155685

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ

Hanifi ÇİNİCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
(METAL EĞİTİMİ)

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2004
ANKARA

Hanifi ÇİNİCİ tarafından hazırlanan TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Y. Doç. Dr. İbrahim USLAN

Üye : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

Üye : _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Halil ARIK

Üye : _____

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i

ABSTRACT iii

TEŞEKKÜR v

ÇİZELGELERİN LİSTESİ vi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ vii

RESİMLERİN LİSTESİ ix

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. METALİK KÖPÜKLER 3

2.1 Giriş 3

2.2. Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri 7

2.2.1 Ergiyik metal içerisine gaz enjektesi ile metalik köpük üretimi 8

2.2.2 Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile metalik köpük üretimi 12

2.2.3. Toz metalurjisi yöntemi ile metalik köpük üretimi 17

2.2.4. Ergitme-çözünürlük-filtrasyon yöntemi ile metalik köpük üretimi ... 23

3. ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMA ALANLARI 27

3.1 Lineer Elastik Deformasyon 27

3.1.1. Açık gözenekli alüminyum köpüklerin lineer elastik özellikleri 29

3.2 Plastik Çökme ve Yoğunlaşma 31

3.3 Enerji absorbesi 35

3.4. Uygulama alanları 37

3.4.1. Otomotiv endüstrisi 38
3.4.2. Yapı endüstrisi 39
3.4.3. Diğer uygulama alanları 40
4. DENEYSEL MALZEME VE METOD 43
4.1. Malzeme 43
4.2. Deneysel Metot 43
4.2.1. Karıştırma ve presleme 43
4.2.2. Ön ısıtma ve deformasyon 43
4.2.3. Köpükleştirme işlemi 43
4.3. Karakterizasyon 44
4.3.1. Metalografik numune hazırlama 44
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA 45
5.1. Köpürtücü Madde Miktarının Al Köpük Üretimi Üzerine Etkisi 45
5.1.1. Köpürtücü madde miktarının lineer genişlemeye etkisi 46
5.1.2. Köpürtücü madde miktarının gözenek yapısına etkisi 47
5.1.3. Köpürtücü madde miktarının Al köpük yoğunluğuna etkisi 50
5.2. Sıcaklığın Al Köpük Üretimi Üzerine Etkisi 53
5.2.1. Sıcaklığın gözenek yapısına etkisi 53
5.2.2. Sıcaklığın lineer genişlemeye etkisi 55
5.2.3. Sıcaklığın yoğunluk üzerine etkisi 57
5.3. Köpürtme Süresinin Al Köpük Üretimi Üzerine Etkisi 58
5.3.1. Köpürtme süresinin gözenek yapısına etkisi 58
5.3.2. Köpürtme süresinin lineer genişlemeye etkisi 62
5.3.3. Köpürtme süresinin yoğunluğa etkisi 63

5.4. Deformasyon Miktarının Al Köpük Üretimi Üzerine Etkileri 64

5.4.1. Deformasyon miktarının gözenek yapısına etkisi 64

5.4.2. Deformasyon miktarının lineer genişlemeye etkisi 68

5.4.3. Deformasyon miktarının yoğunluğa etkisi 69

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 71

KAYNAKLAR 72
ÖZGEÇMİŞ 76

TEŞEKKÜR

Tez konusu seçiminde, araştırma ve deneysel çalışma aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet TÜRKER'e teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarda malzeme temininde yardımcı olan Gazi Üniversitesi Fen - Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Halil İbrahim ÜNAL'a, deneysel çalışmalardaki yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr Halil ARIK'a ve bölümümüz Araştırma Görevlilerinden Dr. Hasan OKUYUCU, Dr. Ahmet DURGUTLU, Tayfun FINDIK, Uğur ARABACI ve Kubilay KARACİF'e presleme ve deformasyon aşamasında yardımlarını esirgemeyen Bülent BOSTAN ve Ahmet GÜRAL'a teşekkürlerimi sunarım.

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hanifi ÇİNİCİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2004

ÖZET

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum bazlı metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim parametrelerinden köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi, köpürtücü madde miktarı ve deformasyon miktarının metalik köpük üretimi üzerine etkileri belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada Al ve titanyum hidrür (TiH_2) tozları değişik oranlarda karıştırılarak kalıp içerisinde sabit basınç altında (300 MPa) preslenerek tabletler haline getirilmiştir. Elde edilen tabletlere fırın içerisinde 350 °C'de ön ısıtma yapılmıştır ve çeşitli oranlarda deforme edilmiştir. Daha sonra numuneler 680 °C ve 700 °C'de değişik köpürtme sürelerinde köpürtme işlemine tabi tutularak kendi haline atmosferik ortamda soğumaya bırakılmıştır. Isıtma süresince TiH_2 ayrışarak hidrojen gazı açığa çıkmakta ve numunenin tek yönde genişlemesine sebep olmaktadır. Elde edilen Al köpük numunelerde, üretim parametrelerinin gözenek ebatına, şekline ve lineer genişlemesine etkileri araştırılmıştır. 680°C ve 700°C'de yapılan köpürtme deneylerinde, her iki sıcaklıkta da numunelerde deformasyon yönünde genişlemenin oluştuğu görülmüştür. Ancak, köpürtme süresi ve sıcaklığının artması ile gözenek ebatlarının ve lineer genişlemenin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Gözenek ebatları ve lineer genişlemenin artması Al köpük yoğunluğunun düşük olmasına sebep olmuştur. Gözenek ebatlarının ve lineer genişleme oranının artan köpürtücü madde miktarı ile de arttığı görülmüştür.

Bilim Kodu : **710**
Anahtar Kelimeler : **Toz Metalurjisi, Metalik Köpük, Alüminyum, Gözenek.**
Sayfa Adedi : **70**
Tez Yöneticisi : **Prof. Dr. Mehmet TÜRKER**

PRODUCTION OF AL BASED METALLIC FOAM BY POWDER METALLURGY TECHNIQUE

(M.Sc. Thesis)

Hanifi CINICI

GAZI UNIVERSTY
THE INSTITUTE OF PHYSICAL SCIENCES

January 2004

ABSTRACT

In this study, aluminium based metallic foams was produced by using powder metallurgy technique. Effect of production parameters such as; foaming temperature, foaming time, amount of foaming agent and deformation rate on the production of foam were determined. In experimental study, aluminium and titanium hydrite (TiH_2) powders were mixed and compacted under 300 MPa pressure to produce powder blanks. Compact samples were preheated to 350 °C in a furnace and deformed with various amount. Samples were foamed at 680 °C and 700 °C for various foaming times and then cooled to room temperature in air. During hating, as the TiH_2 decomposes and releases hydrogen which causes to expand the sample uniaxally. Effect of production parametrs on the pore size, shape and linear expansion coefficient of aluminium foam samples were investigated. Samples foamed at 680 °C and 700 °C were expanded in the direction of compaction. However, it was found that, pore size and linear expansion increased with increasing the foaming times and temperatures. Increasing pore size and linear expansion resulted in a decrease in foam density. Pore size and linear expansion coefficient were found to be increased with increasing the foaming agent.

