
	Mg ₂ Si	38.52	2325.83	38.47	30	Hegzagonal
4	Mg ₂ Si	40.88	67.5	41.02	20	Hegzagonal
5	Al	44.76	1023.33	44.738	47	Kübik
	Mg ₂ Si	44.76	1023.33	44.637	40	Hegzagonal
6	Si	47.356	109.167	47.30	55	Kübik
	Mg ₂ Si	47.356	109.167	47.434	15	Kübik
7	Mg ₂ Si	50.93	16.66	50.717	10	Hegzagonal
8	Si	56.128	67.9167	56.122	30	Kübik
9	Al	65.137	540.417	65.133	22	Kübik
10	Si	69.13	20.42	69.13	6	Kübik
11	Si	76.47	27.08	76.379	11	Kübik
	Ti	76.47	27.08	76.218	9	Hegzagonal
12	Al	78.268	494.1	78.227	24	Kübik
13	Al	82.48	161.25	82.435	7	Kübik
	Ti	82.48	161.25	82.29	1	Hegzagonal
14	Si	88.06	28.75	88.029	12	Kübik

Al
 Si
 β' -Mg₂Si
 Ti
 İki faz çakışık pik
 β' -Mg₂Si

Şekil 5.3. Köpük malzemenin XRD analiz sonucu.

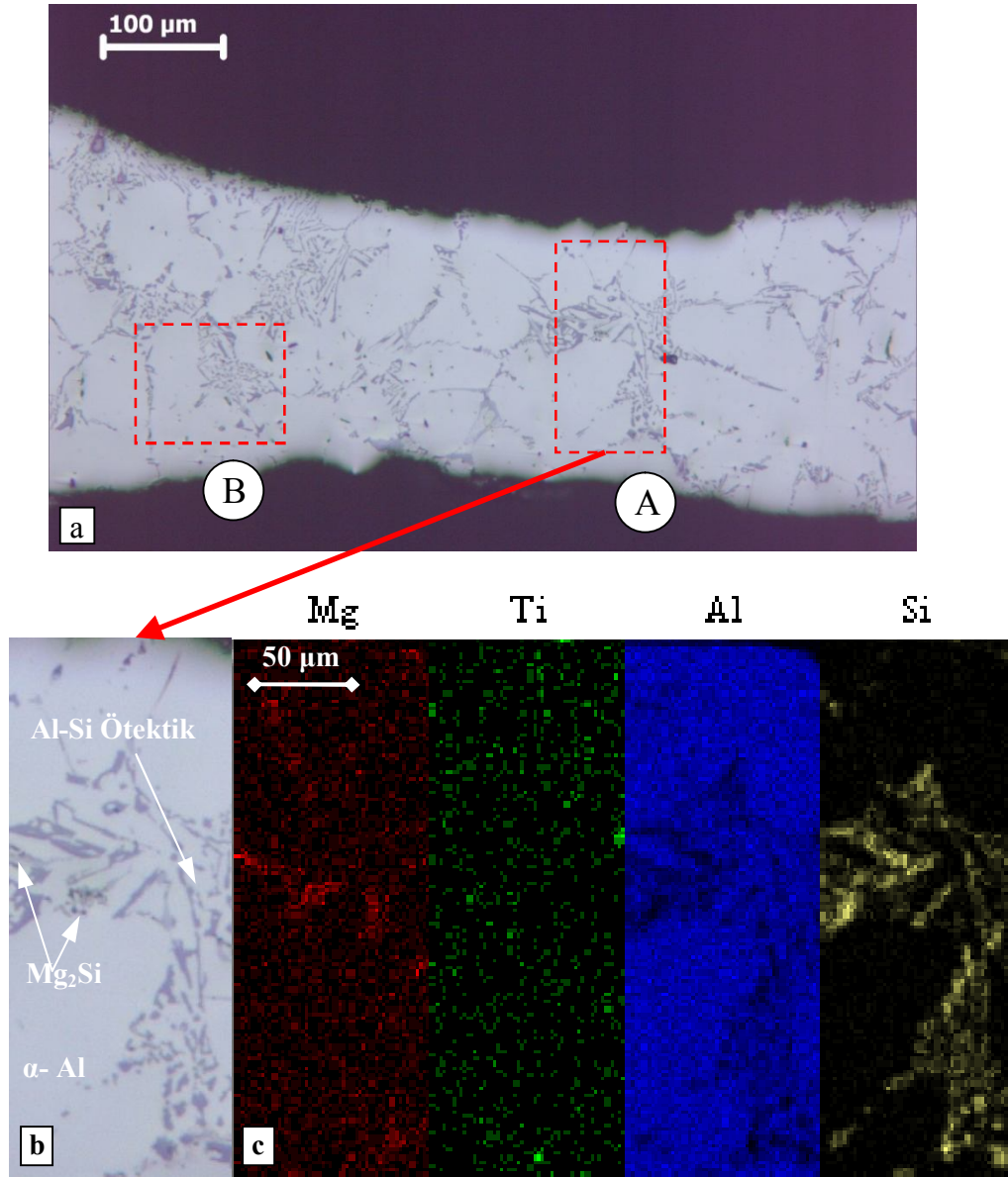
Şekil 5.3'te köpük numunenin XRD spektrumundaki pikler ve ait oldukları bileşikler gösterilmiştir. Bu spektrumun, Al, Si ve Ti ile birlikte yarı kararlı hegzagonal β' - Mg_2Si çökeltisini içerdiği tespit edilmiştir. Al'un en şiddetli piki ile çakışan çökeltinin önemli piklerinden biri (3 numaralı pik) ile birlikte diğer bir pik ise Al'un başka piki ile çakışmış olan 5 nolu pikte kırınım vermiştir. Bunların yanında Si ile çakışan 6 nolu pik dışında 4 ve 7 nolu piklerde yarı kararlı β' - Mg_2Si intermetalığının kırınım pikleridir. Bu durumda, köpürtme işlemi sonrası kalıp içindeki köpük malzemesinin sirkülasyonlu havada soğuma hızının yarı kararlı Mg_2Si bileşiğinin oluşması için yeterli olduğu söylenebilir. Soğuma hızının Mg_2Si fazının dağılımı ve çökelme karakteristiği üzerine büyük etkisi vardır. Soğuma hızı azaldıkça Mg_2Si fazı oluşma oranı artar [Bırol, 2004]. Köpük yapı içerisinde oluşan intermetalik bu yapıların varlığı, kırılgan ve sert bir malzeme meydana getirir.



Resim 5.6. AlSi8Mg0,8 köpük malzeme plato bölgesi mikroyapısı (%5 HF dağlamada).

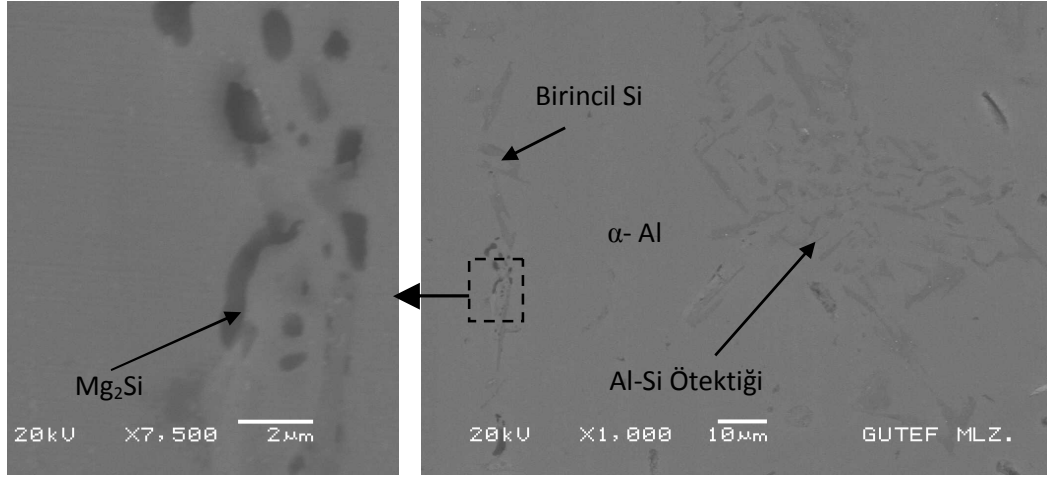
Resim 5.7’de farklı bir bölgeden oda sıcaklığında hücre duvarı mikroyapı resmi gösterilmiştir. A ve B ile gösterilen çerçeveli bölgelerden EDS element haritalama analizleri yapılmıştır (Resim 5.7 - Resim 5.9). Resim 5.7’de A çerçevesinin element haritası gösterilmiştir. Hücre duvarında Al-Si ötektiği oluşmuş bölgelerde Si’un yoğunlaştığı gözlenirken, Mg’ca zengin bölgelerin ötektik yapı aralarında olduğu ve muhtemel bu bölgelerin ise Resim 5.7.b’de oklarla gösterilen Mg_2Si fazı olduğu

düşünülmektedir. Mg'un Al matris içerisinde homojen olarak çözündüğü gözlenmiştir.



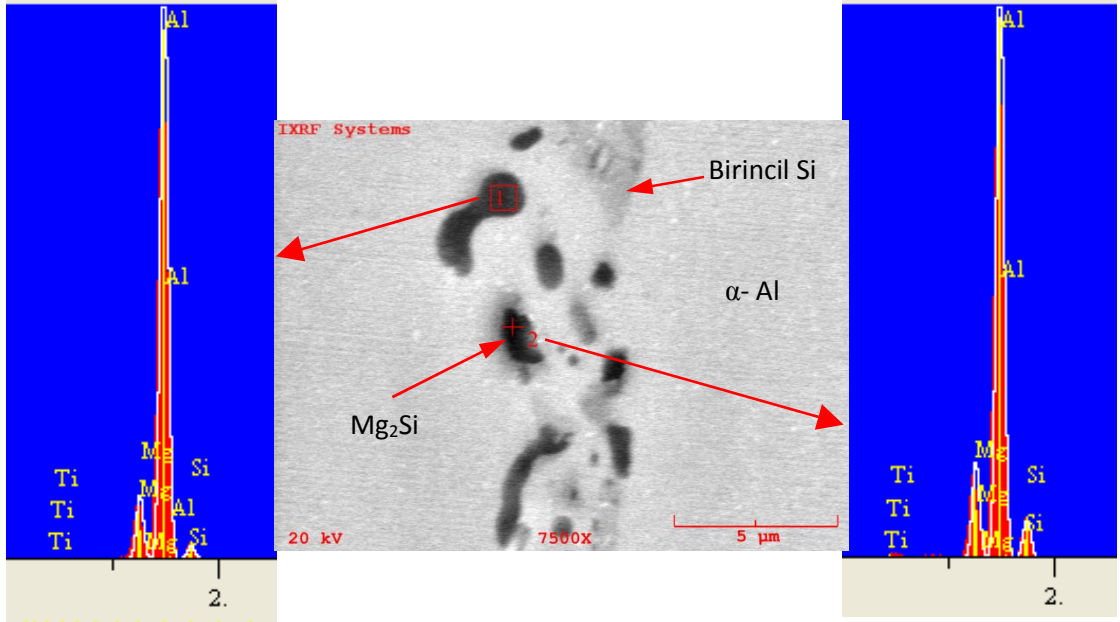
Resim 5.7. AlSi8Mg0,8 köpük hücre duvarı mikroyapısı; a) Optik mikroskop resmi (%5 HF dağlamada), b) A çerçevesindeki mikroyapı, c) A çerçevesinin element haritasında Si, Mg ve Ti dağılımı.

Resim 5.7.c'deki element haritasında Mg'ca zengin bölgelerde Mg_2Si intermetalığının varlığından söz edilebilir. Al-Si-Mg üçlü alaşımlarda denge diyagramında Mg_2Si fazı oluşmaktadır [Raghavan, 2007] Mikroyapı resminde Mg_2Si fazı siyah renkte görülmüştür. Mg_2Si partikülleri dendrit sınırlarında çökelmeye eğilimlidirler [Zajac ve ark., 1996]. Aynı hücre duvar resminin farklı bir bölgesinden alınan mikroyapı ve SEM görüntüsünde de benzer çökelti fazına rastlanmıştır (Resim 5.8 ve Resim 5.9). Resim 5.9'da B ile gösterilen çerçeve içerisindeki siyah renkte görülen fazların EDS analizi yapılmıştır. Resim 5.9'da 1 ve 2 noktalarının EDS analiz sonuçları gösterilmiştir.



Resim 5.8. B çerçevesi ile gösterilen alanın SEM görüntüsü.

Resim 5.8'de SEM görüntüsü verilen Mg_2Si çökeltilerinin tane sınırı boyunca büyüyen birincil Si fazının devamında ve muhtemel tane sınırı bölgesi boyunca olduğu görülmektedir. Yine Resim 5.9'da verilen EDS sonuçları Si ve Mg'ca zengin bölgelerin olduğunu ve dolayısıyla bu fazların Mg_2Si intermetalik çökeltisi olma ihtimalini arttırmaktadır.



Resim 5.9. SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.

5.2.2. Metalik köpük makroyapı karakterizasyonu

Çizelge 5.1’de üretilen metalik köpük numunelerin yoğunlukları ve hücre boyutlarına göre sıralaması verilmiştir. Burada, üretilen üç farklı yoğunluk aralığında 3 farklı gözenekli köpük malzemelerin sıralaması yapılmıştır.

Çizelge 5.1’de köpük malzemelerin üretim koduna göre ortalama hücre boyutu, boyut standart sapması, şekil faktörü değerleri ve köpüklerin iki boyutlu tarama resimleri gösterilmiştir.

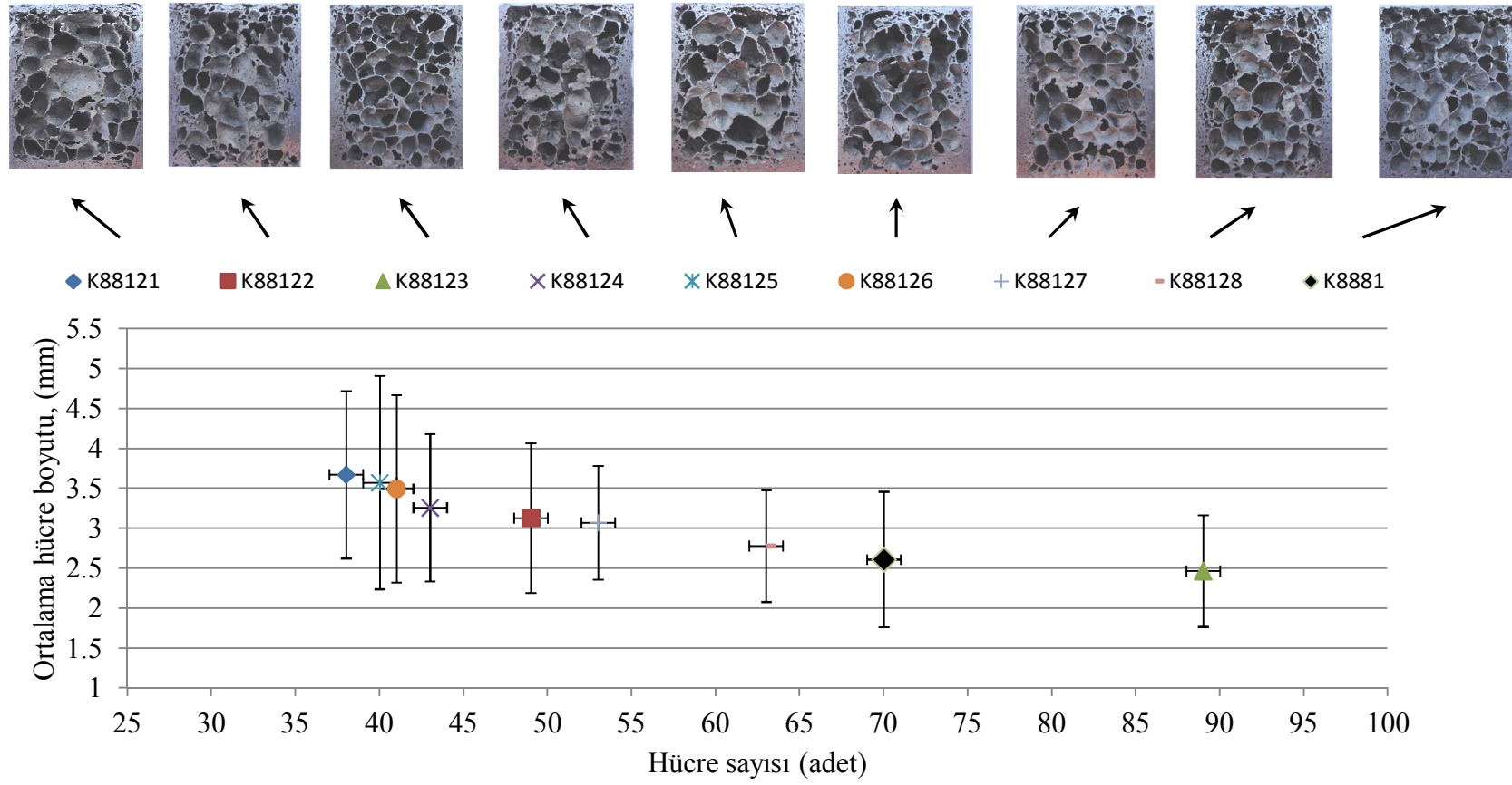
Çizelge 5.1. Köpük malzemelerin genel fiziksel ve geometrik özellikleri.

Ortalama yoğunluk (g/cm ³) ve Guruplama	Köpük malzeme	Yoğunluğu (g/cm ³) (ρ)	Ortalama hücre boyutu (mm) (d)	Boyut standart sapması (δ)	Şekil faktörü (F)	Köpük resmi
0,40 (I)	K88121	0,36	3,8	1,05	0,74	
	K88122	0,4	3,1	0,94	0,72	
	K8881	0,42	2.6	0,85	0,78	
0,61 (II)	K88123	0,59	2,5	0,70	0,78	
	K88124	0,60	3,3	0,92	0,72	

Çizelge 5.1. (Devamı) Köpük malzemelerin genel fiziksel ve geometrik özellikleri.