Science Code : 710
Key Words : Powder Metallurgy, Metalic Foam, Aluminium, Porosity
Page Number: 70
Adviser : Prof. Dr. Mehmet TURKER

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Alüminyum köpüklerin özellikleri..... 23

Çizelge 3.1. Alüminyum köpüklerin uygulama alanları ve mekanik özellikleri.....41

Çizelge 4.1. Deformasyon oranına bağlı olarak değişen numune ölçüleri..... 44

Çizelge 5.1. Köpürtme süresi değiştirilerek yapılan yoğunluk hesapları..... 51

Çizelge 5.2. Sıcaklığın lineer genişleme üzerine etkisi..... 55

Çizelge 5.3. Deformasyon miktarları, deformasyon öncesi ve deformasyon sonrası boyutlar..... 68

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Sıvı içerisine gaz enjekte edilerek köpürtme 9

Şekil 2.2. Partikül hacim oranı ve partikül ebatına bağlı olarak meydana gelen bazı problemleri gösteren grafik..... 10

Şekil 2.3. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme..... 13

Şekil 2.4. Karıştırma zamanı ve viskozite..... 15

Şekil 2.5. Toz metalurjisi ile köpük üretimi..... 18

Şekil 2.6. TiH_2 içerisinde H_2 ayrışma sıcaklığı..... 21

Şekil 2.7. Açık gözenekli metalik köpüğün GASAR yöntemi ile üretimi..... 24

Şekil 2.8. Gaz emdirilmiş metalin 1 den 2'ye soğutulması ile oluşan katı metal ve gaz fazını gösteren şematik faz diyagramı..... 24

Şekil 3.1. Metal köpüklerin gerilim-birim şekil değişim miktarı grafiği..... 28

Şekil 3.2. Açık gözenekli metalik köpüğün şematik gösterilişi..... 30

Şekil 3.3. Eksenel basma kuvvetlerinde gözenek kenarı eğilmesi..... 31

Şekil 3.4. Basma yüklemeleri altında köpüğün tipiksel davranışları..... 32

Şekil 3.5. Gerilmenin köpük yoğunluğu ile değişimi..... 33

Şekil 3.6. Açık gözenekli metalik köpüklerde plastik menteşe oluşumu..... 34

Şekil 3.7. Basma yüklemeleri altında gözeneklerin plastik çökmesi..... 34

Şekil 3.8. Basma yüklemeleri altında Al köpük malzeme ile yoğun malzemenin enerji absorbeleri 36

Şekil 3.9. Farklı yoğunluktaki Al köpüklerin enerji absorbeleri..... 36

Şekil 3.10.Gözeneklilik oranına göre metalik köpüklerin fonksiyonel ve yapısal kullanım alanları..... 37

Şekil 5.1. % TiH_2 miktarına bağlı lineer genişleme oranı grafiği..... 47

Şekil 5.2. Al matris içerisine ilave edilen % TiH_2 miktarına bağlı olarak blok numunelerde yoğunluk değişimi..... 51

Şekil 5.3. Farklı köpürtücü madde miktarlarına sahip numunelerin, farklı köpürtme sürelerindeki yoğunlukları..... 52

Şekil 5.4. Sıcaklık değişimi ile meydana gelen lineer değişim grafiği..... 56

Şekil 5.5. Sıcaklığa bağlı yoğunluk değişim grafiği..... 57

Şekil 5.6. Köpürtme süresine bağlı lineer genişleme grafiği..... 63

Şekil 5.7. Deformasyon miktarının lineer genişlemeye etkisi..... 69

Şekil 5.8. Deformasyon miktarına bağlı olarak değişen yoğunluk grafiği..... 70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Metalik köpük 3

Resim 2.2.Gözenekli metaller 6

Resim 2.3. Metal sünger 6

Resim 2.4. Ergiyik metal içerisine gaz enjekte edilerek üretilen metalik köpüğün gözenek yapısı 11

Resim 2.5. Ergiyik içerisine köpürtücü madde ilavesi ile elde edilen metalik köpüğün gözenekli yapısı, P-gözeneklilik, d- gözenek ebatı, a) P = % 69, d= 1,1 mm, b) P = % 79, d = 1,9 mm, c) P = % 88, d = 3,1 mm 16

Resim 2.6. Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak kalıp içerisine enjekte yolu ile elde edilmiş alüminyum köpük parçalar 19

Resim 2.7. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş Al köpüğün gözenek yapısı 22

Resim 2.8. GASAR yöntemi ile üretilen açık gözenekli alüminyum köpüğün optik mikro yapısı 25

Resim 2.9. Presleme, sinterleme ve basınçlı filtrasyon yapılarak elde edilen açık gözenekli köpüğün, elektron mikroskobunda mikro yapısı 26

Resim 3.1. Metal köpüklerin otomobillerde kullanıldığı yerler 39

Resim 3.2. Metalik köpük uygulama alanları a) Otomobil tamponlarında çarpma enerjisi absorbesi için, b) Reklam panoları, c) Aleve dayanıklılık, d) Otomobil tamponu, e) Sandiviç köpük 42

Resim 5.1. %0.5 TiH_2 ilave edilerek elde edilen metalik köpük 48

Resim 5.2. %1 TiH_2 ilave edilerek elde edilen metalik köpük 48

Resim 5.3. %1,5 TiH_2 ilave edilerek elde edilen metalik köpük 49

Resim 5.4. 680 ^{0}C fırın sıcaklığının gözenek yapısına etkisi 53

Resim 5.5. 700 ^{0}C fırın sıcaklığının gözenek yapısına etkisi 54

Resim 5.6. %0,5 TiH_2 ilave edilerek elde edilen Al köpüğe sürenin etkisi
a) 10 dak., b) 20 dak., c)30 dak..... 59

Resim 5.7. %1 TiH_2 ilave edilerek elde edilen Al köpüğe sürenin etkisi
a) 10 dak., b) 20 dak., c)30 dak..... 59

Resim 5.8. %1,5 TiH_2 ilave edilerek elde edilen Al köpüğe sürenin etkisi
a) 10 dak., b) 20 dak., c)30 dak..... 60

Resim 5.9. %75 deformasyon miktarına sahip Al köpüğe sürenin etkisi
a) 10 dk., b) 20 dk., c) 30 dk..... 61

Resim 5.10. 700 ^{0}C sıcaklıkta elde edilen Al köpüğe sürenin etkisi
a) 10 dk., b) 20 dk., c) 30 dk..... 62

Resim 5.11. Deforme edilmeden hazırlanan numunelerden elde edilen Al köpük resimleri. Köpürtme süreleri ; a) 30 dk., b) 60 dk., c) 120 dk..... 65

Resim 5.12. %25 deforme edilerek elde edilmiş Al köpüğün gözenek yapısı..... 66

Resim 5.13. %50 deforme edilmeden elde edilmiş Al köpüğün gözenek yapısı..... 67

Resim 5.14. % 75 deforme edilerek elde edilmiş Al köpüğün gözenek yapısı..... 67

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
E	Elastik modülü
ERG	Enerji Üretim ve Araştırma
f_{Al}	Parçacık Ağırlığı
IFAM	Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü
IMMM	Malzeme ve Makine Mekaniği Enstitüsü
ρ	Yoğunluk
W_f	Köpüğün Ağırlığı
W_p	Kompozit Ağırlığı

1. GİRİŞ

Metalik köpükler, mekanik özelliklerinin iyi olmasından dolayı günümüzde artan öneme sahip malzemelerdir. Bunun sebepleri arasında, enerji emebilme kabiliyetinin yüksek olması, düşük ağırlık, ısıl izolasyon, titreşim azaltma ve kimyasal süzme gibi özellikler sayılabilir (1). Özellikle alüminyum esaslı metalik köpükler, çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir. Alüminyum köpükler, darbe enerjisini plastik enerjiye dönüştürebilirler ve birçok metalden daha fazla enerji absorbe edebilirler. Tüpler içerisine dolgu malzemesi olarak konulduklarında emilen toplam enerji köpük ve tüpün ayrı ayrı emdiği enerjinin toplamından daha büyüktür (2,3). Kullanım alanları arasında, hafifliğin ve mukavemetin bir arada bulunması gereken otomotiv, uzay sanayi, demiryolu taşımacılığı ve asansör gibi alanlar bulunmaktadır (4).

Metalik köpükler, süngerler gibi gözenekli yapıya sahiptir. Doğal bir ürün değildir. Gözenekli yapı, bazı işlemler uygulandıktan sonra meydana gelir. Doğal köpük ile hiçbir ilgisi olmamasına rağmen görünüm ve bazı özelliklerinden dolayı "metalik köpük" diye adlandırılırlar.

Metalik köpüklerle ilgili çalışmayı ilk defa Sosnik, 1948 yılında alüminyum içerisinde civa buharlaştırarak yapmış daha sonra Elliot 1951 yılında aynı metodu tekrarlayarak metalik köpüğü üretmiştir. Daha sonraki yıllarda metalik köpüklerin veya diğer gözenekli metalik yapıların üretim imkanları yeniden gözden geçirilmiştir. Döküm, toz metalurjisi ve metalik ayrışım olmak üzere bir çok metalik köpük üretim yöntemi vardır (5). Metalik köpükler %70 ile % 90 oranında gözenekli yapıya sahip, gaz ve katı halde bulunan maddelerin bileşimidir. Bu nedenle ergiyik metalin köpürtülmesi sırasında gözeneklerin morfolojisi mutlaka kontrol edilmelidir (6). Özellikle homojen dağılımın ve dolayısı ile yeteri kadar gaz kabarcığının oluşturulması gerekir.

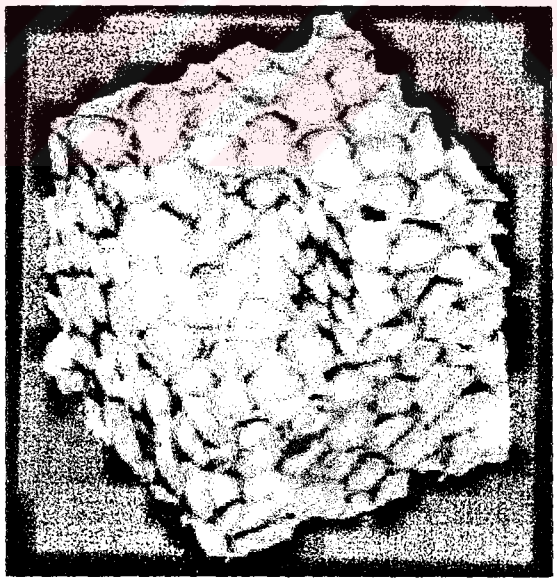
Köpükler genellikle düzensiz yapıya sahiptir ancak, içindeki düzenlemelerinde belli kuralları vardır. 19. yüzyılda, Belçikalı fizikçi Joseph Plateau' nun açıkladığı yüzey gerilimince belirlenen kurallara uyarlar. Bu kurallara göre, baloncukları birbirinden

ayıran ince zarların sadece üçü "Plateau" olarak adlandırılan- bir çizgi üzerinde buluşabilir. Zarlar ve çizgiler, birbiri ile eşit açılarla, simetrik olarak buluşurlar. Plateau'nun tanımladığı bu yapı, sıvı köpüklerin bir çoğunda, dolayısıyla, sıvı köpüklerin katılaştırılmasıyla oluşan katı köpüklerin de çoğunda görülür (7-9). Plastik deformasyon veya akma bu plateau geriliminde başlar. Plateau gerilimi daha fazla veya daha az emilecek enerjiye bağlı olarak korunan bir yapı veya cihazda kullanılması gereken maksimum yükü belirler. Morfolojik düzensizlikler, hücre elipsliği, homojen olmayan hücre kalınlığı ve hücre boyutu dağılımının plateu gerilimini azalttığı tespit edilmiştir (10). Gözenek morfolojisinin yanında, köpük yoğunluğu ve köpürtücü malzemenin akma gerilmesi, plateau gerilmesini etkileyen diğer iki parametredir.

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum bazlı metalik köpük üretim metodu kullanılarak, Al bazlı köpük üretimi gerçekleştirilmiş ve köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi, köpürtücü madde miktarı ve deformasyon miktarı gibi parametrelerin Al köpük üretimi üzerine etkileri incelenmiştir.