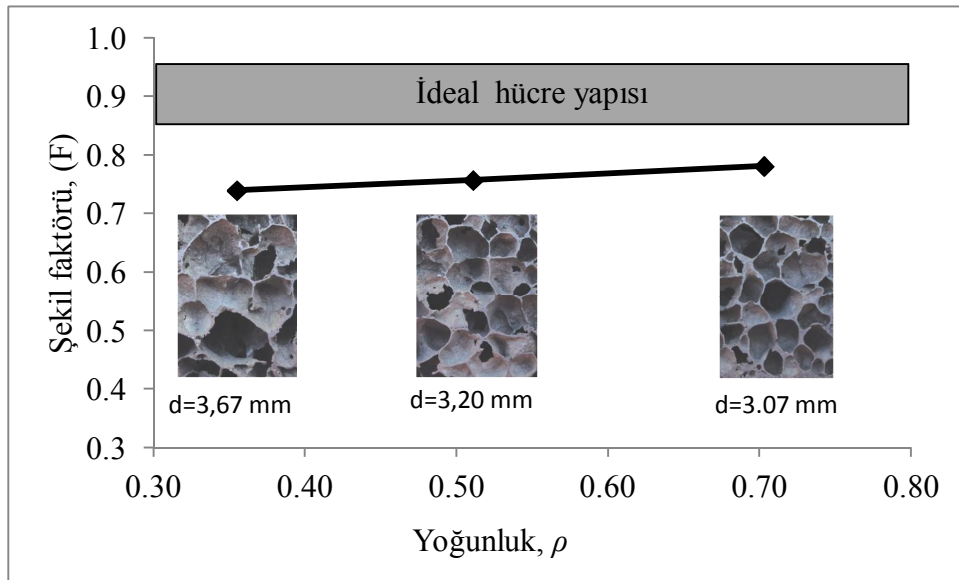
0,61 (II)	K88125	0,65	3,6	1,34	0,74	
0,70 (III)	K88126	0,70	3,5	1,17	0,76	
	K88127	0,70	3,1	0,71	0,78	
	K88128	0,68	2,8	0,70	0,72	

Köpük malzemelerin iki boyutlu tarama görüntülerinde hücre boyutu dağılımı incelendiğinde, hücre boyutu standart sapmaları dikkate alındığında homojen boyutlu hücre dağılımı K88123, K88127 ve K88128 köpük malzemelerde gözlenmiştir (Şekil 5.4). Hücre boyutu azalırken hücre sayısının arttığı ve boyut standart sapma aralığı azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 5.4. Köpük hücre boyut dağılımı.

Üretilen köpük malzemelerin yoğunlukları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Köpük malzemelerde en ideal şekil faktörü $F=0,78$ ile K88123 köpük numunede belirlenmiştir. Hücre boyutunun artmasıyla şekil faktörü değişimi arasında anlamlı bir ilişki kurulamamıştır. Fakat yoğunluğun artmasıyla şekil faktörü ideal değerlere yaklaşmaktadır. Şekil 5.5’te üç farklı boyutta üretilen köpük numunelerin yoğunluğa bağlı şekil faktörü değişimi gösterilmiştir. Bu ilişki, Degischer ve Kriszt, (2002) yaptığı çalışmada yoğunluğun artmasıyla şekil faktörünün artması durumu ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 5.5. Yoğunluk-Şekil faktörü ilişkisi.

K88125 köpük malzemedeki hücre boyut dağılımının en geniş aralıkta olduğu tespit edilmiştir. Yöne bağımlı olarak hücrelerin şekilleri incelendiğinde, köpürtme yönüne paralel şekilde hücreler olduğu gözlenmiştir. Ancak, hücre boyut dağılımının mekanik özellikler için homojen olması istenir [Gibson ve Ashby, 1997; Degischer ve Kriszt, 2002].

Köpük hücre duvar kalınlıkları her yoğunluk ve hücre boyutundaki malzemeler için ölçülmüştür. Çizelge 5.2’de ortalama hücre duvar kalınlıkları verilmiştir. K88121, K88122 ve K8881 köpük malzemeler benzer yoğunluklu malzemeler olup hücre

boyutunun artmasıyla hücre duvar kalınlığının azaldığı belirlenmiştir. Diğer benzer yoğunluklu iki grupta da benzer ilişki belirlenmiştir.

Çizelge 5.2. Hücre duvarı kalınlıkları.

Köpük malzeme kodu	Ortalama hücre duvar kalınlığı (μm)	Ortalama hücre boyutu (d) (mm)
K88121	26	3,7
K88122	43	3,1
K88123	97	2,5
K88124	61	3,3
K88125	62	3,6
K88126	70	3,5
K88127	84	3,1
K88128	99	2,8
K8881	78	2,6

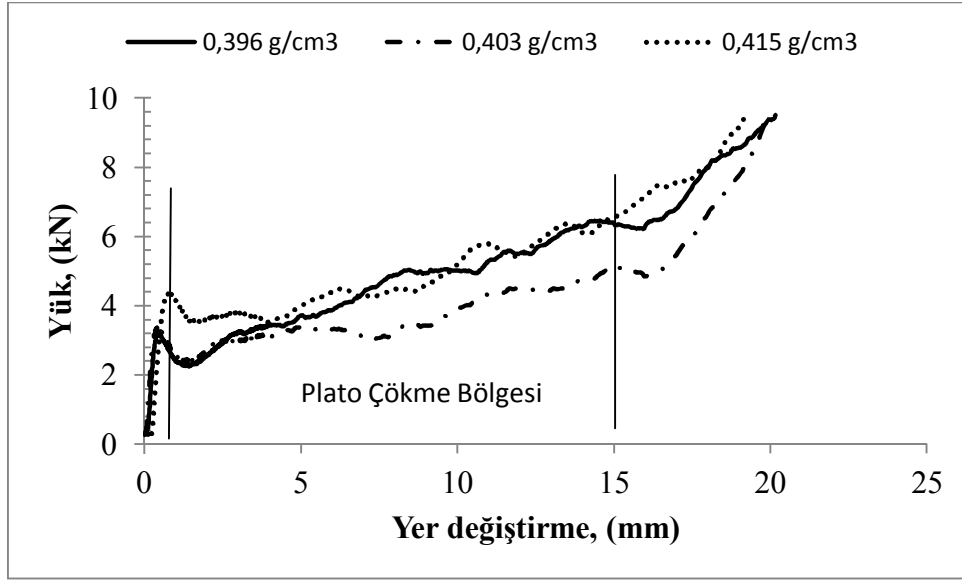
5.3. Metalik köpüklerin Basma Dayanımları

5.3.1. Kenarları kapalı köpük numunelerin basma testi sonuçları

30X30X30 mm boyutundaki numunelere kenarları kesilmeksizin 3 grupta ve her grupta 3'er numuneye basma deneyi uygulanmıştır. Gözenek şekilleri ve boyutları belirlenemediğinden yoğunluklarına göre gruplandırılmışlardır. Sırasıyla 0,396 – 0,415 g/cm³, 0,524- 0,533 g/cm³ ve 0,598- 0,676 g/cm³ yoğunluk aralığındaki numuneler basma testine tabi tutulmuşlardır. Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de yük/yer değiştirme grafikleri gösterilmiştir.

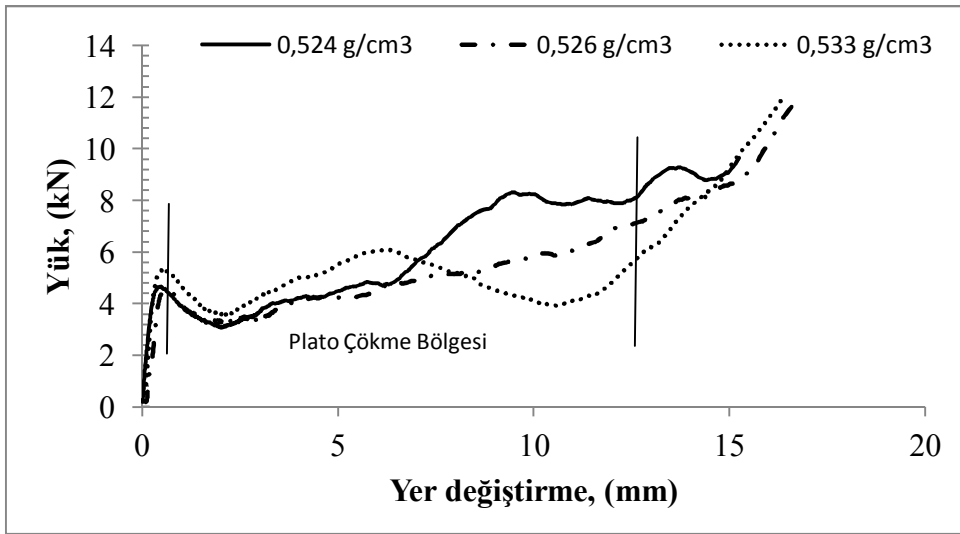
Şekil 5.6'da gösterilen grafikte birbirine yakın yoğunluk değerlerindeki numunelerin basma testinde belirgin bir akma bölgesi gözlenmiştir. Akma bölgesinden sonraki ilk plastik deformasyonla, gerilmelerin yoğun olduğu bölgedeki gözeneklerin çökmesi

ile birlikte yük azalması meydana gelmiştir. İlerleyen şekil değişikliğinde plato bölgesindeki çökmelerin sabit yük ile değil de artan yükle birlikte gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu artış sürecinde hücrelerin çökmesiyle yoğunluğun artırmasının yanında numune dış duvarlarının şekil değiştirme dirençlerinin basma yükünü arttırdığı düşünülmektedir.

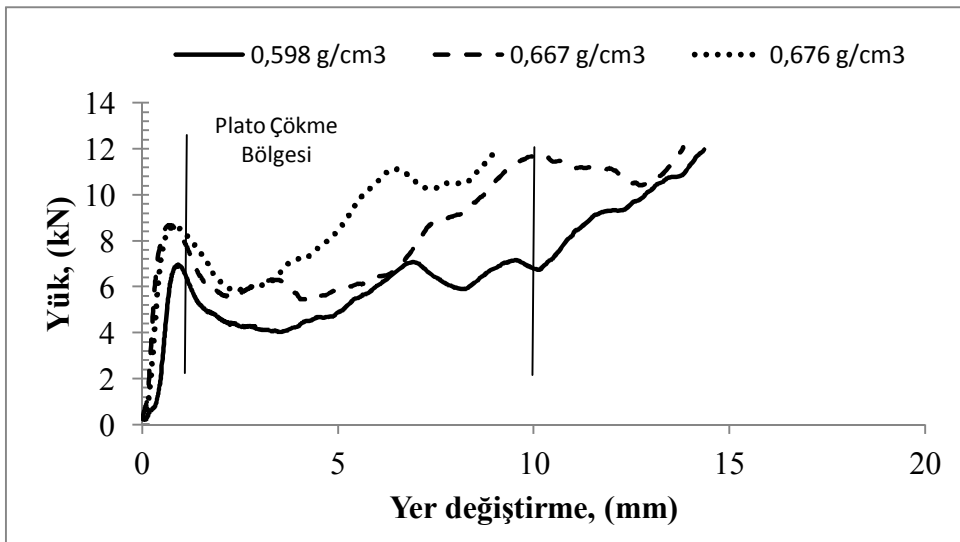


Şekil 5.6. Basma deneyinde yük-yer değiştirme ilişkisi ($0,396 - 0,415 \text{ g/cm}^3$).

Yoğunluğun artmasıyla maksimum akma yük değerinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8). En yüksek akma yük değeri yaklaşık 9 kN olarak $0,676 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğundaki numune elde edilmiştir. Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de artan numune yoğunluğuyla plato bölgesi çökmelerinin (hücre çökmesiyle bölgesel yoğunluk artışı) daha da düzensizleşmiştir. Şekil 5.8'deki numunelerde akma noktasından sonra plato çökme sürecinin çok az şekil değişikliği ile olduğu görülmüştür.



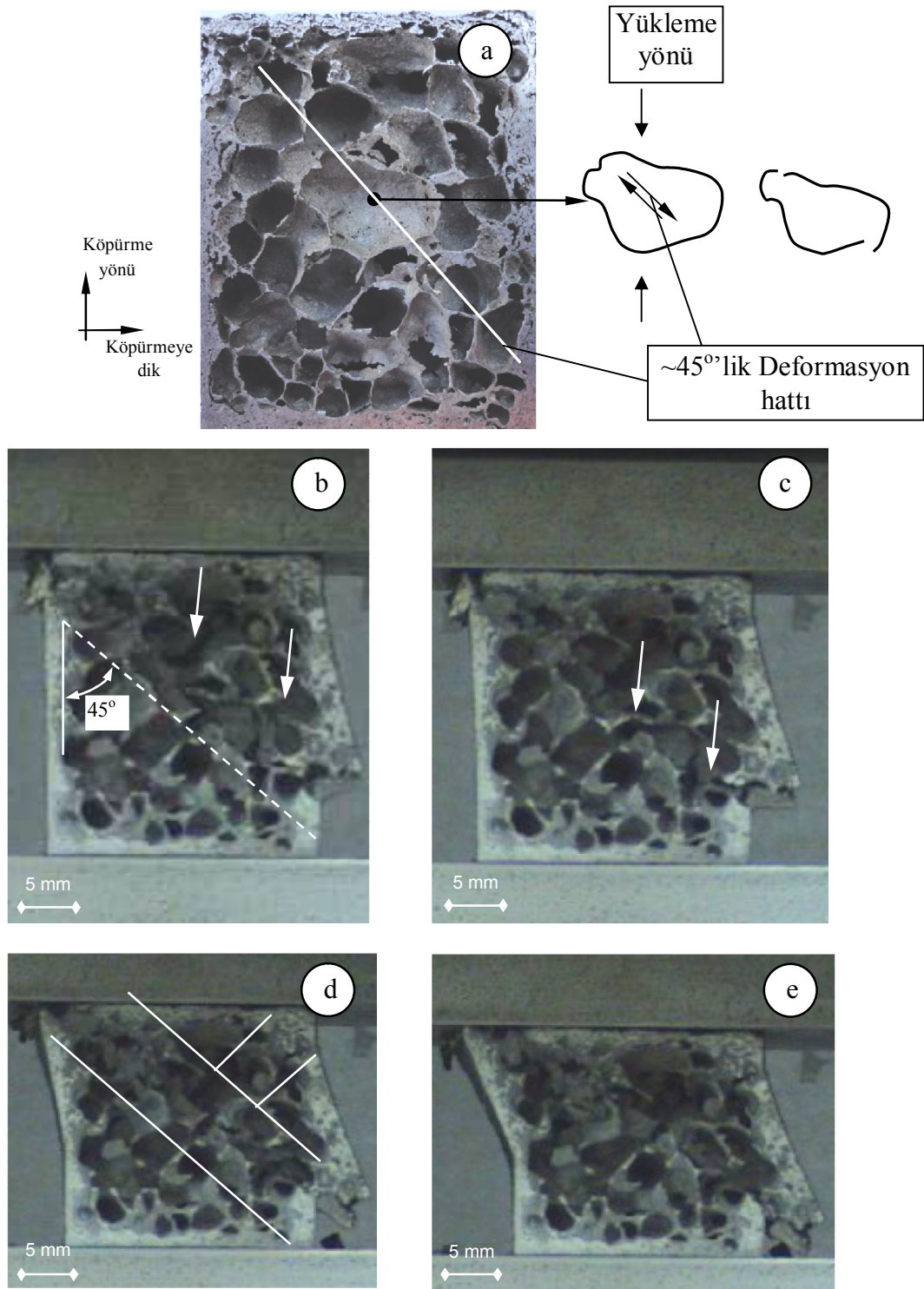
Şekil 5.7. Basma deneyinde yük-yer değiştirme ilişkisi (0,524- 0,533 g/cm³).



Şekil 5.8. Basma deneyinde yük-yer değiştirme ilişkisi (0,598- 0,676 g/cm³).

5.3.2. Yan duvarları açık metalik köpüklerin basma deformasyon mekanizmaları

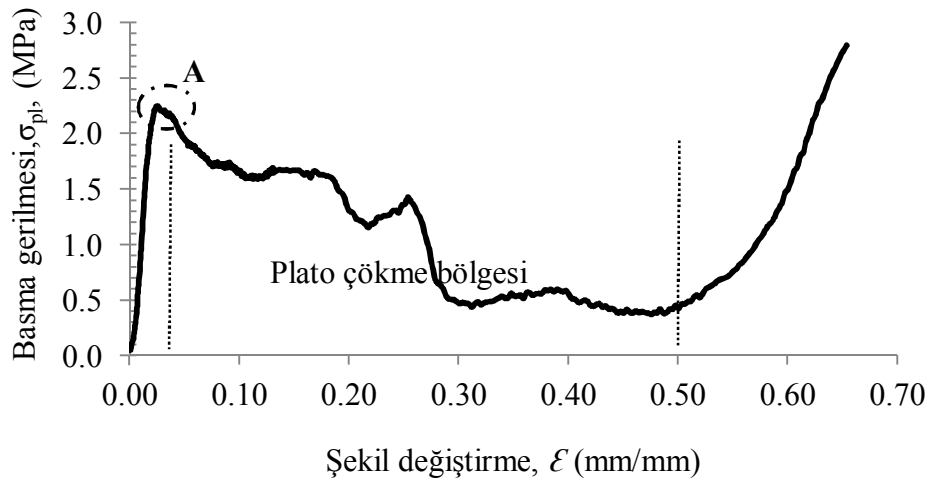
K88121 köpük malzemede yükün uygulandığı eksene yaklaşık 45° açı yapan kayma düzlemi üzerinde hücreler birbiri üzerinden deforme olarak kalıcı şekil değişikliği meydana geldiği gözlenmiştir (Resim 5.10.b).



Resim 5.10. K88121 köpük malzemenin basma testindeki deformasyon süreci; a) %0, b) % 6, c) % 16, d) % 21 ve e) % 25 deformasyon.