2. METALİK KÖPÜKLER

Metalik köpükler; odun, mercan ve sünger gibi hücreli yapıların bir türüdür. Doğal bir ürün değildir. "Köpük" terimi tam anlamı ifade etmemektedir. Köpükten daha ziyade sünger şeklinde açık gözenekli yapı meydana gelir. Bu yüzden genellikle "metalik köpük" şeklinde ifade edilir. Resim 2.1 de bir metalik köpük örneği gösterilmiştir. Gözenekli yapı şeklini alabilmesi için farklı fonksiyonel malzemeler kullanmak gerekir (11). Metalik köpükler ile çalışılma sadece bilimsel değil aynı zamanda endüstriyel uygulamalarla ilgili araştırmalarda da faydalı olmuştur. Son zamanlarda, düşük yoğunlukta olan alaşımların geliştirilmesine büyük bir talep artışı olmuştur. Günümüzde bazı mühendislik problemleri gözenekli malzemeler kullanılarak çözülmüştür. Özellikle ağırlığın düşürülmesi ve emniyetin önemli yer teşkil ettiği otomotiv, tren ve uzay endüstrisi gibi alanlarda alüminyum köpük başta olmak üzere metalik köpüklerin kullanımına ihtiyaç duyulduğu gözlenmektedir (12).



Resim 2.1. Metalik köpük (11).

Metalik köpüklerle ilgili çalışmaları Sosnik 1948 yılında, alüminyum içinde civa buharlaştırarak yapmıştır (13). Önce alüminyum ve civa karışımını kapalı bir kapta, yüksek basınç altında ergitmiş, basınç kaldırılınca, civa, alüminyum ergime sıcaklığına yakın sıcaklıkta buharlaşarak köpük oluşturmuştur.

1950'lerde, sıvı metallerin, önceden viskozite artırıcı işlemden geçtiklerinde çok daha kolay köpükleştirilebileceğinin anlaşılmasıyla daha kolay üretim yöntemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Viskoziteyi artırma işlemi, ergimiş kütleyi oksitleyerek veya oksit parçacıkları ilave edilerek yapılmıştır. Daha sonra Elliot (14) 1951 yılında bu çalışmayı tekrarlayarak alüminyum köpük üretmiştir. Bu çalışmaya göre, ergiyik metale köpürtücü madde ilave edildikten sonra, ergiyik metal içindeki gazın ayrışarak bileşenlerden birinin gaz haline geçmesi için ısıtılmakta ve oluşan gaz gözenek oluşturarak metalin köpürmesine neden olmaktadır. Köpürme işleminden sonra, elde edilen madde, katı köpük yapısını oluşturmak amacıyla soğutulmuştur. 1951'lerin sonlarında, Madison-Wisconsin'deki Bjorsksten Araştırma laboratuarlarında William Elliot ve Stuart Fiedler, ABD donanması için bir alüminyum köpükleştirme işlemi geliştirmişlerdir. Araştırma laboratuarlarında, yaklaşık 10x20x0,25 cm' lik paneller üretecek bir pilot fabrika kurulmuştur. Burada, otomobiller için, ezilen tampon yapımı gibi, alüminyum köpüklerin muhtemel kullanımları da araştırılmıştır. Ayrıca, kurşun ve çinko gibi başka metalleri köpükleştirme yöntemleri üzerine araştırmalar uzun yıllar boyunca sürdürülmüştür. Genellikle TiH_2, ZrH_2 gibi metal hidrürler ve $CaCO_3$ gibi bileşikler köpürtücü olarak kullanılmıştır. Elliot'a göre, alüminyum, çinko, demir, bakır, nikel, magnezyum ve titanyum gibi bazı metal ve alaşımları, köpük üretimi için kullanılabilir (14).

İlk yıllarda, metalleri köpükleştirmek için, günümüzde de kullanılan iki yönteme başvurulmuştur. Bunlardan birincisinde, köpük elde etmek için ergimiş kütleye sürekli olarak gaz püskürtülmüş, ikinci yöntemde ise ergimiş kütleye plastik köpük endüstrisindeki şişirici maddelere ya da mayaya benzeyen, ergiyik metal içerisinde kabarcık şeklinde gaz oluşturan maddeler eklenerek yapılmıştır (7).

1970'li yıllarda alüminyumun, köpük üretimi için çok uygun bir malzeme olduğu anlaşılmıştır. Örneğin, 1972 yılında, Ethyl şirketi, dikkate değer ölçüde yüksek kaliteli alüminyum köpük üreterek, değerlendirme yapması için Ford Motor Şirketi'ne vermiştir. Şüphesiz enerji kaynaklarının sınırsızmış gibi görüldüğü o dönem, hafif malzemeler için uygun bir dönem değildi. Öte yandan, güvenlik ve geri

kazanım gibi konular da o yıllarda bu günkü kadar önemli görülmüyordu. Belki bu yeni malzemenin düzensiz yapısından dolayı kalite kontrolünde sorunlara yol açacağı düşünülüyordu. Her ne sebeple olursa olsun 1975 yıllarından sonra metalik köpük araştırmalarındaki çalışma sayısı azalmıştır (15).

1980'lerin sonunda ise, metalik köpük araştırmaları tüm dünyada yeniden canlılık kazanmıştır. Shinko Wire adlı şirketten Japon mühendisler, bu gün "Alporas işlemi" olarak bilinen yöntemi geliştirdiler (10). Norveç'teki Norsk Hydro ve Kanada'daki Alcan şirketleri birbirlerinden ayrı olarak parçacıkları stabilize edilmiş eriyikler için bir köpükleştirme işlemi geliştirdiler. 1990 yılında, Alman fizikci Joachim Baumeister, 1950'li yıllarda Benjamin Allen'in geliştirdiği sıkıştırılmış toz köpükleştirme yöntemini yeniden incelemeye başlamıştır. Önce sıkıştırılan tozlar daha sonra ergitilerek köpükleştirilen toz karışımlarının kullanıldığı bu yöntem, Almanya'daki Fraunhofer Enstitüsü'nde (IFAM) daha da geliştirilmiştir.

Metalik köpükler, iyi enerji absorbe özelliği, yüksek basma dayanımı, düşük özgül ağırlık ve yüksek rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özellikleri ile bilinirler. Özellikle alüminyum köpükler, kapalı hücre yapısı ve çok hafif olması ile göze çarpmaktadır. Bundan dolayı ses ve enerjinin absorbesinde alüminyum köpükleri fonksiyonel olarak kullanılmaktadır.

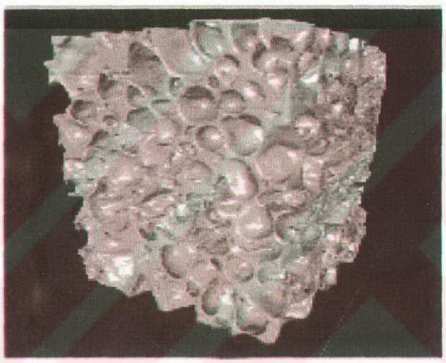
Metalik köpüklerin tam olarak teşhis ve ayırt edilmesi gerekir. Bu yüzden hücresel metaller, gözenekli metaller, katı metalik köpükler ve metal süngerlerin anlamını bilmek gerekir(16).

Hücresel Metaller : En genel anlamdır ve metalik yapı ile ilgilidir. Metalik yapı bir çeşit gaz boşluğu şeklindedir. Gaz içeren metalik faz, kapalı yapı içerisinde alanlara ayrılmıştır.

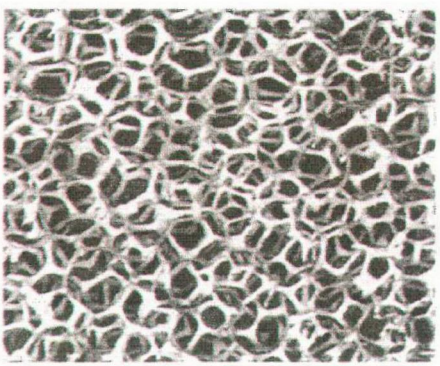
Gözenekli Metaller : Hücresel metallerin özel bir türüdür. Boşluk türü sınırlandırılmıştır. Gözenekler genellikle yuvarlak ve birbirinden ayrılmıştır (Resim 2.2.)

Metalik köpükler : Gözenekli metallerin özel bir türüdür. Köpükler, sıvı-metalden dolayı meydana gelmiştir. Bu yüzden yapı sınırlı morfolojiye sahiptir. Gözenek kapalı, yuvarlak veya elipstir. Gözenek duvarlarının ince tabakalı olmasından dolayı diğerlerinden ayrılır.

Metal Süngerler : Açık gözenekli metalik köpükler olarak da bilinirler. Deniz süngerine benzemekte ve gözenekli metalin morfolojisinde genellikle boşluklar birbirine bağlanmıştır (Resim 2.3.).



Resim 2.2.Gözenekli metal (16)



Resim 2.3. Metal sünger (16)

2.2. Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri

Metalik köpüklerin üretiminin birkaç farklı yöntemi vardır (17). Ergitme ve döküm ile toz metalurjisi en yaygın kullanılan üretim yöntemleridir. Bazı yöntemler belirli adlarla bilinirler. Diğerleri imalatçı tarafından belirlenen ticari adlarını almıştır. Ergitme yöntemi ile üç şekilde köpük üretilebilir (1,5). Dışardan ergiyik içerisine gaz enjekte etmekle, ergiyik metal içerisinde gaz oluşturacak köpürtücü maddelerle veya ergiyik içerisine önceden ilave edilmiş köpürtücü maddelerin belirli ortamlarda köpük oluşturmasıyla yapılabilir.

Ergitme ve döküm yöntemi ile metalik köpük üretimi başlıca üç aşamada gerçekleşir (18). Birinci aşamada köpürtülecek metal veya alaşım ergiyik hale getirilir. İkinci aşamada gözenekli yapı oluşturmak için gaz veya köpürtücü madde ilave edilir. Üçüncü aşamada soğutma işlemi yapılarak ergiyik metal katı hale getirilir.

Ergiyik metal içerisinde gaz kabarcıkları oluşturularak yapılan köpük üretiminde, sıvının yüksek kaldırma kuvvetinden dolayı yüzeye hızlı kabarma eğiliminde olan gaz kabarcıklarıyla metalik köpük şekli verilmiştir. Aşırı derecede yüksek viskozite, kabarcıkların düzeninin bastırılmasına neden olurken, aşırı derecede düşük viskozite kabarcıkların hızlı yüzdürülmesine sebep olur (19). Bu yüzden köpürtme süresince ergiyik metalin viskozitesinin kontrolü çok önemlidir.

Metalik köpük üretiminde köpürtücü madde olarak genellikle zirkonyum hidrür veya titanyum hidrür kullanılır. Kalsiyum karbonat, 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. Fiedler' e göre (20) köpürtücü maddenin miktarı, kullanılan metalin türüne bağlıdır. Köpürtücü maddenin, köpürüp köpürmeyeceği, arzu edilen yoğunlukta olup olmayacağı, köpürtücü maddenin ayrıştığı zaman serbest kalan gazın ayrışma oranına bağlıdır (20). Köpürtücü madde, köpürtülecek esas metal içinde kolayca dağılabilecek şekilde partikül, granül veya toz şeklinde olabilir.

Köpürtücü maddenin ayrışma sıcaklığı, köpürtülecek esas metalin ergime noktasına yakın sıcaklıklardır. Metalik köpüklerin üretimi, ergiyik metal içerisine doğrudan gaz, malzeme veya bileşik toz ilavesiyle mümkün olabilir ve bu oda sıcaklığında yapılır. Fakat gazın yayılması ve ayrışması yüksek sıcaklıkta meydana gelir. Katı köpürtme maddesi kullanıldığında, ergiyik içerisinde gazın homojen bir şekilde dağılmasıyla köpürtme mümkün olabilir. Gaz kabarcıklarının ergiyik içerisinde birleşmesini, değişmesini veya çıkışını engellemek için ergiyik viskozitesi artışı gereklidir. Köpürtücü olarak kullanılan TiH_2 gibi maddeler belli sıcaklıkta ayrışarak H_2 gazı açığa çıkar. Ayrışma sonucu oluşan H_2 gazı, ergiyik içerisinde kabarcıklar oluşturur. Bu esnada yapılan katılaştırma sonucu kabarcıklar yapı içerisinde kalarak hücresel yapıları meydana getirir. Shinko Wire Company şirketinde yapılan çalışmalarda alüminyum içerisine %1.6 TiH_2 ilave edilmiştir. Ergitme ve dikkatli karıştırmanın ardından 680 ^0C sıcaklıkta 15 dakika bekletilmiştir. Bu sıcaklıkta hidrojen ayrışması meydana gelmiştir. Bu reaksiyon aşağıdaki şekilde gerçekleşmiştir.