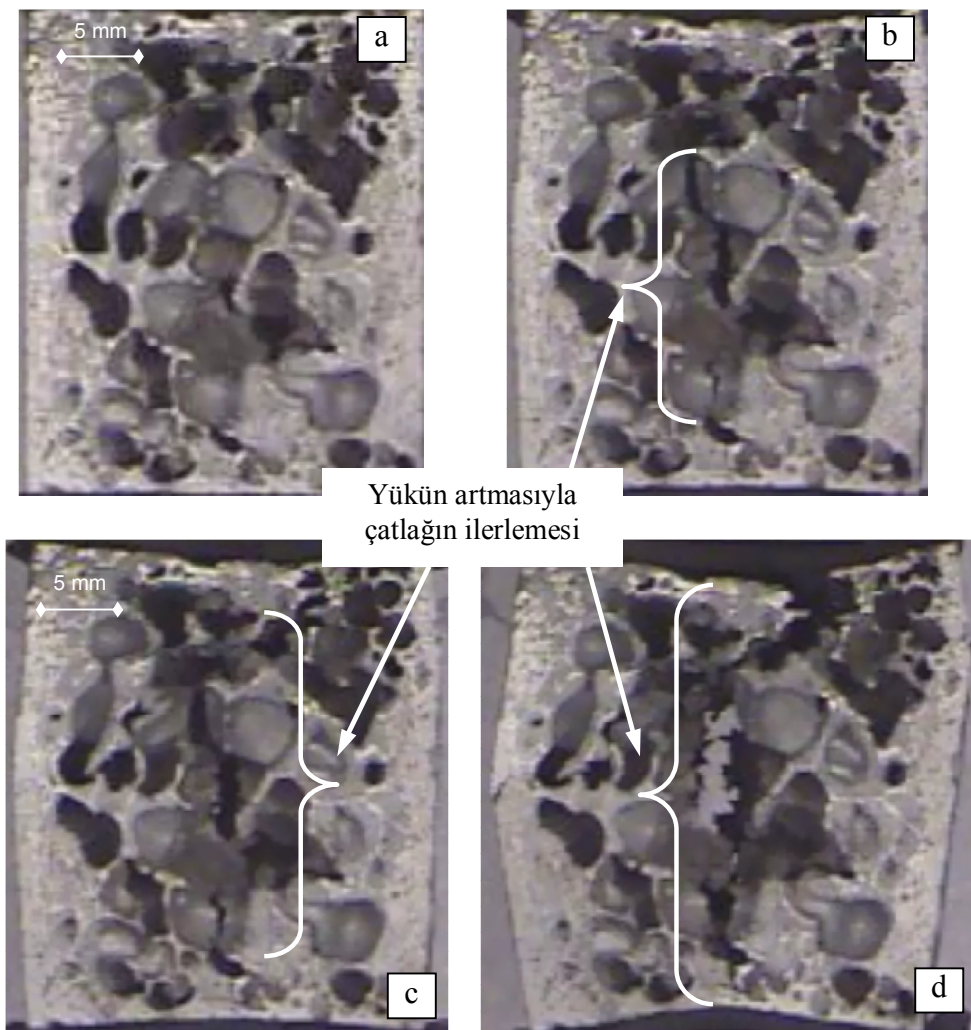
Resim 5.10.b-c’de oklarla gösterilen hücre duvarlarının kırılma davranışları Bastawos ve Evans, (2000) yaptığı çalışmadaki ikinci deformasyon mekanizmasıyla kırılma davranışına benzer olduğu görülmüştür. İkinci deformasyon mekanizması büyük hücre çarpılmasını içermektedir ve hücre saat yönünde dönerek kombine olmuştur. Bu dönme komşu hücrelerin saat yönünün tersine dönmesiyle sağlanmaktadır [Bastawos ve Evans, 2000]. Basma testi yapılan bu numunelerde hücrelerin deformasyon davranışı gevrek kırılma karakteristiği göstermiştir. Resim 5.10.a’da gösterilen deformasyon hattı üzerinde ortalama hücre boyutundan büyük bir hücre varlığı mevcuttur. Bu hücre köpürme yönüne basık şekilde oluşmuştur. Geometrisi itibarıyla yükün uygulandığı yönde dayanımı daha az olduğundan deformasyon sürecinin bu bölgede başladığı gözlenmiştir. Buna ek olarak deformasyon hattının bölgesel yoğunluğunun düşük olduğu görülmüştür. Kalıcı deformasyonun hücre duvarında çatlak, düşük yoğunluklu bölgeler ve köpük malzeme üretim kusurlarının olduğu bölgelerde başladığı bilinmektedir [Song ve ark., 2008].

Şekil 5.9’da köpük plato akma gerilmesinin maksimum olduğu A ile gösterilen noktada sonra yukarıda belirtilen kayma hattı boyunca deformasyonun başladığı gözlenmiştir.



Şekil 5.9. K88121 köpük malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.

Şekil 5.9'da gerilme-gerinim grafiğinde plato çökmelerinin kayma bandı oluşumuyla gerilmelerini azaltarak şekil değiştirdiği gözlenmiştir. % 25 birim şekil değiştirme den sonraki süreçte ani gerilme düşüşü gözlenmiştir. Bu düşüşün nedeni Resim 5.10.d'de gözlenmiş olan deformasyon hattına dik şekilde diğer bir deformasyon hattının oluşması söylenebilir. Yüklemenin devam etmesiyle % 50 şekil değişikliği sonrası numune yoğunlaşma sürecine girmiştir.

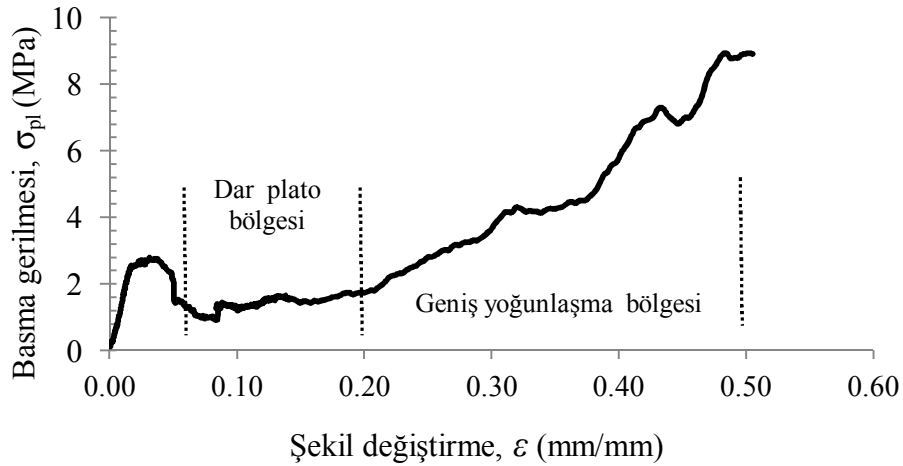


Resim 5.11. K88122 köpük malzemenin basma testi süresince deformasyonu

Kapalı köpük malzemelerde hücrelerin oluşumu ve düzeni kontrol edilebilen bir parametre değildir. Köpürme sırasında gaz sıkışması ve sıcak yırtılmaların meydana

gelmesi beklenen bir durumdur. Köpük kusurlarının çok yoğun olduğu bölgeler oluşması ihtimal dahilindedir. Benzer bir durum K88122 köpük malzemede gözlemlenmiştir. Resim 5.11.b-c-d'de gösterildiği gibi köpük malzeme yükün uygulandığı yöne paralel bir yırtılma şeklinde deformasyona uğramıştır. Bu deformasyon mekanizması, Mu ve ark., (2010) yaptığı çalışmadaki enerji emme mekanizmalarından Mod B ile aynı yırtılma şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Mod B hücre duvarının doğrultusunda gerilmenin oluşması ile enerji emme mekanizmasıdır [Mu ve ark., 2010].

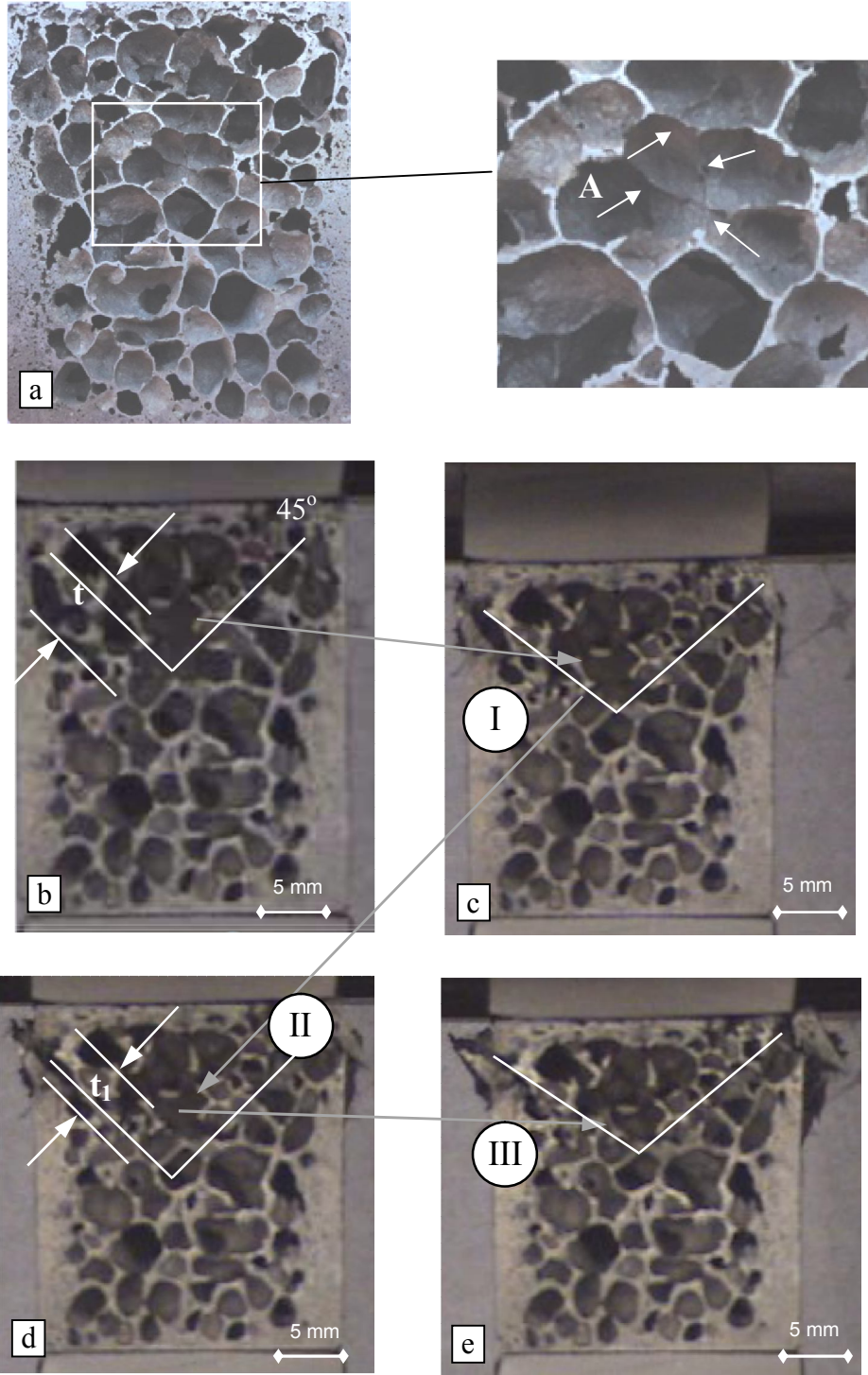
Şekil 5.10'da K88122 köpük malzeme hücre duvarlarının yükün uygulandığı yöne dik gerilme oluşturması akma noktasından sonra gerilmenin kısmen artması ve ardından çatlağın ilerlemesi ile gerilmenin azaldığı söylenebilir. Düşük deformasyonla hızla ilerleyen çatlağın varlığı, dar çökme bölgesinin oluşmasına neden olmuştur. %20'lik şekil değişiminden sonra çatlağın çevresindeki plato bölgeleri birbirleri üzerine yığılarak yoğunlaşma meydana gelmiştir.



Şekil 5.10. K88122 köpük malzeme gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.

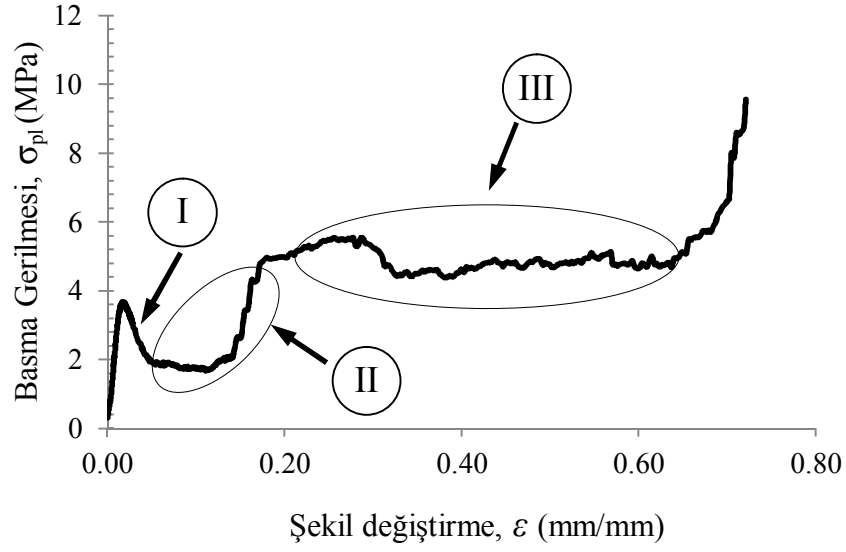
K88123 köpüğün üst bölgesindeki yoğunluğun daha az olduğu gözlenmiştir (Resim 5.12). Bu sebeple düşük akma gerilmesiyle üst bölgede çökme deformasyonu başlamış ve gerilmede önemli düşüş gerçekleşmiştir. Resim 5.12.a'da A okları ile gösterilen bölgelerde köpüklenme sırasındaki hücre duvarlarının sıcak yırtılma ile

dört hücrenin birleşerek bir hücreyi meydana getirdiği görülmüştür. Bu durum, hücre yoğunluğu bölgesel olarak düşük bir alan oluşturmuştur. I, II ve III ile gösterilen aşamalarda hücredeki deformasyon türü Bastawos ve Evans, (2000) yaptığı çalışmadaki birinci deformasyon mekanizmasıyla benzer olduğu görülmüştür. Birinci mekanizma, tek ekseninde dönme olmaksızın gerçekleşen büyük hücre çarpılmasıdır [Bastawos ve Evans, 2000]. Bu büyük hücrenin üst kısmındaki plato bölgesinde oluşan gerilme yığılması (yükün etkidiği alanın azalmasıyla), yükün uygulandığı doğrultuya 45° açı ile her iki yönden kama biçiminde çökme meydana gerçekleşmiştir.

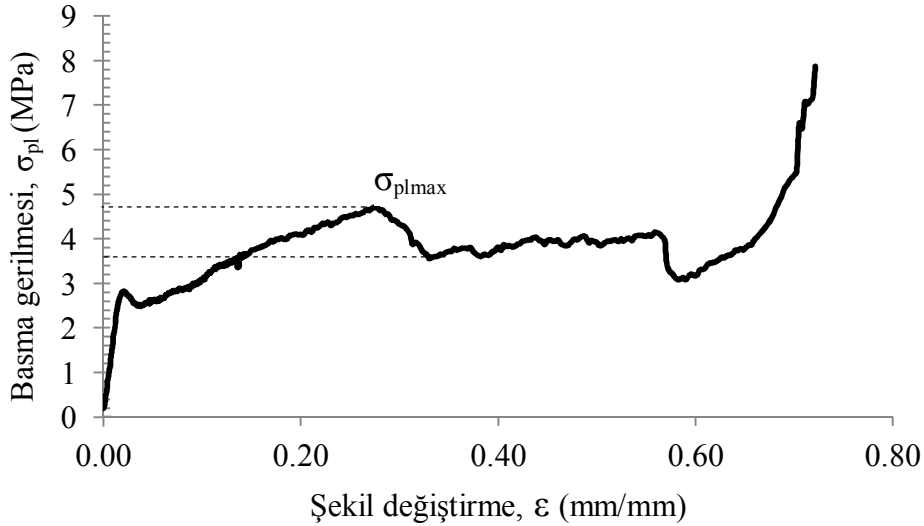


Resim 5.12. K88123 köpüğün basma testindeki deformasyon süreci; a) Genel köpük yapısı, b) % 0, c) % 15, d) % 18 ve e) % 20 deformasyon.

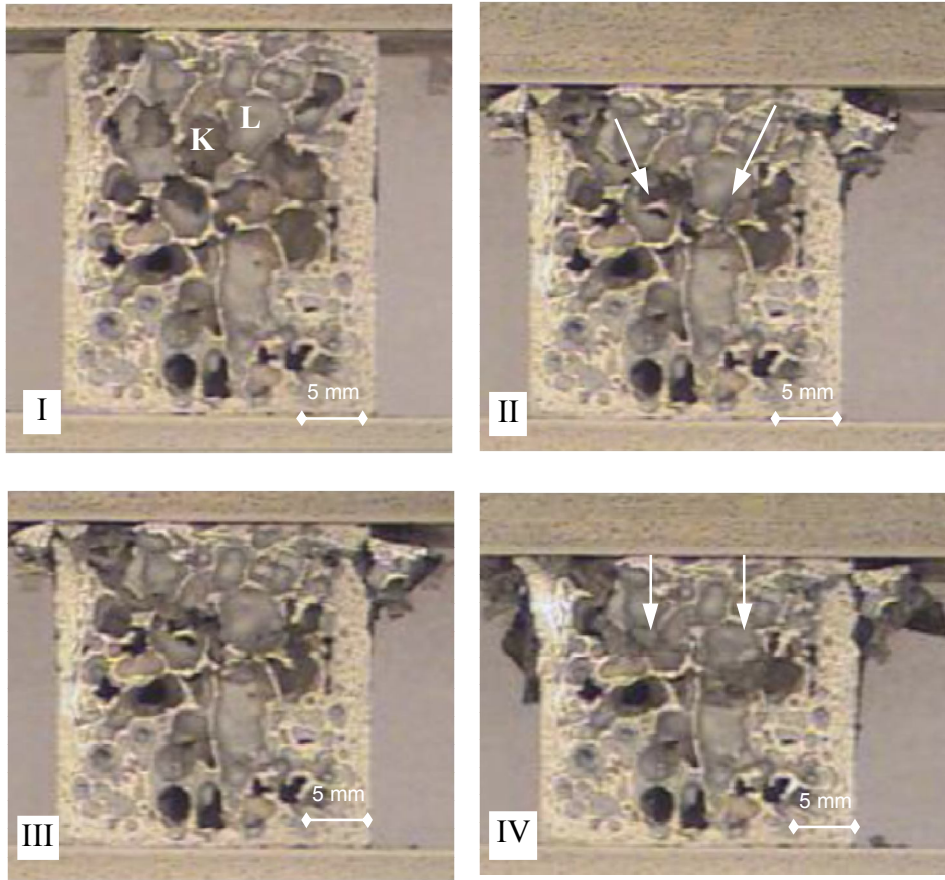
Şekil 5.11’de I. bölge hücre duvarları kırılmasıyla gerilmenin azaldığını göstermiştir. Hücre kırılması sonrası yoğunlaşma ile II. bölgede gerilme artmıştır. Bu bölgedeki deformasyonla birlikte Resim 5.12.b’deki üst çizginin yer değiştirme miktarı $|t-t_1|$ dir. III. bölgede basma sürecinin devamında plato çökme gerilmelerinin önemli miktardaki şekil değişikliğine rağmen basma gerilmesi yoğunlaşma bölgesine kadar yaklaşık sabit kalmıştır.



Şekil 5.11. K88123 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.



Şekil 5.12. K88124 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.

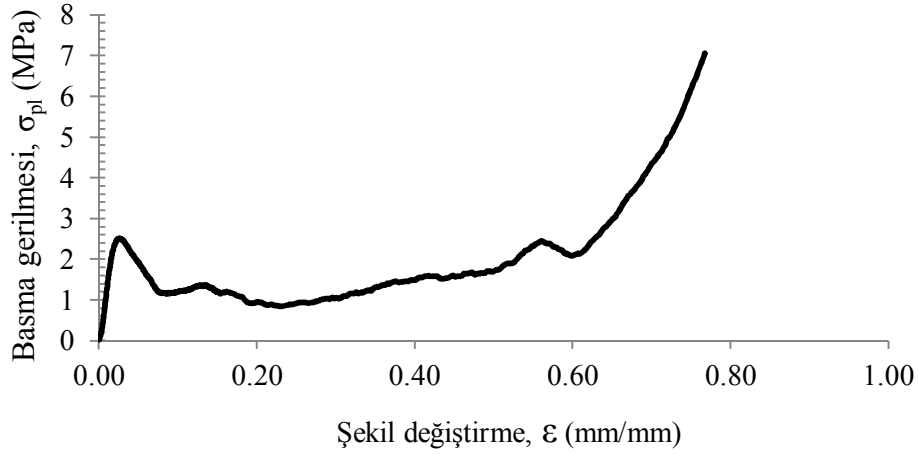


Resim 5.13. K88124 köpüğün basma testindeki deformasyon süreci.