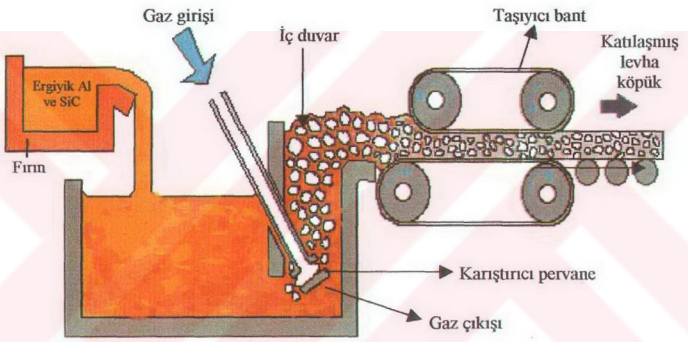
$$TiH_{2(s)} \Leftrightarrow Ti_{(s)} + H_{2(g)}$$

Bu şekilde üretilen köpükte % 84 – 95 arasında gözenek ve yaklaşık 5 mm ebatlarında hücre elde edildiği görülmüştür (21).

2.2.1. Ergiyik metal içerisine gaz enjektesi ile metalik köpük üretimi

Metalik köpük üretim yöntemlerinin en kolay şeklidir. Ergiyik metal içerisine gaz enjektesi ile metalik köpük üretimi fikri ilk olarak 1991 yılında Ruch ve Kirkevak tarafından ortaya atılmış ve aynı yıl içerisinde patenti alınmıştır. Daha sonra bu yöntem, Kanada'da uluslararası ALCAN şirketinde Jin tarafından 1992 yılında geliştirilmiştir. 1997 yılında yine Kanada'da CYMAT Alüminyum A.Ş. bu yöntemin lisansını almıştır (22). Bu yöntem Norveç'te Hydro Alüminyum işletmelerinde kullanılmıştır (10).

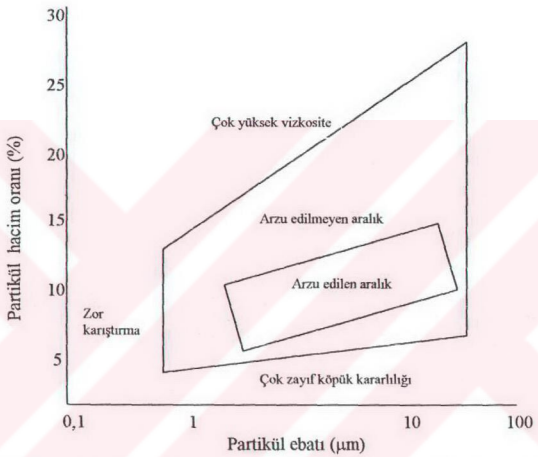
Şekil 2.1. de şematik olarak gösterilmiş olan bu yönteme göre, ilk aşamada köpürtülecek metal ergitilir. Ergitilen metal içerisine viskoziteyi ayarlamak amacıyla refrakter partiküller ilave edilir ve karıştırılır. İkinci aşamada özel tasarlanmış dönel pervane ve titreşimli nozul yardımıyla ergiyik içerisine hava, azot veya argon üflenerek gaz kabarcıkları meydana getirilir (23). Yüzeyde oluşan metal-gaz kabarcıkları taşıma kemeri kullanılarak ergiyik yüzeyinden çekilerek düz levha şeklinde hafifçe haddeden geçirilmiştir. Son olarak metalik köpük soğutulmuştur (24).



Şekil 2.1. Sıvı içerisine gaz enjekte edilerek köpürtme işlemi (24).

Eğer ergiyik metal içerisine, gaz direkt ilave edilirse kabarcıklar kolayca oluşur. Oluşan bu kabarcıkların homojen dağılımını, gözenek yapısını ve gözenek duvar kalınlığını kontrol etmek zordur (24). Bu sorun ALCAN ve CYMAT şirketlerinde bir yöntem geliştirilerek giderilmiştir (22). Bu yönteme göre; ergiyik metal içerisine toz şeklinde refrakter malzeme partikülleri ilave edilmiştir. 20 μm den daha küçük ebatlarda olan ve % 5-20 oranında ilave edilen bu partiküller ergiyik metali istenilen viskoziteye getirir. Bu yöntemde Silisyum-karbür, alüminyum oksit, veya magnezyum oksit taneleri ergiyik metalin viskozitesini ayarlamada kullanılabilir (25). Bu partiküller kısmen ergiyik metalin viskozitesini artırırken kısmen de metal/gaz ara yüzeyinde yüzey etken maddesi olarak davranarak gözeneklerin ergiyik içerisinde hareket etmesine ve birbirleri ile birleşmelerine engel olur (22,24).

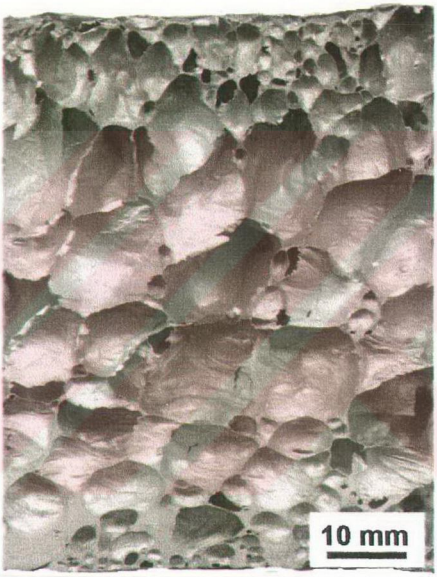
Ergik metalin köpürtülmesi sırasında gözeneklerin morfolojisi mutlaka kontrol edilmelidir (6,21). Partikül hacim oranı ve partikül tane ebatına bağlı olarak çok küçük veya çok büyük problemler meydana gelebilir. Parakash (22) 1995 yılında yaptığı bir çalışma ile partikül ebatları ve partikül hacim oranı arasındaki ilişkiyi belirleyen bir grafik oluşturmuştur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Partikül hacim oranı ve partikül ebatına bağlı olarak meydana gelen bazı problemleri gösteren grafik (22).

Bu yöntemle üretilmiş alüminyum köpüğün yoğunluğu 0,069 g/cm^3 ile 0,54 g/cm^3 arasında değişmekte, ortalama gözenek ebatları 3-25 mm ve gözenek duvar kalınlığı 50-85 μm arasında olmaktadır (26). Özel tasarımlanmış titreşimli nozul ve dönel pervanelerle homojen dağılımlı gaz kabarcıkları meydana getirmek mümkündür. Gaz akışı, nozul titreşim frekansı, pervane hızı ve diğer parametrelerinin ayarlanmasıyla ortalama gözenek ebatları, ortalama gözenek duvar kalınlığı ve köpük yoğunluğu değiştirilebilir (10,25,27). Üretim esnasında, gözeneklerde çekimsel drenaj etkisi görülebilir. Ayrıca taşıma bantlarının sebep olduğu kayma kuvveti gözeneklerin uzamasına sebep olabilir (7).