Şekil 5.12’de köpük plato gerilmesi, yaklaşık %25 şekil değişimine kadar artış göstermiştir. Deformasyonun köpüklerde bölgesel olduğunu düşündüğümüzde gerilmesi artıran bu plato bölgesinin % 4-25 şekil değişikliğinde akma gerilmesinden (~ 3 MPa) daha fazla basma gerilme değerine (~ 4.8 MPa) artırmıştır. Resim 5.13.IV’de görüldüğü gibi artan deformasyonla malzeme kaybı gerçekleştiğinden (yaklaşık %30 şekil değişimine kadar) gerilme azalmıştır. Basma testi sürecinin devamında sabit plato gerilmesiyle (akma gerilmesinden daha fazla gerilme değerinde) şekil değiştirme yoğunlaşma bölgesine kadar devam etmiştir. % 25’e kadar plato gerilmesindeki artışın sebebi olarak, Resim 5.13.I’de K ve L harfleriyle gösterilen hücreler incelendiğinde, hücre duvarlarının flambaj yaparak kırılma sürecine girdiği gözlenmiştir. Yükün uygulandığı doğrultuda hücreler flambaja maruz kalmıştır. Bu bölgedeki enerji emme mekanizması Mod D ile benzerlik

göstermektedir. Mod D enerji emme mekanizması, hücre duvarının flambaja uğramasını içerir [Mu ve ark., 2010]. Resim 5.13.II-III-IV gözlemlendiğinde K ve L hücrelerinin deformasyon sürecinde şekil değiştirme aşamaları görülmektedir.

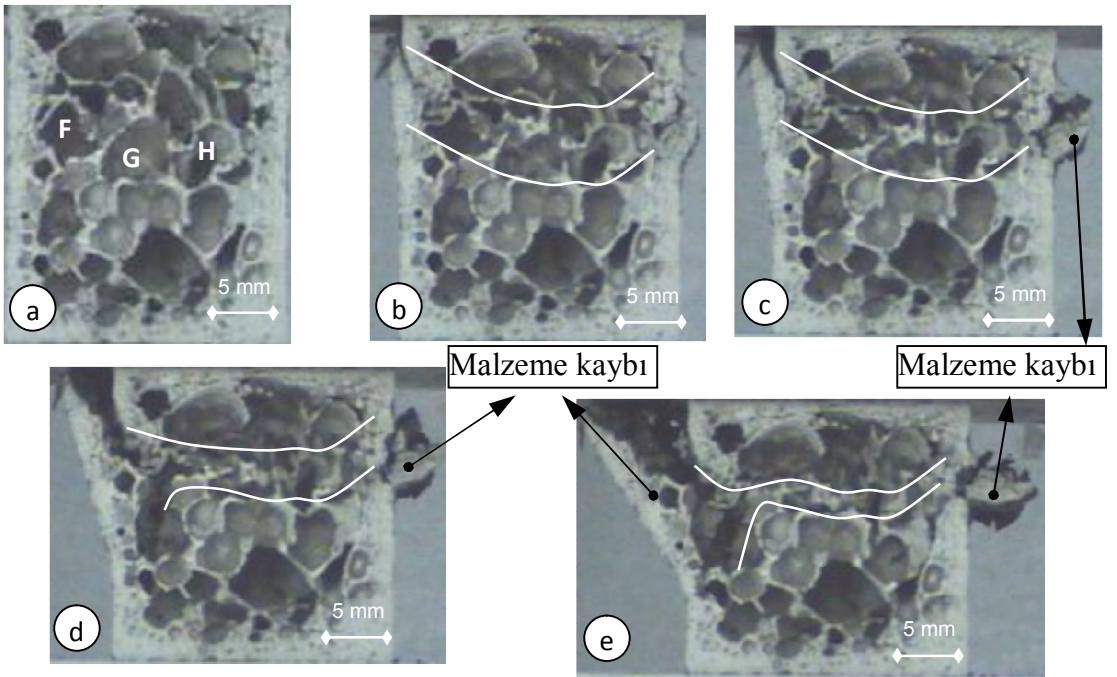
K88124 köpük malzeme K88123 köpüğündeki kama biçiminde çökmeye benzer kırılma davranışı göstermiştir (Resim 5.13). Her iki köpük malzemede de plato çökme bölgelerindeki gerilme değeri akma gerilme değerinden fazla olduğu belirlenmiştir. Bu numunelerin gözenek boyutu ve yoğunluklarının yaklaşık aynı değerlerde olduğu da dikkate alındığında kama biçimi çökme durumunda plato çökme gerilmelerinin değerlerinin plato akma gerilmesinin üzerinde olabileceği söylenebilir.



Şekil 5.13. K88125 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.

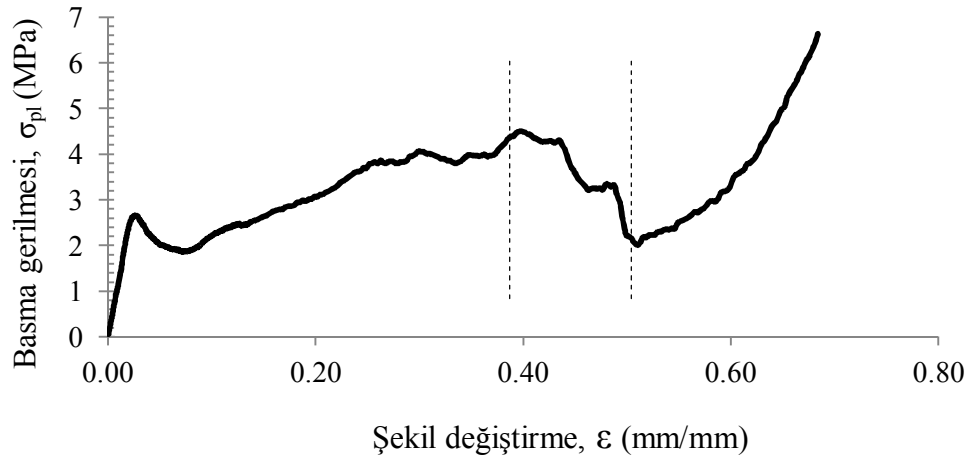
Şekil 5.13'de gösterilen K88125 köpük malzeme gerilme-gerinim eğrisi klasik metalik köpük malzemenin davranışını göstermiştir. Akma gerilmesinin ardından hücre duvarlarının kırılmasıyla ani ve önemli gerilme düşüşü meydana gelmiştir. Yaklaşık % 9 deformasyon sonucunda meydana gelen önemli gerilme düşüşü Resim 5.14.b'de görüldüğü gibi malzeme kaybından olduğu düşünülmektedir. Deformasyon sürecinin ilerlemesiyle metalik köpük numunenin malzeme kaybı yoğunlaşma bölgesini sağa kaydıracağı gibi plato bölgesinin basma gerilmesini de düşürmektedir (Resim 5.14.c-d-e). Plato bölgelerinin çökme süreci yaklaşık sabit gerilme altında ve

% 60'a varan deformasyona kadar devam etmiştir. % 60 deformasyonla sağlanan çökme ile metalik köpük malzemesinin hacimsel küçülmesiyle birlikte sağlanan yoğunluk artışı ile bu deformasyon oranından sonra basma deformasyon gerilmesinde önemli artış meydana gelmiştir. Resim 5.14'te F, G ve H ile gösterilen hücrelerin Bastawos ve Evans, (2000) yaptığı çalışmadaki birinci deformasyon mekanizması ile çöktüğü gözlemlenmiştir. Birinci mekanizma, tek ekseninde dönme olmaksızın gerçekleşen büyük hücre çarpılmasıdır [Bastawos ve Evans, 2000].

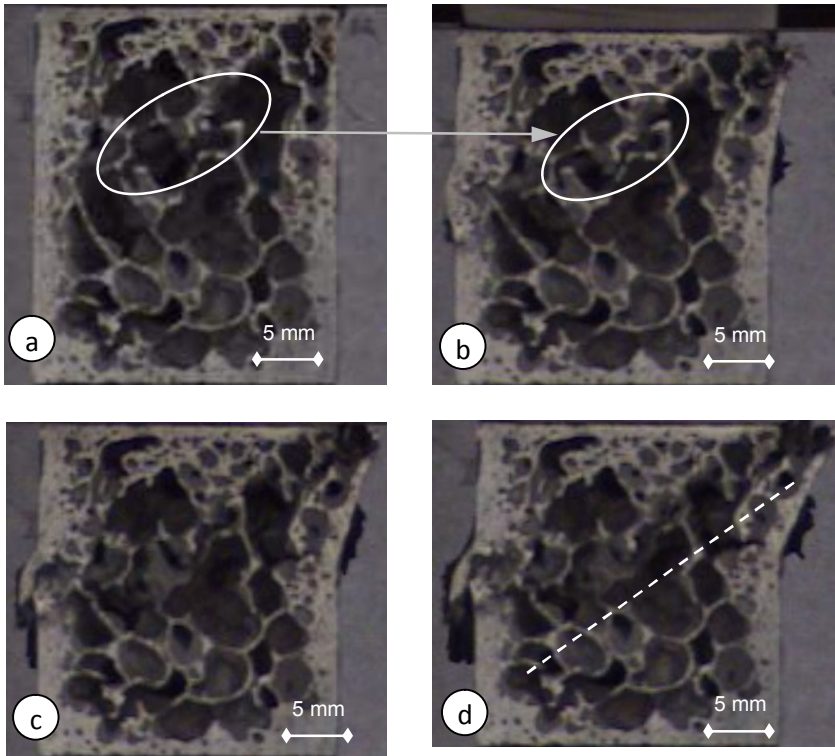


Resim 5.14. K88125 köpüğün basma testindeki deformasyon süreci; a) % 0 deformasyon, b) % 5, c) % 9, d) % 13 ve e) % 20.

Şekil 5.14'te K88126 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi gösterilmiştir. Başlangıçta düşey çökme deformasyonu ile başlayan gerilmedeki düşüşün ardından, yaklaşık % 40 çökme deformasyonuna kadar yoğunlaşma ile birlikte artan gerilme, yaklaşık 45° eğimde kayma deformasyonu ile oluşan çökme sürecindeki malzeme kaybı sebebiyle tekrar azalmıştır. Çökme tamamlanınca nihai yoğunlaşma süreci tekrar başlamıştır. K88123 ve K88124 metalik köpük malzemelerin gerilme-gerinim ilişkisinde olduğu gibi K88126 metalik köpüğün maksimum plato çökme gerilmesi akma gerilme değerinden fazla olduğu gözlenmiştir.



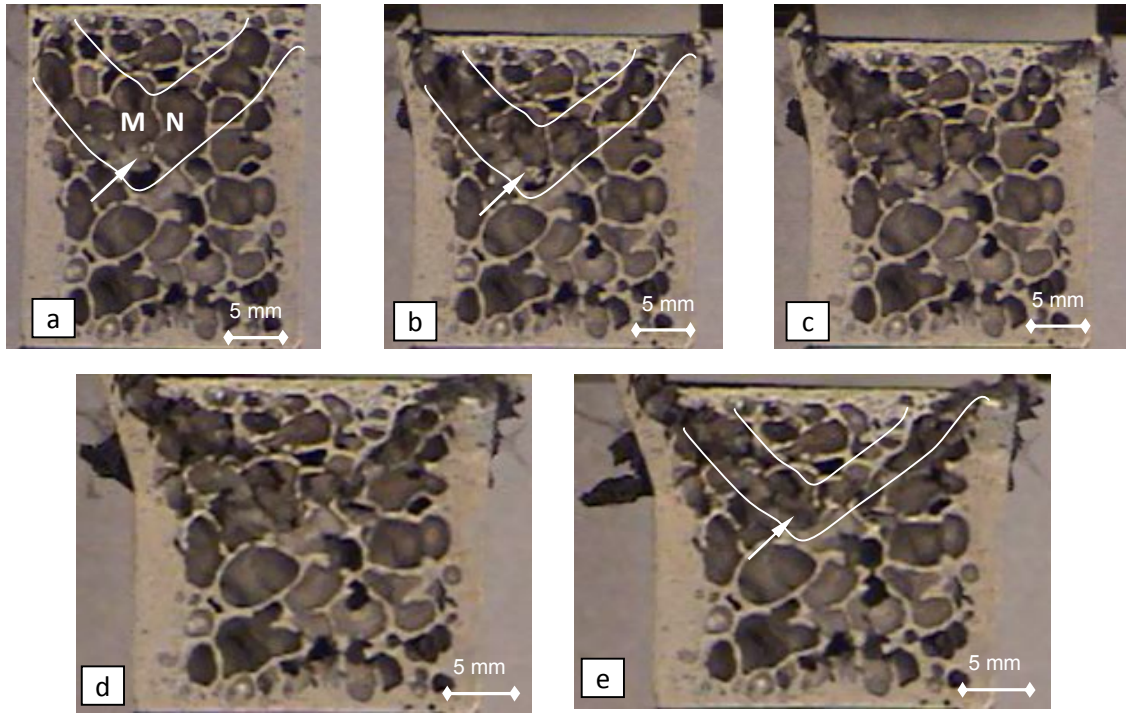
Şekil 5.14. K88126 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.



Resim 5.15. K88126 köpüğün basma testindeki deformasyon süreci.

Resim 5.15'te K88126 köpüğün K88123 köpüğün basma davranışı aşamalarına benzerlik göstermektedir. Deformasyon hattı boyunca köpükleşme üretim hataları ve bölgesel yoğunluk düşüklüğünden dolayı K88123 köpüğü ile benzerlik göstermiştir.

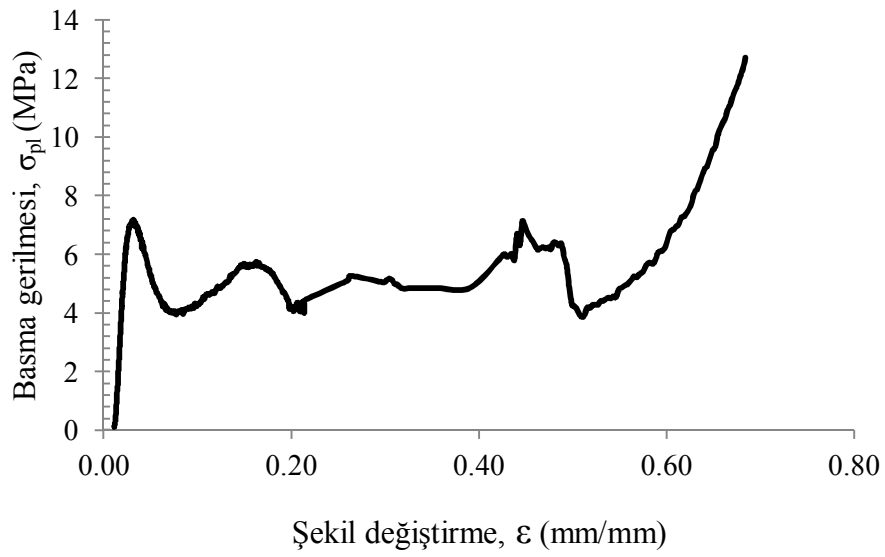
Fakat bununla birlikte Resim 5.15'e bakıldığında K88121 köpüğün deformasyon sürecine de benzerlik göstermektedir. Resim 5.15.d'de kesik çizgi ile deformasyon hattı gösterilmiştir. Yükün uygulandığı doğrultuya 45° 'lik açı ile hücre duvarları kırılarak deformasyon gerçekleşmiştir. Bu iki durum hücre şekillerinin yöne bağlı farklılık göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Enerji emme durumlarından Mod C'ye benzerlik göstermektedir. Mod C makaslama ile hücre duvarlarının enerji sönümlendiği düşünülen durumdur [Mu ve ark., 2010]. Resim 5.15'te elips alan içerisine taranmış iki hücre duvarının kayma görüntüleri gösterilmiştir.



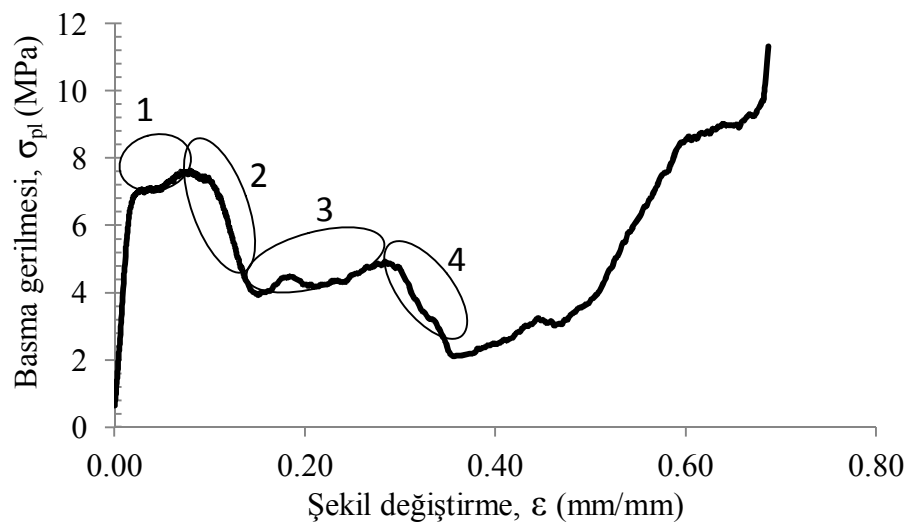
Resim 5.16. K88127 köpüğün basma testindeki deformasyon süreci.

K88127 köpük numunenin basma anındaki deformasyon süreci görüntüleri kademe kademe Resim 5.16'da gösterilmiştir. K88123 metalik köpüğün basma davranışı aşamalarına benzerlik göstermektedir. Resim 5.16.a'da gösterilen M ve N hücrelerinin köpikleşme sırasında hücre duvarlarının birleşerek köpürme yönüne paralel uzun hücreler oluşmuştur. Numune yan duvarlarının hücre duvarından kalın olmasından dolayı yükün uygulandığı yönde M ve N hücrelerinin komşu duvarı

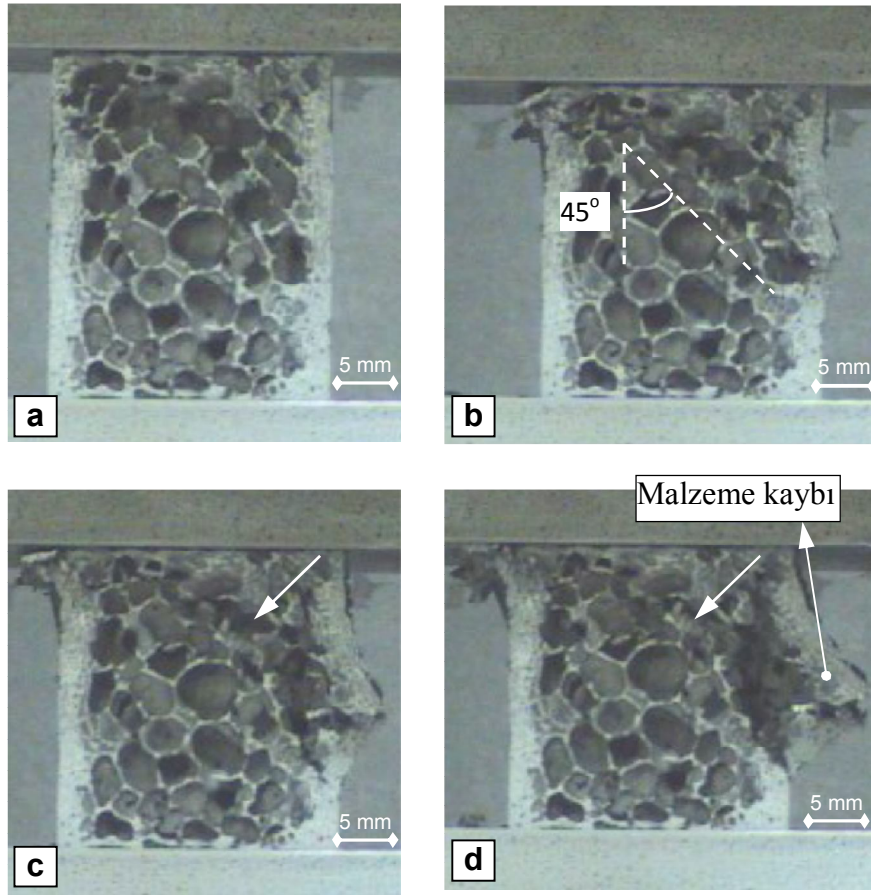
mesnet görevi görmüştür. Deformasyonun artmasıyla flambaja uğrayan hücre duvarı kırılarak bölgesel deformasyonu oluşturmuştur (Resim 5.16.b). Resim 5.16’da çizgi ile gösterilen kama şeklindeki deformasyon hattı boyunca yükü karşılamayan plato bölgelerinde çökme ve akabinde yoğunlaşma ile deformasyon hattının daraldığı gözlenmiştir. Şekil 5.15’e bakıldığında düzenli bir plato çökme bölgesi görülmemektedir.



Şekil 5.15. K88127 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.



Şekil 5.16. K88128 köpüğün gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.



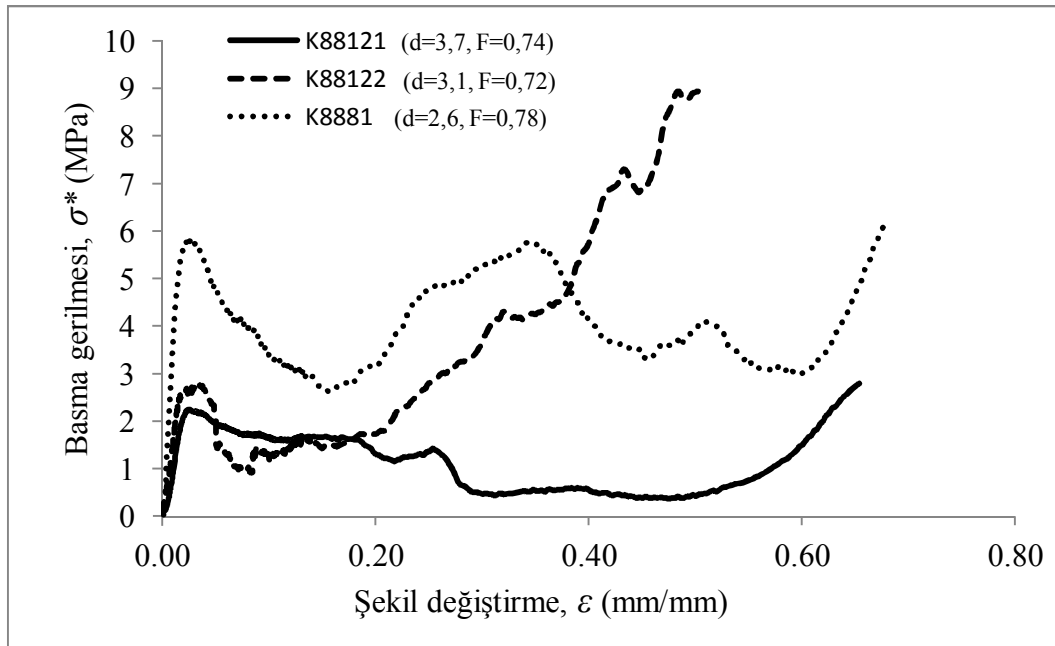
Resim 5.17. K88128 köpük malzemenin basma testindeki deformasyon süreci; a) % 0 deformasyon, b) % 11, c) %15 ve d) % 30.

K881228 köpük malzemenin basma testi süresindeki deformasyon K88121 köpüğüne çok yüksek oranda benzemektedir. Resim 5.17’de 45°’lik açı ile kayma bandı oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 5.16’da 1. bölgede bir miktar deformasyonla birlikte gerilmede artış ve devamında ani çöküşü gösteren gerilmede şiddetli düşüş mevcuttur. Resim 5.17.b’de maksimum gerilme artış noktasında % 11 deformasyon gerçekleşmiştir. 2. bölgede % 11-15 deformasyon aralığında ani ve önemli bir gerilme düşüşü gerçekleşmiştir. Bu bölgede kayma deformasyonu (Kayma ve çökme) ile birlikte malzeme kaybı da gerilmedeki bu düşüşe sebep olduğu söylenebilir (Resim 5.17.b-c). Zira çökme ile küçülen numune hacmine rağmen belirli oranda malzeme kaybı gerilmedeki artışa engel olmaktadır. 3. bölgede ise tekrar deformasyon artarken gerilmede hafifçe artmıştır. Bir miktar çökme ile birlikte

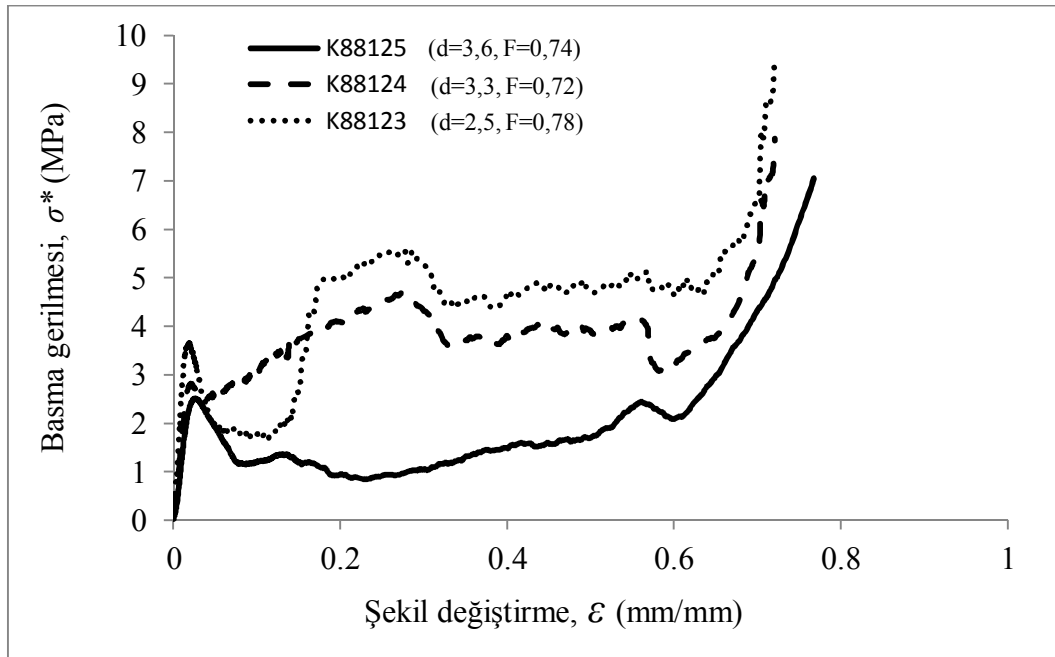
yoğunluk artışı ve deformasyona katılan yeni hücre katmanlarının etkisiyle kısmen gerilmenin arttığı söylenebilir. 4. Bölgedeki mekanizma ise 2. bölgenin tekrarı şeklindedir ve deformasyonun artmasıyla tekrar kayma ve çökme gerçekleşmiştir. Bu bölgedeki deformasyon süresinde önemli derecede malzeme kaybı meydana gelmiştir. Resim 5.17.d'de % 30 deformasyon civarında kayma ile çökme ve malzeme kaybı gözlemlenmiştir. % 35 deformasyondan sonra kayma bandı açısı artmıştır. Deformasyonun devamında yükün uygulandığı yöndeki yük bileşeni değeri artmıştır. Bunun sonucunda Bastawos ve Evans, (2000) yaptığı çalışmadaki birinci deformasyon mekanizması olan tek eksenli dönme ve kayma olmaksızın büyük hücre çarpılmasının devreye girdiği söylenebilir.

Metalik köpüklerin hücre boyutu, şekil faktörü ve yoğunluğuna göre σ - ϵ ilişkileri

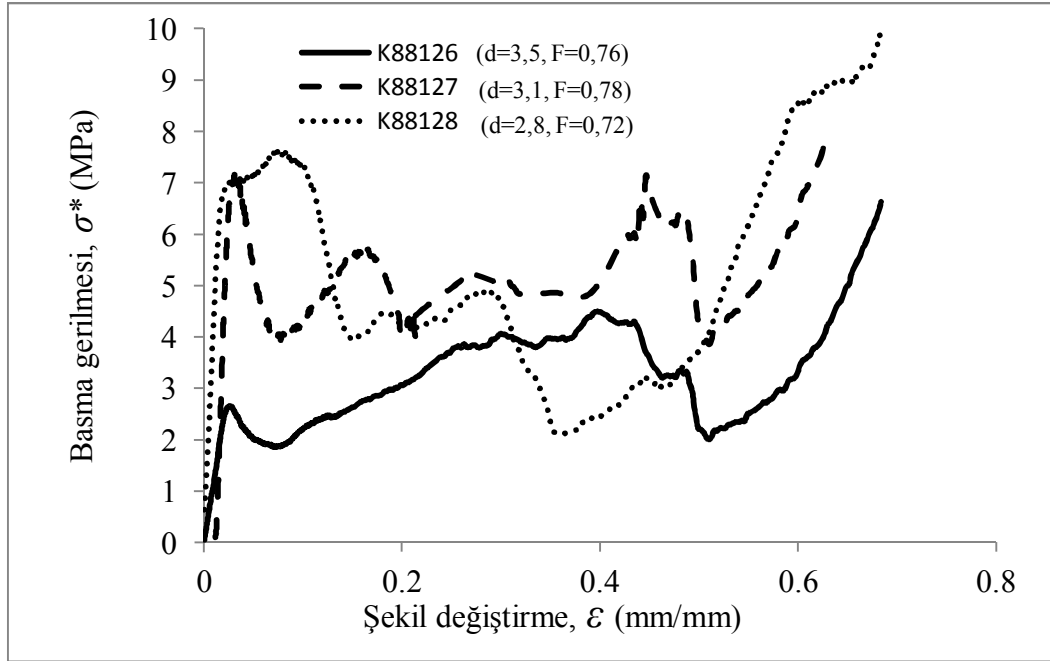
Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da aynı yoğunluk aralığında olan köpük malzemelerin basma testleri sonuçlarına bakıldığında hücre boyutu artıkça dayanımları azalmaktadır. Yoğun malzemelerde 7 MPa akma dayanımına ulaşılırken düşük yoğunluğa sahip malzemelerde 2 MPa akma dayanım verileri elde edilmiştir. Düşük yoğunlukta en iyi dayanım özelliği 0,42 g/cm³ yoğunluğundaki K8881 köpük malzemede tespit edilmiştir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17. Ortalama yoğunlukları $0,40 \text{ g/cm}^3$ olan köpüklerin $\sigma^* - \epsilon$ ilişkileri.

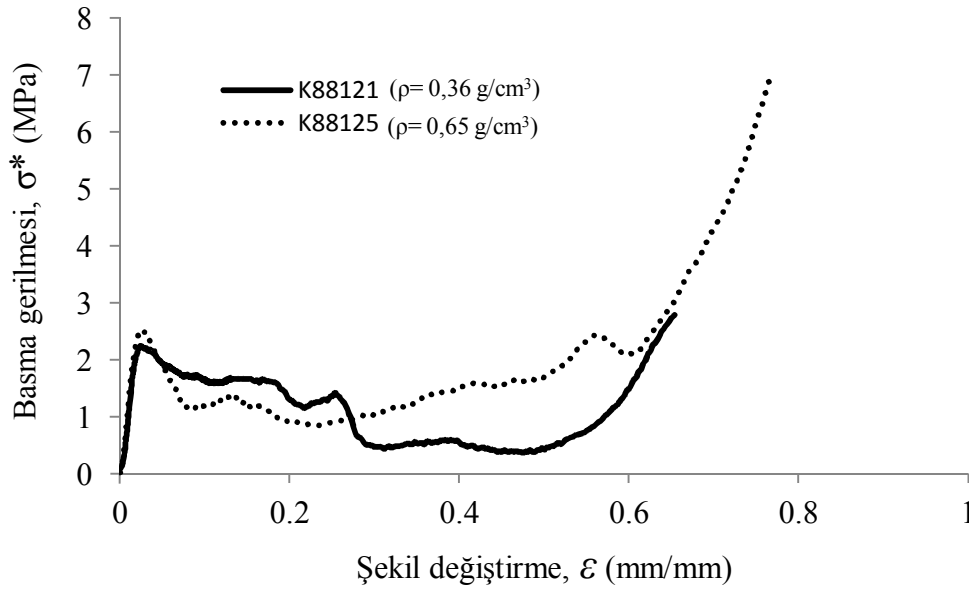


Şekil 5.18. Ortalama yoğunlukları $0,61 \text{ g/cm}^3$ olan köpüklerin $\sigma^* - \epsilon$ ilişkileri..



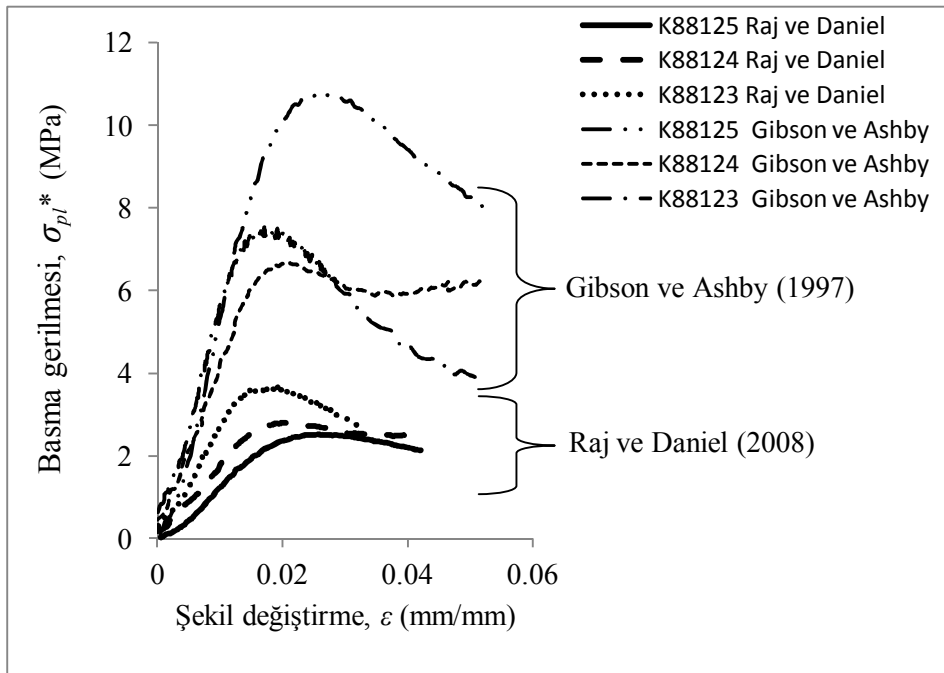
Şekil 5.19. Ortalama yoğunlukları $0,70 \text{ g/cm}^3$ olan köpüklerin σ^* - ϵ ilişkileri.

Şekil 5.17’de yaklaşık aynı yoğunluktaki K88121, K88122 ve K8881 metalik köpüklerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. ~6 MPa ile en yüksek akma dayanımı ortalama hücre boyutu 2,6 mm olan ve ideale daha yakın şekil faktörüne (0,78) sahip K8881 metalik köpük numunede elde edilmiştir. Yaklaşık yoğunluktaki bu numunelerin farklı ortalama hücre boyutu ve şekil faktörü, kırılma, kayma ve çökme mekanizmalarının türünü değiştirmiştir. Benzer ilişki, Şekil 5.18 (K88123, K88124 ve K88125) ve Şekil 5.19’daki (K88126, K88127 ve K88128) metalik köpük malzemelerde de belirlenmiştir. Şekil faktörü ve ortalama hücre boyutu metalik köpüklerin basma testlerinde önemli parametreler olduğu belirlenmiştir. Köpük hücrelerinin şekli, hücre deformasyon mekanizması üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [Mu ve ark., 2010]. Birbirlerine yakın yoğunluktaki metalik köpüklerin basma dayanımları, hücre boyutu küçük ve şekil faktörü ideale yakın olan köpük malzemelerde artmıştır (Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19).



Şekil 5.20. Aynı şekil faktörü ve ortalama hücre boyutuna sahip köpüklerde (K88121 ve K88125), yoğunluktaki değişkenliğin σ^* - ϵ ilişkisine etkisi.

Yaklaşık ortalama hücre boyutu ve şekil faktörü aynı, yoğunlukları farklı olan K88121 ve K88125 köpük malzemelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 5.20’de verilmiştir. K88121 ve K88125 köpük malzemeler yoğunlukları sırasıyla 0,36 ve 0.65 g/cm³ olmasına rağmen benzer σ - ϵ ilişki göstermişlerdir. Bu durumun hücrelerin kırılma ve/veya çökme mekanizmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. K88121 ve K88125 köpük malzemelerin çökme mekanizmaları sırasıyla Bastawos ve Evans, (2000) yaptığı çalışmadaki birinci ve ikinci deformasyon mekanizmalarıdır. 0,65 g/cm³ yoğunluğa sahip K88121 malzemenin yoğunluğu fazla iken birinci deformasyon mekanizması ile çökmesi, 0,36 g/cm³ yoğunluğa sahip K88125 malzemenin yoğunluğu az iken ikinci deformasyon mekanizması ile çökmesi, diğer değişkenler sabit iken benzer σ - ϵ ilişkisi göstermesi deformasyon mekanizmasının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Metalik köpük malzemelerin mekanik özellikleri sadece yoğunluk değişimleri ile değil, hücre boyutu, şekil faktörü ve hücrelerin yapı içerisinde yöne bağlı şekli ile ilgili olduğu söylenebilir.