Ergiyik metal içerisine gaz enjekte edilerek üretilen metalik köpüğün gözenek yapısı Resim 2.4'de gösterilmiştir. Hafif haddeden geçirilerek oluşturulan metalik köpükte, gözeneklerin birbirlerine benzedikleri görülmüştür. Yer çekimi etkisinden dolayı ergiyik metalde aşağı doğru meydana gelen akma, üst kısımda gözenek yoğunluğunun artmasına sebep olmuştur. Metalik köpük merkezinde meydana gelen uzun soğuma süresinden dolayı gözeneklerde genişleme meydana gelmiştir (22).



Resim 2.4. Ergiyik metal içerisine gaz enjekte edilerek üretilen metalik köpüğün gözenek yapısı (22).

Gaz enjektesi ile köpürtme yönteminde, büyük hacimde ve düşük yoğunlukta olan metalik köpükler üretilebilir ve seri üretim yapılabilir. Bu nedenle diğer gözenekli metalik malzemelerden daha ucuzdur (22,24,). Bu köpüklerin işlenmesi matris içerisinde sert seramik parçacıkları içerdiğinden dolayı zordur. Bu yöntemin diğer bir dezavantajı ise kesme ve işleme gibi ikinci bir işlemin gerekliliğidir. Karmaşık şekilli parçalar üretilemez. Ayrıca ergiyik metalin bulunduğu potanın sıcaklığının sabit olması gerekir. Çünkü sıcaklığın düşmesi gaz kabarcıklarının oluşmasını zorlaştırır.

Yüksek sıcaklıklarda ise kabarcıklar çabuk ve büyük oluşur dolayısı ile kabarcıkları tutmak zorlaşır (21).

Ergiyik metal içerisine ilave edilen dengeleyici partiküller, metalik köpükte kırılganlık gibi istenmeyen bazı sonuçlar meydana getirebilir. Viskozitenin düşük tutulabilmesi için, köpürtme işleminde sıcaklığı ergime sıcaklığına çok yakın tutmak gerekir. Sürekli soğutma yapılarak ergiyik içerisinde gaz kabarcıkları tutulur. Ergiyiğin katılaştırılması ile tutulan kabarcıklar köpüğe benzer yapı oluşturulur (21, 23, 25).

Ergiyik metal içerisine gaz enjektesi ile metalik köpük üretim yönteminde alaşım kullanıldığında partikül ilavesine gerek yoktur. Alaşım liküdüs-solidüs sıcaklıkları arasında hızlıca karıştırılır. Genelde böyle çalışmalarda başarısız olunmuştur. Sadece % 20 gözenekliliğe sahip metalik köpükler üretilebilmiştir. Sıcaklığın homojen ve sınırlı aralıklarda tutulması zordur (24).

2.2.2 Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile metalik köpük üretimi

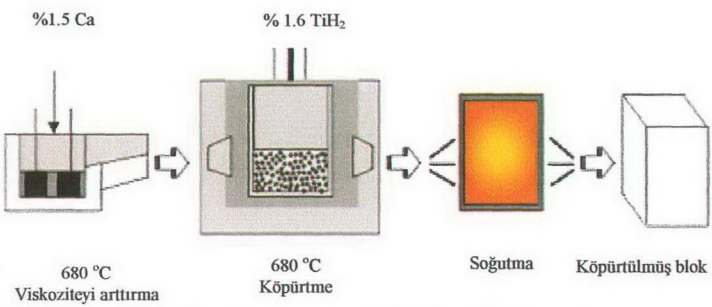
Bu yöntemde, ergiyik içerisine gaz enjekte etmek yerine direkt olarak TiH_2, ZrH_2 ve $CaCO_3$ gibi köpürtücü madde ilave edilerek köpürtme yapılır (28). Ergiyik içerisine köpürtücü madde tozları ilave ederek metalik köpük üretimi ilk olarak Kreigh ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada metal, pota içerisinde ergitilerek içerisine köpürtücü madde içeren partiküller ilave edilmiştir. Daha sonra bu karışım çalkalanarak partiküllerin ergiyik içerisinde homojen dağılımı sağlanmıştır. Soğutma işlemi yapılarak metalik köpük elde edilmiştir. 1962 yılında Kreigh tarafından patenti alınmıştır (29).

Metalik köpük üretiminde köpürtücü madde olarak genellikle TiH_2, ZrH_2 tozları kullanılmıştır (30). Bu köpürtücü maddelerin en büyük dezavantajı, ergiyik içerisine tozlar ilave edildikten hemen sonra gaz ayrışma reaksiyonu (ısıl ayrışma veya oksidasyon) başlamasıdır. Bu yüzden yüksek kalitede köpük üretimi, gözenek yapısının kontrolü ve köpürtme yönteminin kontrolü çok zordur (29). Speed 1976

yılında yaptığı bir çalışmada katalizör kullanarak, ergiyik içerisindeki hidrürdeki hidrojen gazı dönüşümünü kontrol etmiştir. Bu çalışmada, ergiyik içerisine farklı bir malzeme katarak köpürtücü madde tozu ile karıştırmıştır. Karışım 450 – 480 °C sıcaklığında ve 5-20 dak. arasında ısıtılmıştır. Hidrojen ayrışması sonucu, toz parçacıklarının yüzey tabakasında oksitlenme meydana geldiği görülmüştür. Speed yaptığı bu çalışma ile bu oksit tabakasının ayrışma başlangıcını geciktirdiğini açıklamıştır (22).

Bu fikir 1998 yılında Gergely ve Clyne tarafından geliştirilmiş ve hidrür tozlarının etkileri hakkında detaylı araştırmalar yapılmıştır (29). Yapılan araştırmalar sonucunda, yüzey tabakasında oluşan oksit tabakasının kontrolü ile bazı faydalar sağlandığı bulunmuştur. En önemli faydası, ergiyik içerisinde hidrojen dönüşümü başlangıcını geciktirmesidir. Dolayısıyla gaz ayrışmasından önce ergiyik içerisindeki homojenliğin sağlanması kolaylaşır. Böylece homojen gözenek yapısına sahip metalik köpük üretilir. Ayrıca köpürtücü maddenin hidrojen içeriği ve değişen oksit tabakası kontrolü ile hem yöntemin kinetiği hem de gaz ayrışma miktarı kontrol edilebilir.

Şekil 2.3.'de ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile metalik köpük üretimi şematik olarak gösterilmiştir (27,28). Japonya'da Shinko Wire Company şirketi 1986 yılından beri bu yöntemi kullanmakta ve günde 1000 kg üzerinde üretim yapmaktadır(4,31). Bu yöntem ALPORAS olarak adlandırılmıştır (30).