Şekil 5.21. Farklı köpüklerde Eş 4.13 ve Eş 4.16 kullanılarak hesaplanan σ_{pl}^* , köpük plato akma gerilmesi.

Şekil 5.21'de Metalik köpüklerin plato akma gerilmesi-şekil değiştirme ilişkisinde farklı değişkenlerin etkisini savunan Gibson ve Raj'ın geliştirdikleri eşitlikler kullanılarak σ - ϵ eğrileri Şekil 5.21'de oluşturulmuştur. Karşılaştırma için K88123, K88124 ve K88125 köpük malzemeleri kullanılmıştır. Yoğunlukları sırasıyla 0,59 g/cm³, 0,61 g/cm³ ve 0,65 g/cm³'tür. Her iki formülde de yoğunluk kullanılmaktadır. Bu nedenle yoğunlukları birbirine yakın, hücre boyutları ve şekil faktörü farklı numuneler seçilmiştir.

Gibson ve Ashby'nin (1997) buldukları eşitliklerinden elde edilen plato akma gerilmeleri Raj ve Daniel'den (2008) elde edilen gerilmelerden oldukça yüksektir. Gibson'un modeliyle hesaplandığında K88125 köpük malzemenin plato akma gerilmesi Raj'ın modeliyle hesaplanmış plato gerilmesinin yaklaşık dört katı kadardır. Raj'ın yaptığı modellemedeki hücre boyutunun hesaplamalara dahil edilmesi bu farkı oluşturmuştur. Yoğunlukları yaklaşık aynı olan köpük

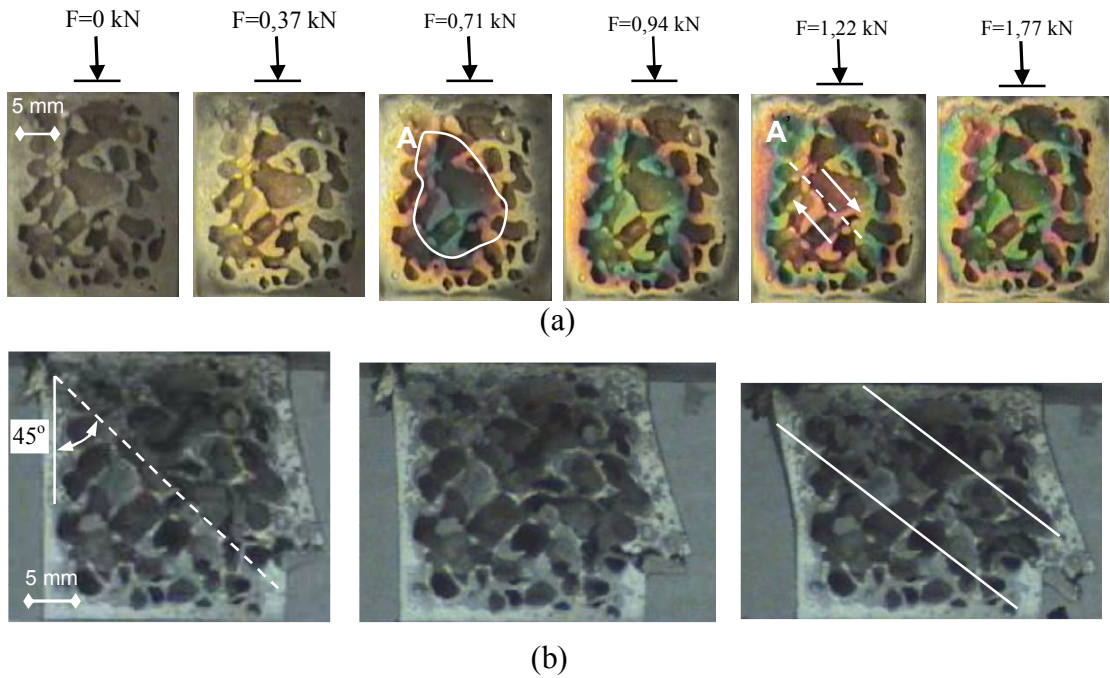
malzemelerin Gibson modeline göre akma gerilmesi hesaplandığında, küçükten büyüğe sırasıyla K88124, K88123 ve K88125 köpük malzemelerde belirlenmiştir. Raj modeline göre akma gerilmesi hesaplandığında, küçükten büyüğe sırasıyla K88125, K88124 ve K88123 köpük malzemelerde belirlenmiştir (Şekil 5.21). Raj modelini Gibson'dan ayıran hücre boyutu parametresi işleme alındığında ortalama hücre boyutu artıkça akma gerilmesi arttığı belirlenmiştir.

K88125 köpük malzemenin Gibson ve Raj modellerine göre yapılan elastikiyet modülü hesaplamalarında ise Gibson modelinde hesaplandığında 7,01 GPa bulunurken, Raj modelinde hesaplandığında 1,27 GPa değeri elde edilmiştir (Şekil 5.21). Bu arada oluşan büyük gerilme farkının sebebi, hücre boyutu ve şekil faktörü olduğu belirlenmiştir. Gibson modeli ile yapılan hesaplamalarda gerilme-şekil değiştirme eğimi aynı yoğunluktaki malzemeler için aynı olmaktadır. Fakat, Raj modeline göre yapılan hesaplamada, gerilme-şekil değiştirme eğimi farklı hücre boyutu ve şekil faktörüne sahip malzemelerde farklı bulunmuştur (Şekil 5.21).

5.4. Fotoelastisite Deney Sonuçları

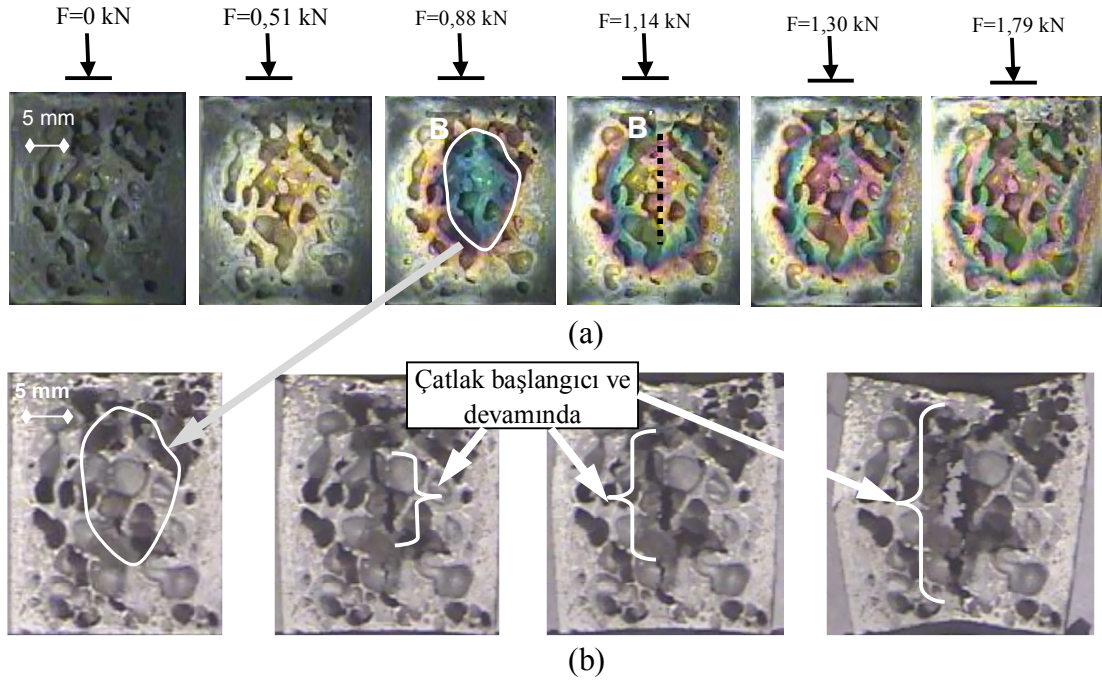
Fotoelastisite yöntemi ile gerilme analizi yapılan köpük malzemelerde, yoğun malzemelerdeki gibi tek eksenli gerilme hali oluşturulamamıştır. Bu sebeple köpük malzemelerde oluşan gerilme değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi mümkün olmamıştır. Fakat, Vishay PALC 3 Photostress programı kullanılarak tespit edilen görüntülerde, köpük malzemedeki elastik gerilme yığılma bölgeleri ve dereceleri hakkında önemli ve doğruluğu yüksek veriler tespit edilmiştir. Fotoelastik görüntülerde, yükün (dolayısıyla gerilmenin) artmasıyla renk geçişleri meydana getiren renk saçakları (fringe orders) elde edilmiştir. Aynı renklerin farklı tonlarının artan gerilme ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Fotoelastik görüntü alabilmek için yük değeri, akma gerilmesi değerinin altındaki elastik gerilme değerlerinde seçilmiştir.

Çizelge 5.1'deki üç grup (toplamda yedi) numuneye fotostres deneyi uygulaması ile fotoelastik görüntüleri alınmıştır. Resim 5.18.a'da verilen K88121 numunenin yüke bağlı fotoelastik görüntüsü verilmektedir. Ortalama hücre boyutu 3,7 mm olan köpük numunede gerilme dağılımı genellikle büyük tanelerin hücre duvarlarında olduğu tespit edilmiştir.



Resim 5.18. K88121 kodlu numunenin a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü, b) basma testi sırasında köpük üzerinde meydana gelen şekil değişikliği görüntüsü.

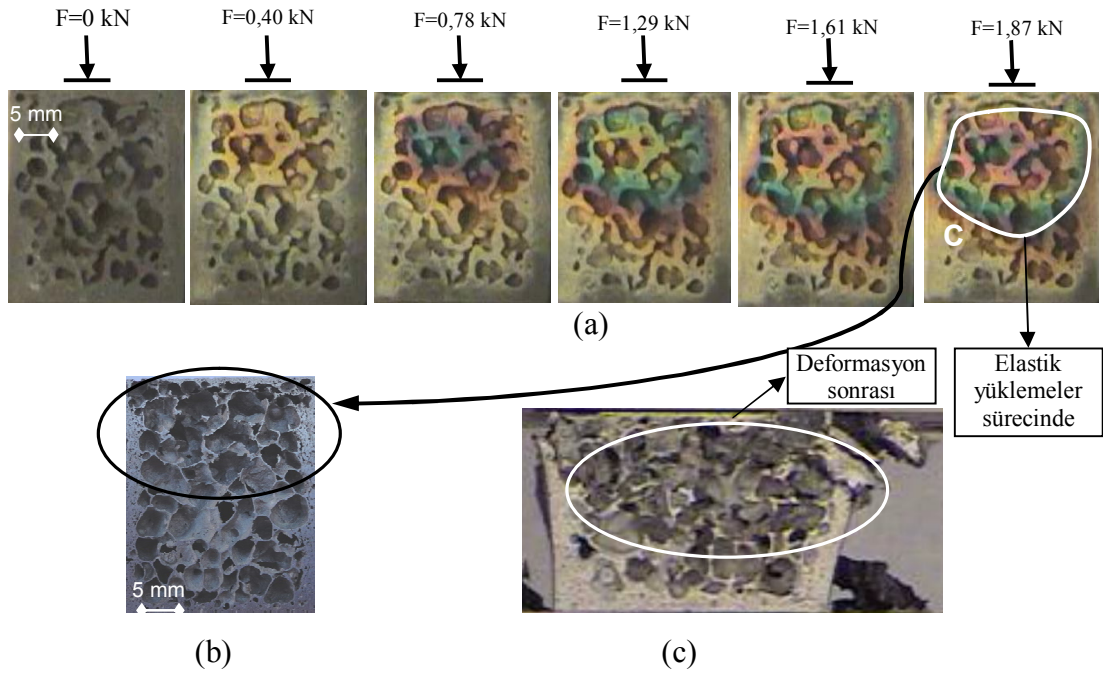
Şekil 18.a'daki 0.71kN'luk yüklemdeki "A" ile işaretlenmiş alandaki hücre duvarlarında gerilme yoğunlaşması olduğu koyu renk saçakları ile belirlenmiştir. A' ile gösterilen kesikli çizgi boyunca en yoğun gerilme bandının olduğu görülmektedir. Resim 5.18.b'de basma testinden sonra yaklaşık aynı hat üzerinden hücrelerin kırılarak deformasyona uğradığı görülmektedir. Deformasyon oluşan hattın yükün uygulandığı eksenle yaklaşık 45° açıda kaydığı Resim 5.18.b'de gösterilmiştir.



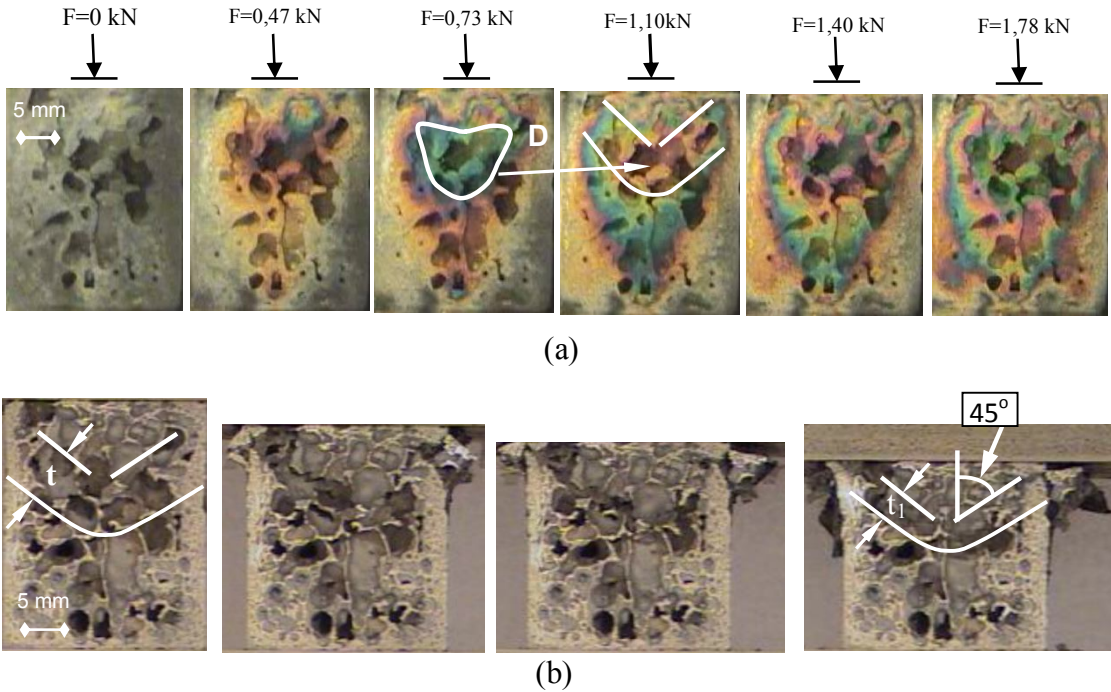
Resim 5.19. K88122 kodlu numunenin a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü, b) basma testi sırasında köpük üzerinde meydana gelen çatlakın ilerlemesi ve şekil değişikliği görüntüsü.

K88122 numunede K88121 numuneye göre farklı bir gerilme dağılımı gözlenmiştir. Resim 5.19.a'da gerilme yoğunlaşması, B ve B'de gösterildiği gibi uygulanan kuvvet yönüne paralel olduğu gözlenmiştir. Basma testinde ise bu bölgelerden hücrelerin deformasyona uğradığı görüntülerle doğrulanmıştır (Resim 5.19.b). Köpük hücrelerinde plastik şekil değişikliği başladıktan sonra gerilmenin yoğun olarak görünen renk yoğunluklu bölgeden çatlakın başladığı gözlemlenmiştir. Devam eden basma ile birlikte çatlak ilerleyerek şekil değişikliği meydana gelmiştir.

K8881 köpük numunede gerilme dağılımı homojen olmadığı gözlenmiştir. Köpürtme yönünde köpük parça üst kısımdaki yoğunlukları alt kısma göre daha düşüktür (Resim 5.20). Köpüklerin basma testinin karakterizasyonun yapan araştırmacılar tarafından köpük parçanın her bölgesinde aynı anda deformasyona uğramadığını, aksine bölgesel olarak kademe kademe deformasyona uğradığını belirtmişlerdir [Ruan ve ark., 2002]. Fotoelastik görüntü alınan C ile gösterilen alanın (yoğun renk saçakları) basma deformasyonu sonrası aynı bölgede çökme ve kırılmaların gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

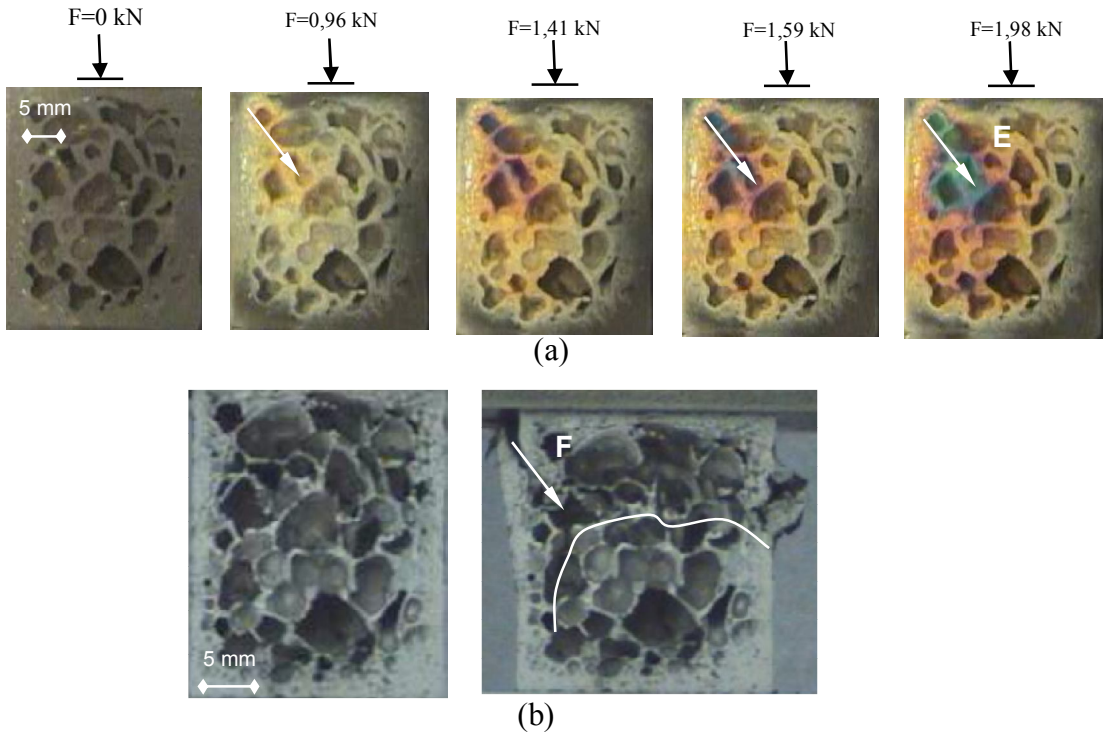


Resim 5.20. K8881 kodlu numunenin; a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü; b) Üretilen köpüğün görüntüsü, c) basma testi sırasında köpük üzerinde meydana gelen deformasyon sonrası görüntüsü.



Resim 5.21. K88124 kodlu numunenin; a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü, b) basma testi sırasında köpük üzerinde meydana gelen deformasyonun görüntüsü.

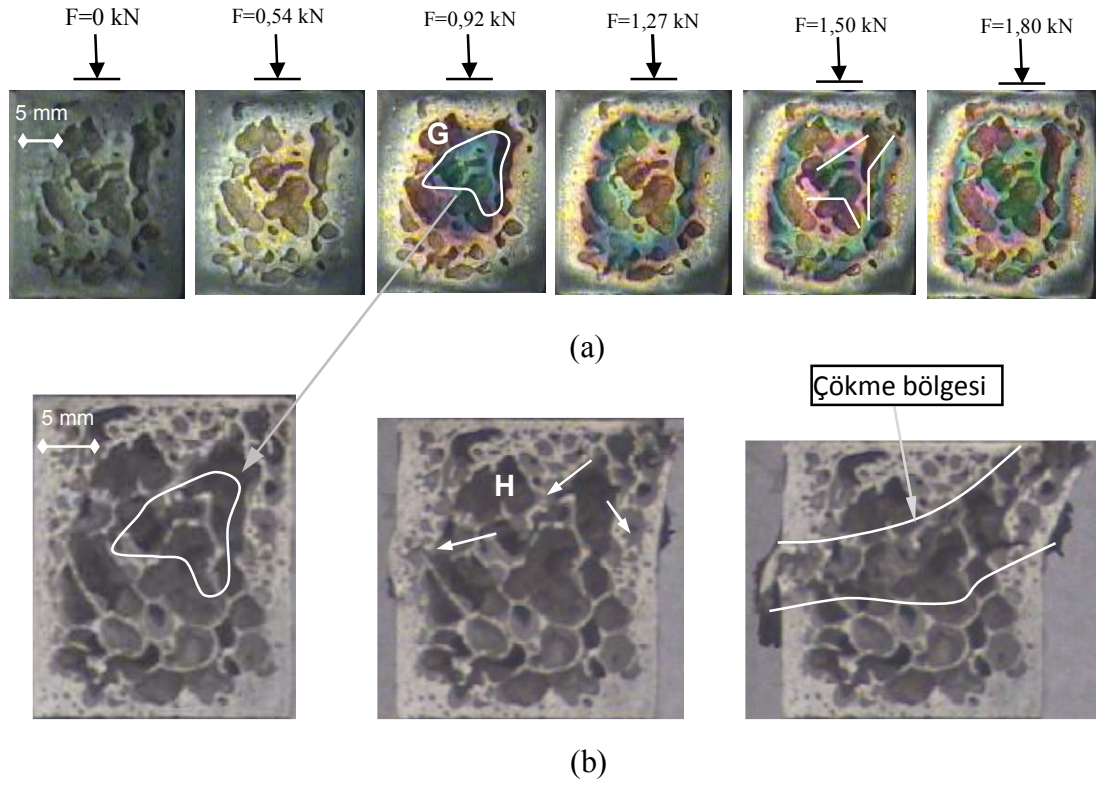
Resim 5.21.a'da K88124 köpük numunenin fotoelastik görüntüsünde D ile gösterilen bölgede gerilme yığılmasının daha yoğun olduğu gözlenmiştir. Küçük bir alan olması ve köpük parça üst kısmına yakın olmasından dolayı çökmenin bu bölgede olacağı öngörülmüştür. Resim 5.21.b'de görülen D alanının içindeki büyük hücrenin üst kısmındaki plato bölgesinde oluşan gerilme yığılması (yükün etkidiği alanın azalmasıyla), yükün uygulandığı doğrultuya 45° açı ile her iki yönden kama biçiminde çökme meydana gerçekleşmiştir. Çökmenin başlangıcı elastik sınırlar içerisindeki fotoelastik görüntüde elde edilen gerilme alanlarıyla aynı bölgeler olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgedeki deformasyonla birlikte üst çizginin yer değiştirme miktarı $|t-t_1|$ dir.



Resim 5.22. K88125 kodlu numunenin; a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü, b) basma testi sırasında köpük üzerinde meydana gelen deformasyonun görüntüsü.

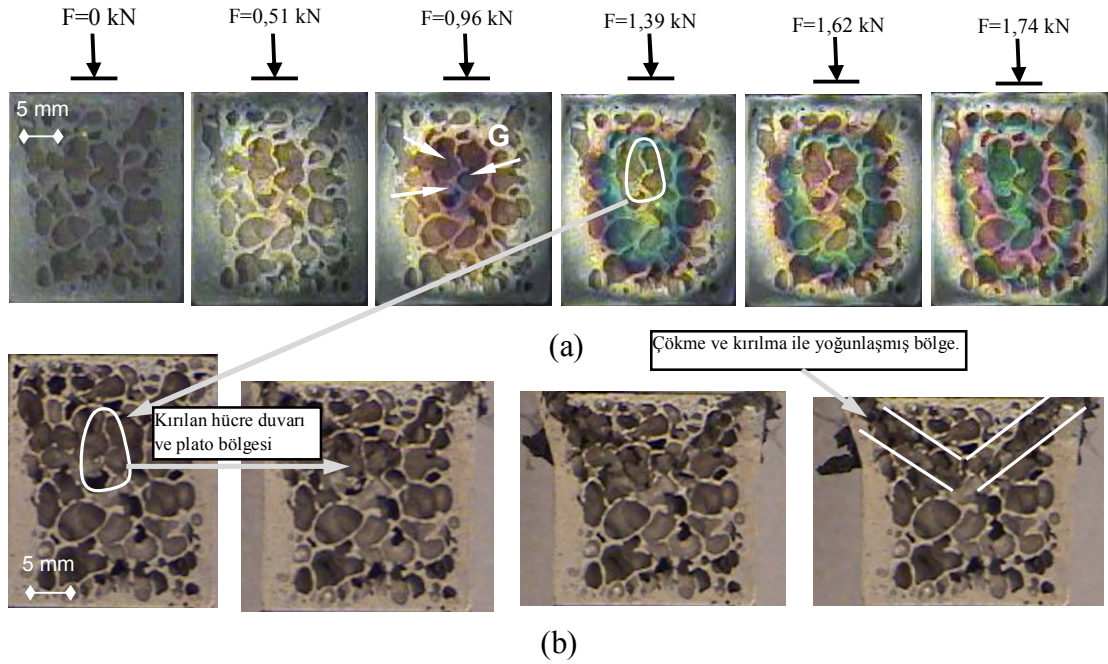
K88125 köpük malzeme üzerinde oluşan fotoelastik görüntüde gerilmenin E okları ile gösterilen bölgede yoğunlaştığı görülmüştür (Resim 5.22). Basma testi süresince

bu gerilme bölgesinin ilk kırılma sürecine katıldığı ve F de gösterilen doğrultularda deformasyonun gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Resim 5.23. K88126 köpük malzemeye ait; a) fotoelastik görüntüleri, b) basma anındaki çökme ve hücre duvarı kırılma görüntüleri.

Resim 5.23'te K88126 köpük malzemenin yüke bağlı fotoelastik görüntüleri gösterilmiştir. Burada F; tek yönlü uygulanan yük değerini temsil etmektedir. 0,92 kN yük uygulanan andaki fotoelastik görüntüde yığılma bölgesinin G ile gösterilen sınırlar içerisinde olduğu görülmüştür. Aynı kodlu numuneye yapılan basma deneyi deformasyon sürecinde çökmenin, fotoelastik gerilme yoğunlaşma bölgesi içerisinde olduğu gözlenmiştir (Resim 5.23.b). H ile gösterilen oklarda hücre duvarı kırılma hattını ve çökme yönünü göstermektedir. Bu deformasyonun, Resim 5.23.a'daki 1,50 kN yük altındaki fotoelastik görüntüdeki çizgi aralıklarında gösterilen yoğun renk saçığı bölgesinde oluşacağı öngörülmektedir.



Resim 5.24. K88127 köpük malzemenin; a) uygulanan yük değişimi ile fotoelastik görünümü, b) basma testi sürecinde köpük üzerinde meydana gelen deformasyonun görüntüsü.

K88127 köpük malzemedeki fotoelastik görüntülerinde G okları ile gösterilen plato bölgesinde gerilmenin yoğun olduğu gözlenmiştir (Resim 5.24). Köpük malzemenin elastisite modülü (E^*) ve akma gerilmesi (σ_{pl}), köpük malzemenin yoğunluğu, hücre boyutu ve dağılımı ile değişkenlik gösterir [Gibson ve Ashby, 1997; Simone ve Gibson, 1998; Andrews ve ark., 1999; Ashby ve ark., 2000; Degischer ve Kriszt, 2002]. Eş 2.10'da görüldüğü gibi yoğunluğun düşük olduğu bölgelerdeki hücre duvarları E^*/E_s oranını düşürecektir. Burada, homojen duvar kalınlıklı bir yapı için düşünülecek olursa $\sigma^*/\sigma_{pl} = C_2(\rho^*/\rho_s)^{3/2}$ eşit olacaktır [Andrews ve ark., 1999]. K88127 köpük malzemede hücre duvarlarının kalınlığının ve o bölgedeki yoğunluğun az olmasıyla elastik gerilme bölgelerinin buralarda yoğunlaştığı görülmüştür. Basma testi süreci görüntülerde de bu bölgelerde çökmelerin başladığı ve kırılma sürecinin devam ettiğini belirlenmiştir. (Resim 5.24.b).

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak, AlSi8Mg0,8 alaşımlı preform üretimi gerçekleştirilerek, aynı yoğunlukta farklı hücre morfolojisine ve hücre duvarı kalınlığına sahip kapalı hücreli köpük üretimi ve üretilen metalik köpüğün yük altında hücre duvarlarının kırılma şekilleri ve reflektif polariskop cihazı (Fotoelastisite cihazı) yardımıyla basma anındaki hücre duvarlarında meydana gelen gerilme yığınları ölçümü gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Toz metalurjisi (TM) yöntemiyle AlSi8Mg0,8 alaşımlı preform malzeme yüksek yoğunlukta başarıyla üretilmiştir. Sinterlenmiş TM malzemeye uygulanan 8:1 oranındaki sıcak ekstrüzyon sonrası haddeleme ile yoğunluk $2,66 \text{ g/cm}^3$ 'e yükselmiş ve % 99,3 e varan yoğunlukta köpürtmeye hazır preform malzemeler üretilmiştir.
2. Toz metal malzemenin sinterleme sonrası mikroyapısında Si ve Mg partiküllerinin Al matris içerisinde genel olarak homojen dağılımlı olduğu, fakat ekstrüze edilmiş numunede, ekstrüzyon doğrultusunda Si ve Mg parçacıklarının yönlendiği belirlenmiştir.
3. Sıcak ekstrüze edilmiş AlSi8Mg0,8 alaşımı preform malzemede kübik yapılı $\beta\text{-Mg}_2\text{Si}$ intermetalik oluştuğu belirlenmiştir.
4. Ekstrüze malzemelere sıcak/ılık haddeleme ile sağlanan ve %50'ye varan deformasyon işlemlerinde ise, ekstrüzyonla yönlenmiş Si partikülleri ve Mg'ca zengin bölgelerin mekanik fiberleşme etkisini arttırdığı belirlenmiştir.
5. Preform malzemelerin 720 ve 760 °C sıcaklıklarda köpürtme sürecinde sağlanan 4:1 oranındaki lineer genleşme ile homojen gözenek yapıları AlSi8Mg0,8 alaşımlı metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir.

6. Üretilen metalik köpük hücre duvarları mikroyapısı genel olarak α -Al dendrit fazı, Al-Si ötektik fazı, birincil Si fazı, yapı içerisinde çözünmüş Ti ve yarı kararlı hegzagonal β' -Mg₂Si çökeltisini içerdiği tespit edilmiştir.
7. Üretilen metalik köpük hücre duvarlarında çözünmemiş TiH₂ partiküllerine rastlanmıştır. Özellikle Al-Si ötektiği içinde yada kenarında bulunan bu partiküllerin ötektik çekirdeklenmesinde etken olduğunu düşündürmektedir.
8. Üç farklı yoğunluk aralığında üç farklı hücre boyutunda metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. En düşük yoğunluk 0,36 g/cm³ iken, en yüksek 0,70 g/cm³ yoğunluktaki metalik köpük malzemede belirlenmiştir.
9. Üretilen metalik köpük malzemelerde ideale en yakın şekil faktörü değeri (F=0,78) belirlenmiştir.
10. Üretilen metalik köpüklerde en düşük ve en yüksek ortalama hücre boyutu sırasıyla 2,5 mm ve 3,67 mm bulunmuştur.
11. Kenarları kapalı metalik köpük malzemelerin akma bölgesinden sonraki ilk plastik deformasyonun ardından gerilme azalması meydana gelmiştir. Metalik köpük malzeme yoğunluğu azaldıkça, ilerleyen şekil değişikliğinde, plato çökmelerin sabit gerilme ile değil de artan gerilmeyle birlikte gerçekleşmiştir.
12. Yan duvarları açık metalik köpüklerin basma deformasyonu sonucunda yaklaşık aynı yoğunluktaki köpük malzemelerin farklı ortalama hücre boyutu ve şekil faktörü, kırılma, kayma ve çökme mekanizmalarının türünü de değiştirmiştir.
13. Aynı yoğunluk aralığında olan numunelerin basma dayanımları, hücre boyutu artıkça azalırken, şekil faktörü ideale daha yakın olan köpük malzemelerde artmıştır.
14. Yoğunluğu yüksek malzemelerde maksimum 7 MPa plato akma dayanımına ulaşılırken düşük yoğunluğa sahip malzemelerde 2 MPa akma dayanımı elde edilmiştir. Düşük yoğunlukta en iyi dayanım özelliği 0,42 g/cm³ yoğunluğundaki ancak şekil faktörü 0.78 olan köpük malzemede tespit edilmiştir.

15. Gibson ve Raj'ın plato akma gerilmesi modellerinin her ikisiyle de hesaplama yapılmıştır. Ancak köpük malzemelerin plato gerilmesi ve elastikiyet modülleri sadece yoğunluk değerleri ile değil hücre şekli ve boyutu ile de ilgili olduğunu belirten ve deneysel verilerle uyumlu olan Raj modeli yorumlamada esas alınmıştır.
16. Gibson eşitliklerinden elde edilen plato akma gerilmesi ve elastikiyet modülü Raj modelinden elde edilen plato akma gerilmesi ve elastikiyet modülünden oldukça yüksek gerilme değerleri vermiştir. Raj'ın yaptığı modellemedeki şekil faktörünün ve hücre boyutunun hesaplamalara dahil edilmesi bu farkı oluşturmuştur.
17. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki Raj'ın Plato akma gerilmesi hesabı için kullandığı hücre şekil faktörü ve hücre boyutunun akma gerilmesine etkisi büyüktür ve gerçektir. Gibson'un denklemindeki gibi ihmal edilemez büyüklüklerdir.
18. Fotostres yöntemi uygulanarak, yükün artmasıyla renk geçişleri meydana getiren renk saçaklarını içeren görüntülerde, köpük malzemede elastik gerilme yığılma bölgeleri ve dereceleri hakkında önemli ve doğruluğu yüksek veriler tespit edilmiştir. Fakat köpük malzemelerde oluşan gerilme değerlerinin (sayısal) deneysel olarak belirlenmesi mümkün olmamıştır.
19. Farklı hücre deformasyon mekanizması ile şekil değiştiren 2,6-3,7 mm hücre boyutu aralığında üretilen metalik köpük malzemelerin fotostres yöntemi ile elastik yük sınırları içerisinde fotoelastik görüntüleri alınmıştır. Gerilim yoğunlaşmalarının olduğu bölgelerde (yoğun renk saçakları) basma deformasyonu sonrası aynı bölgede hücre plato çökme ve duvar kırılmaların gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu sayede fotoelastisite yönteminin metaik köpük malzemelerin gerilme altındaki mekanik davranışları hakkında ön bilgi sahip olmak için kullanılabileceği görülmüştür.

6.2. Öneriler

1. AlSi8Mg0,8 alaşımı yaşlandırma ısıl işlemi uygulanabileceğinden, köpürtme sonrası uygun parametreler belirlenerek yaşlandırma ısıl işlemi uygulanabilir ve mekanik özellikleri geliştirilebilir.
2. Metalik köpüklerin mikroyapılarının yanında hücre geometrileri değiştirilerek yüksek mekanik özellikli köpük malzeme geliştirme çalışmaları yapılabilir.
3. Köpük malzemelerin fotostres yöntemi ile elastik sınırlar içerisindeki mekanik davranışları incelenebilir. Özellikle hücre morfolojisinin metalik köpüklerin elastik ve ardından plaktik davranışlarına etkisi konusunda foto elastisite yöntemi kullanılarak karakterize ve optimizasyon yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Allen, B.C., Mote, M.W., and Sabroff, A.M., “Method of Making Foamed Metal”, ***U.S. Patent no: 3087807*** (1963).
- Aly, M.S., “Behavior of Closed Cell Aluminium Foams Upon Compressive Testing at Elevated Temperatures: Experimental Results”, ***Materials Letters***, 61:3138-3141 (2007).
- Amjad, S., “Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams”, Master Thesis, ***University of Cambridge***, Cambridge, 22-23 (2001).
- Andrews, E., Sanders, W. and Gibson, L.J., “Compressive and Tensile Behavior Of Aluminum Foams”, ***Materials Science and Engineering***, A270:113-124 (1999).
- Andrews, E.W., Gioux, G., Onck, P. and Gibson, L.J., “Size Effects in Ductile Cellular Solid. Part II: Experimental Results”, ***International Journal of Mechanical Sciences***, 43:701-713 (2001).
- Apelian, D., “Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Improved Performance”, ***North American Die Casting Association***, 6-17 (2009).
- Asavavisithchai, S. and Kennedy, A.R., “The Effect of Mg Addition on the Stability of Al–Al₂O₃ Foams Made by a Powder Metallurgy Route”, ***Scripta Materialia***, 54:1331-1334 (2006).
- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W. and Wadley, H. N. G., “***Metal Foams: A Design Guide***”, USA, 1-200 (2000).
- Azeloğlu, C.O., Keskin, İ. ve Bayraktar, M., “Zincir Baklasında Yük Altında Oluşan Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Fotoelastisite Yöntemiyle İncelenmesi”, ***Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi***, 4, 41-48 (2008).
- Azeloğlu, C.O. ve Alpay, O., “Yük Kancasındaki Gerilmelerin Farklı Metotlarla İncelenmesi ve Gerilme Dağılımının Fotoelastisite Deneyi ile Doğrulanması”, ***Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi***, 6:71-79 (2009).
- Azzi, W.E., “A Systematic Study on The Mechanical and Thermal Properties of Open Cell Metal Foams For Aerospace Applications”, Yüksek Lisans Tezi, ***North Carolina State University***, Raleigh North Carolina, 2-109 (2004).
- Banhart, J., “Metallic foams : Challenges and Opportunities”, ***Eurofoam***, Bremen, 13-20 (2000).

Banhart, J., “Metal Foams: Production and Stability”, *Advanced Engineering Materials*, 8:781-794 (2006).

Banhart, J., “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams”, *Progress in Materials Science*, 46, 559-632 (2001).

Banhart, J. and Baumeister, J., “Deformation Characteristics of Metal Foams”, *Journal of Materials Science*, 33, 1431-1440 (1998).

Banhart, J., “Manufacturing Routes for Metallic Foams”, *JOM*, 22-27 (2000).

Banhart, J. and Weaire, D., “On the Road Again - Metal Foams Find Favor” *Pyhsics Today*, 55: 37-42 (2002).

Babcsan, N., Leitimeier, D. and Degischer, H.P., “Foamability of Particle Reinforced Aluminium Melt”, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 34:22-29 (2003).

Babcsan, N., Banhart, J. and Leitimeier, D., “Metal Foams – Manufacture and Physics of Foaming”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Slovakia, 5-15 (2005).

Bastawros, A. F. and Evans, A. G., “Deformation Heterogeneity in Cellular Al Alloys”, *Advanced Engineering Materials*, 2(4):210-214 (2000).

Baumgartner, F., Duarte, I., and Banhart, J., “Industrialization of Powder Compact Foaming Proces”, *Advanced Engineering Materials*, 2(4):168-174 (2000).

Birol, Y., “The effect of homogenization practice on the microstructure of AA6063 billets”, *Journal of Materials Processing Technology*, 148, 250–258 (2004).

Çinici, H., “Toz Metalurjisi Yöntemi İle Alüminyum Bazlı Metalik Köpük Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2004).

Çevik, Bekir, “Kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerine kalıcı gerilmelerin etkisinin deneysel olarak belirlenmesi”, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğt. Fak. Metal Eğitimi Bölümü*, Ankara, 1-4, 91-94 (2009).

Davies, G.J. and Zhen S., “Metallic Foams: Their Production, Properties and Applications” *J. Material Science*, 18: 1899-1911 (1983).

Degischer, H.P. and Kriszt, B., “Handbook of Cellular Metals: Production, Processing and Applications”, *Wiley-VCH*, Weinheim, 1-363 (2002).

Deqing, W. and Ziyuan, S., “Effect of Ceramic Particles on Cell Size and Wall Thickness of Aluminum Foam”, *Materials Science and Engineering*, A 361:45–49 (2003).

Duarte, I., Banhart, J., “A Study of Aluminium Foam Formation Kinetics and Microstructure”, *Acta mater.*, 48:2349-2362 (2000).

Elbir, S., “Kapalı Gözenekli Alüminyum Kompozit Köpüklerin Hazırlanması ve karakterizasyonu”, *İzmir Teknoloji Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, 28-79 (2001).

Elbir, S., Yılmaz, S. and Güden, M., “Kapalı hücre alüminyum köpük metallerin üretim metodları ve mekanik özellikleri”, *TMMOB Metalurji Dergisi*, 23(120):35-42 (1999).

Esmazelzadeh, S. and Simchi, A., “Foamability and compressive properties of AlSi7–3 vol.% SiC–0.5 wt.% TiH₂ powder compact”, *Materials Letters*, 62:1561-1564 (2007).

Esmazelzadeh, S., Simchi, A. and Lehmhus, D., “Effect of Ceramic Particle Addition on the Foaming Behavior, Cell Structure and Mechanical Properties of P/M AlSi7 Foam”, *Materials Science and Engineering*, A424: 290-299 (2006).

Gáspár, J., Borbás, L. and Thamm, F., “Experimental Tests On Mandible And Tooth Prosthesis”, *22nd DANUBIA-ADRIA Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics*, Italy, 1-2 (2005).

Gergely, V. and Clyne, B., “The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors”, *Advanced Engineering Materials*, 2(4):175-178 (2000).

Gergely, V., Curan, D. C. and Clyne, T. W., “The FORMGRIP Process: foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors”, *Composites Science and Technology*, 63: 2301–2310 (2003).

Gibson, L. J. and Ashby, M. F., “Cellular Solids: Structure And Properties-Second edition”, *Cambridge University Press*, UK, pp.175-308 (1997).

Gökmen, U., Çinici, H., Özçatalbaş, Y. and Türker, M., “Al₂O₃ Takviyeli Metalik Köpüğe Köpürtme Sıcaklığı ve Köpürtücü Madde Miktarı Etkisinin Araştırılması”, *5. Uluslararası TM konferansı*, Ankara, pp 822-828 (2008).

Guden, M. and Yuksel, S., “SiC- Particulate Aluminum Composite Foams Produced from Powder Compacts: Foaming and Compression Behavior”, *J. Mater SCI*, 41:4075-4084 (2006).

Hanssen A.G., Langseth, M. and Hopperstad, O. S., “Static and Dynamic Crushing of Circular Aluminium Extrusions With Aluminium Foam Filler”, *Int. J. of Impact Eng.*, 24 (5): 475-507 (2000).

Hupfer, K., “Einfluß der Mikrostruktur auf die Festigkeitseigenschaften von Metallschäumen”, *Technische Universität Braunschweig, Institut für Allgemeine Mechanik und Festigkeitslehre*, p.32-37, (2003).

Ip, S. W., Wang, Y. and Toguri, J. M., “Aluminium Foam Stabilization by Solid Particles”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 38(1):81-92 (1999).

Internet: Alporas “Aluminium foam”,
http://www.gleich.de/files/data_sheet_alporas.pdf (2012).

Internet: Kujawski, D., “Photoelasticity Experiment, Mechanical and Aeronautical Engineering Western Michigan University, Experimental Solid Mechanics Laboratory Notes”,
<http://www.mae.wmich.edu/faculty/kujawski/photoelasticity%20test.pdf> (2011).

Internet: Uzol S.N., TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Makina Laboratuvarı, Reflektif Polariskop Notları,
<http://nsezeruzol.etu.edu.tr/courses/MAK411/docs/MAK401-lab4.doc> (2008).

Jin, I., Kenny, L.D. and Sang, H., “Method of Producing Lightweight Foamed Metal”, *U. S. Patent no: 4973358*, (1990).

Kaufman, J. Gilbert and Rooy Elwin L., “Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications”, *ASM International*, 39-120 (2004).

Kennedy, A.R., “Aspects of the Reproducibility of Mechanical Properties in Al Based Foams”, *Journal of Materials Science*, 39:3085-3088 (2004).

Kennedy, A.R. and Asavavisitchai, S., “Effect of TiB₂ Particle Addition on the Expansion, Structure and Mechanical Properties of PM Al Foams”, *Scripta Materialia*, 50:115-119 (2004).

Kim, A., Tunvir, K., Jeang, G.D. and Cheon, S.S., “A Multi-Cell FE- Model for Compressive Behaviour Analysis of Heterogeneous Al-Alloy Foam”, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 14:933-945 (2006).

Kim, A., Hasan, Md.A., Nahm, S.H. and Jun, Y.D., “Compressive Mechanical properties of Closed Cell Al-Si-Cu-Mg Alloy Foams”, *International conference on mechanical engineering* Bangladesh, 1-6 (2003).

Kim, A., Tunvir, K., Nahm, S.H. and Cho, S.S., “ Time-temperature Superposition for Foaming Kinetics of Al-Alloys Foams”, *Journal of Materials Processing Technology*, 203:450-456 (2008).

Koza, E., Leonowicz, M., Wojciechowski, S. and Simancik, F., “Compressive Strength of Aluminium Foams”, *Materials Letters*, 58:132-135 (2003).

Körner, C. and Singer, R.F., “Processing of Metal Foams-Challenges and Opportunities”, *Advanced Engineering Materials*, 2(4):159–165 (2000).

Lehmhus, D. And Banhart, J., “Properties Of Heat-Treated Aluminium Foams”, *Materials Science and Engineering*, A349:98-110 (2003).

Markaki, A.E. and Clyne, T.W., “ The Effect of Cell Wall Microstructure on The Deformation and Fracture of Aluminium-Based Foams”, *Acta Materialia*, 49:1677-1686 (2001).

Matijasevic, B. and Banhart, J., “ Improvement Of Aluminium Foam Technology By Tailoring Of Blowing Agent”, *Scripta Materialia*, 54:503-508 (2006).

Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S. and Kitahara, A., “ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications”, *Adv. Eng.Mat.*, 2(4):179-183 (2000).

Montanini, R., “ Measurement of Strain Rate Sensitivity of Aluminium Foams for Energy Dissipation”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47:26-42 (2005).

Mu, Y., Yao, G., Liang, L., Luo, H. and Zu, G., “Deformation Mechanisms Of Closed-Cell Aluminum Foam In Compression”, *Scripta Materialia*, 63:629–632 (2010).

Mukai, T., Miyoshi, T., Nakano, S., Somekawa, H., Higash, K., “Compressive response of a closed-cell aluminum foam at high strain rate”, *Scripta Materialia*, 54:533–537 (2006).

Müller, A. and Mosler, U., “Gefügeinterpretation von Aluminium-Schäumen”, *Institut für Metallkunde*, TU Bergakademie Freiberg, Frankfurt, p.1-6, (2001).

Nafisi S., Ghomashchi R., “Effect of modification during conventional and semi-solid metal processing of A356 Al-Si alloy”, *Materials Science and Engineering*, A 415, 273–285 (2006).

Ozan, S., Taksin, M., Kolukisa, S. and Ozerdem, M.S., “Application of ANN in the Prediction of the Pore Concentration of Aluminum Metal Foams Manufactured by

Powder Metallurgy Methods”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39:251–256 (2008).

Özkır, S.E., “Düz ve Eğimli Yerleştirilmiş Farklı İmplant Tasarımları Üzerine Yapılan Sabit Restorasyonların Fotoelastik Stres Analizi ile İncelenmesi”, *Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 40-47 (2007).

Pashak, J.F., “Cellularized light metal”, *US patent no: 2935396*, (1960).

Papadopoulos, D.P., Konstantinidis, I.Ch., Papanastasiou, N., Skolianos, S., Lefakis, H., Tsipas, D.N., “Mechanical Properties Of Al Metal Foams”, *Materials Letters*, 58:2574– 2578 (2004).

Paul, A. and Ramomurty, U., “Strain Rate Sensitivity Of A Closed-Cell Aluminum Foam”, *Materials Science and Engineering*, A281:1-7 (2000).

Pawlicki, J., Koza, E., Zurawski, P., Leonowicz, M., “Mechanical Properties of Closed Cell Al Foams Based on Tetrakaidecahedronal Model of Structure”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, 235-238 (2003).

Peroni, L., Avalle, M., Peroni, M., “The Mechanical Behaviour Of Aluminium Foam Structures In Different Loading Conditions”, *International Journal of Impact Engineering*, 35:644–658 (2008).

Raghavan, V., “Al-Mg-Si (Aluminum-Magnesium-Silicon)”, *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, Vol. 28, No. 2 189-191 (2007).

Raj, R.E. and Daniel, B.S.S., “Sreuctural and Compressive Property Correlation of Closed-Cell Aluminium Foam”, *Journal of Alloys And Compounds*, (in press), (2008).

Ruan, D., Lu, G., Chen, F.L., Siores, E., “Compressive Behaviour Of Aluminium Foams At Low And Medium Strain Rates”, *Composite Structures*, 57:331–336 (2002).

Saha, P. K., “Aluminum Extrusion Technology”, *ASM International*, chapter 1, 1-28, (2000).

Schaeffler, P., Rajner, W., Claar, D., Trendelenburg, T. and Nishimura, H., “Production, properties and applications of Alulight cloded-cell Aluminium foams”, *Alulight*, www.alulight-america.com/amt2005.pdf, 1-6 (2005).

Seitzberger, M., Rammerstorger, F.G. and Degischer, H.P., “Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam”, *Acta Mechanica*, 125:95-103 (1997).

Simone, A. E. And Gibson, L. J., “Effects Of Solid Distribution On The Stiffness And Strength Of Metallic Foams”, *Acta Mater.*, vol. 46-6, pp. 2139-2150 (1998).

Shapovalov, V., “Porous and Cellular Materials for Structural Applications” *Phys. Metals Metallogr.* 76:335–337 (1993).

Shiomi, M., Imagama, S., Osakada, K. and Matsumoto, R., “Fabrication of Aluminium Foams From Powder by Hot Extrusion and Foaming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 210:1203-1208 (2010).

Stöbener, K., Baumeister, J., Rausch, G. and Busse, M., “Forming Metal Foams by Simpler Methods for Cheaper Solutions”, *Met. Powder Repor*, 60:12-16 (2005).

Stöbener, K., Lehmhus, D., Avalle, M., Peroni, L. and Buse, M., “Aluminum Foam-Polymer Hybrid Structures (APM Aluminium Foam) in Compression Testing”, *International Journal of Solids and Structures*, 45:5627-5641 (2008).

Stöbener, K., Baumeister, J., Rausch, G. and Busse, M., “Mechanics of Aluminum Foam-Polymer Hybrids”, *Advanced Engineering Materials*, 10(9):853-857 (2008).

Song, Hong-Wei, He, Qi-Jian, Xie, Ji-Jia, Tobota, A., “Fracture mechanisms and size effects of brittle metallic foams: In situ compression tests inside SEM”, *Composites Science and Technology*, 68:2441–2450 (2008).

Sugimura, Y., Meyer, J., He, M.Y., Bart-Smith, H., Grenstedt, J. and Evans, A.G., “On the Mechanical Performance of Closed Cell Al Alloy Foams”, *Acta Materialia*, 45(12): 5245-5259 (1997).

Srivastava, V.C., Sahoo, K.L., “Processing, Stabilization and Applications of Metallic Foams. Art of Science”, *Materials Science*, 25:733-753 (2007).

Türker, M., “Toz Metalurjisi Yöntemi İle Alüminyum Köpük Üretimi Procuction Of Al Foams By Powder Metallurgy Route”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09)*, Karabük, Türkiye, 1-6 (2009).

Turker, M., Ozcatalbas, Y., Cinici, H., Gokmen, U. and Uzun, A., “Effect of Foaming Agent on The Structure and Morphology of Al and Alumix 231 Foams Produced by Powder Metallurgy”, *Materials Science Forum*, vol. 672 pp 297-302 (2011).

Uzun, A., Gökmen, U. ve Türker, M., “Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen Alüminyum Esaslı Metalik Köpükte Si İlavesinin Köpürmeye Etkisi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09)*, Karabük, s. 1-4, 2009.

Vishay Application-Note IB-221-D, “Instructions for Casting and Contoured PhotoStress® Sheets”, 1–11, (2010).

Vishay Instruction Bulletin B-236-5, “Instructions for Mixing Type PL-8 Liquid Plastic PhotoStress® Sheets”, 1–2, (2010).

Vishay Tech Note TN-702-2, “Introduction to Stress Analysis the PhotoStress Method”, 1–13, (2011).

Wadley, H.N.G., “Cellular Metals Manufacturing”, *Advanced Engineering Materials*, 4(10):726-733 (2002).

Wood, J.T., “Production and applications of continuously cast, foamed aluminum”, *Fraunhofer USA Metal Foam Symposium*, Delaware, 31-35 (1997).

Yu C.J., Eifert H.H., Banhart J. and Baumeister J., “Advanced Materials and Processes”, 11:45-47 (1998).

Yang, C.C. and Nakae, H., “Foaming Characteristics Control During Production of Aluminum Alloy Foam” *Journal of Alloys and Compounds*, 313:188-191 (2000).

Yu, S., Luo, Y. and Liu, J., “Effects of strain rate SiC particle on the compressive property of SiC_p/AlSi₉Mg composite foams”, *Materials Science and Engineering*, A487:394-399 (2008).

Zajac, S., Bengtsson, B., Johansson, A. and Gullman, L., “Optimisation of Mg₂Si Phase for Extrudability of AA 6063 and AA 6005 Alloys”, *Materials Science Forum*, v. 217- 222, p397-402, (1996).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BAHÇECİ, Ersin
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 23.05.1981 İskenderun
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (546) 214 89 41
 e-mail : ersinb81@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Metal Eğitimi Bölümü	2006
Lisans	Gazi Üniversitesi / Metal Öğretmenliği	2003
Lise	İskenderun And. ve End. Mes. Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010–	Kastamonu Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Ozcatalbas, Y., Bahceci, E and Turker, M., “Effect of Cutting Tool Materials on Surface Roughness and Cutting Forces in Machining of Al-Si₃N₄ Composite Produced by Powder Metallurgy”, Proceeding of the 2006 Powder Metallurgy

World Congress and Exhibition, Materials Science Forum, 534-536: 869-872, 2007.

2. Ozer, A., Bahceci, E., "Machinability Of AISI 410 Martensitic Stainless Steels Depending On Cutting Tool And Coating", Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Vol 24, No 4, 693-698, 2009.
3. Ozcatalbas, Y., Bahceci, E. and Turker, M., "Effect of Tool Material on Chip Formation in The Machining of Al-Si₃N₄ Composites", Advances in Materials and Processing Technologies, Las Vegas, Nevada, USA, Session: Advances in Machining II 2006.
4. Günay, M., Bahçeci, E., Şeker, U. ve Türker, M., "Investigation of Mechanical Properties of Al-Si Alloy/SiCp Composites Produced by Powder Metallurgy", 5th Internatiaonal Powder Metalurgy Congress, Ankara, 2008.
5. Hates, H., Turker, M., Cinici, H., Bahceci, E., "Production of Sandwich Foam by Using Diffusion Welding Technique", World PM2010 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, Floransa/Italy, 2010.
6. Bahçeci, E., Özçatalbaş, Y. ve Türker, M., "TM Yöntemiyle Büyük Yüzey Alanlı Metalik Köpük Üretiminde Köpürebilirlik Problemleri", 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ankara, 253-260, 2011.
7. Bahçeci, E., Özçatalbaş, Y. ve Türker, M., "TM Yöntemiyle AlSiMg Alaşımı Metalik Köpük Üretimi için Geliştirilen Preform Malzeme Üretim Sürecinin Karakterizasyonu", 6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ankara, 797-801, 2011.
8. Bahçeci, E ve Ekici, G., "Öğretmen Adaylarının Bilgisayara Yönelik Tutumları İle Bilgisayarla İlgili Öz-Yeterlik Algılarının Değerlendirilmesi Üzerine Bir Çalışma", VII. Ulusal Fen Bilimleri ve Matematik Eğitimi Kongresi, Ankara, 66, 2006.
9. Ekici, G. ve Bahçeci, E. "Öğretmen Adaylarının KPSS' ye Yönelik Tutumlarının İncelenmesi", VII. Ulusal Fen Bilimleri ve Matematik Eğitimi Kongresi, Ankara, 539, 2006.

Hobiler

Otomobil kullanmak, Formula 1, futbol, strateji ve akıl oyunları.