Şekil 2.3. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme.

Bu üretim yöntemi iki aşamadan meydana gelir. İlk aşamada köpürtülecek metal veya alaşım atmosfer ortamında ve sabit sıcaklıkta ergiyik hale getirilir. Bu esnada viskoziteyi ayarlamak için belli oranlarda Ca, Al_2O_3, kalsiyum-alüminyum oksit ($CaAl_2O$) veya kalsiyum oksit (CaO) ergiyik içerisine ilave edilir ve yaklaşık 700 rpm hızda 5-10 dakika karıştırılır. İkinci aşamada, viskozite istenilen değere ulaştığında ergiyik içerisine, köpürmeyi sağlamak üzere yaklaşık % 0.5-2.5 oranında ve 5-20 μm çaplarında partikül şeklindeki köpürtücü madde (TiH_2, $CaCO_3$) ilave edilir. Karışım içerisinde homojen dağılımın sağlanması için yaklaşık 1200 rpm hızda birkaç dakika karıştırılır. Ergiyik tamamen köpürtüldüğünde, hidrojen kaçışı ve kabarcıkların birleşmesinden veya çökmesinden önce soğutularak katılaştırılır.

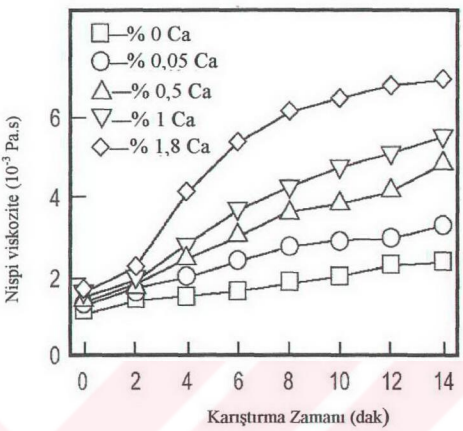
İlave edilen TiH_2 ve $CaCO_3$ aşağıdaki şekilde ayrışarak H_2 ve CO_2 gazı açığa çıkar.

$$TiH_2 + Isı \longrightarrow Ti_{(k)} + H_{2(g)}$$

$$CaCO_3 + Isı \longrightarrow CaO + CO_2$$

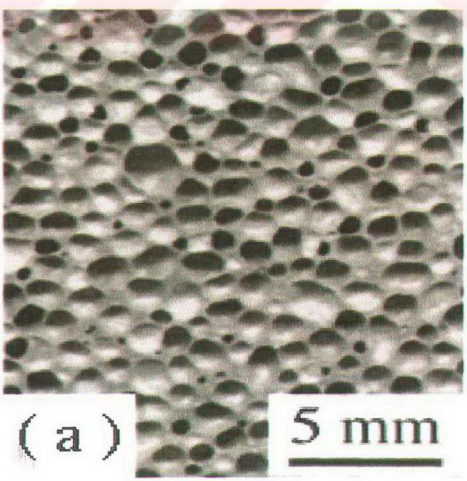
Köpürtme yapılırken meydana gelen ısı artışı, köpürtücü maddedeki gazın ayrışmasına ve serbest bırakılmasına sebep olur. Açığa çıkan H_2 veya CO_2 gazı gözenek oluşturucu olarak davranır. Kısa bir süre içinde ergiyik, kalıp içerisinde yavaş yavaş yayılmaya ve genişlemeye başlar. Daha sonra sabit basınçta kalıp içerisinde köpürtülür. Alaşımın ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kalıp içerisinde soğutulur. Katılaştırılmış metalik köpük kalıp içerisinden alınarak özel uygulamalar için başka işlemlere tabi tutulur (27).

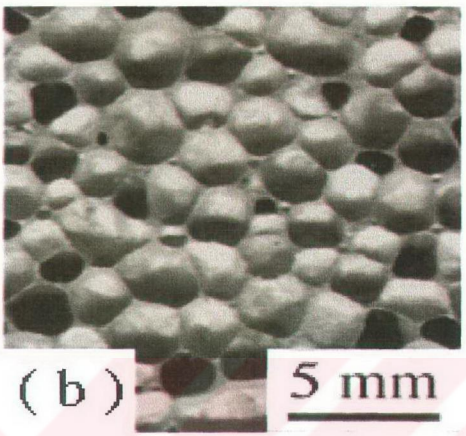
Yöntemin kontrolü zaman, sıcaklık ve viskozitenin ayarlanmasıyla sağlanabilir. Değişik miktarlarda kalsiyum ilavesi ile ergiyik alüminyumun viskozitesi ve karıştırma zamanı Şekil 2.4'de gösterilmiştir (17).

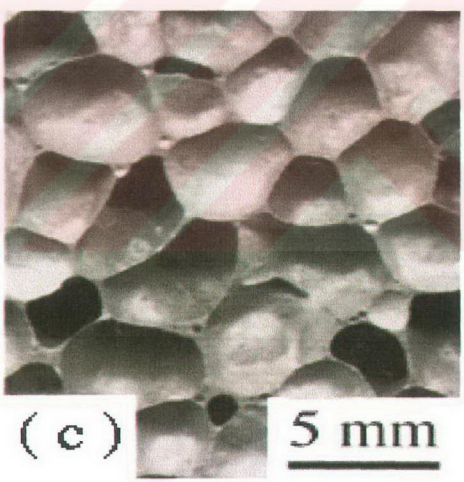


Şekil 2.4. Karıştırma zamanı ve viskozite (17).

Bu yöntemle üretilen metalik köpükler günümüzde üretilen en homojen köpüklerdir (32). İşlem parametrelerine dikkat edildiğinde örnek homojen köpükler elde edilir (Resim 2.5.) (22). Döküm köpük bloklarının nispi yoğunluğu 0,18 g/cm^3 ile 0,24 g/cm^3 arasında değişebilir. Ortalama gözenek ebatları 0,5-10 mm arasında değişiklik göstermektedir.







Resim 2.5. Ergiyik içerisine köpürtücü madde ilavesi ile elde edilen metalik köpüğün gözenekli yapısı (22), P-gözeneklilik oranı, d- gözenek ebatı, a) P = % 69, d= 1,1 mm, b) P = % 78, d = 1,9 mm, c) P = % 88, d = 3,1 mm

Resim 2.5.'de görüldüğü gibi gözenekler oldukça homojen bir şekilde dağılmıştır. Köpürtme zamanı arttıkça gözenekler homojen olarak büyümüş ve gözenek duvarlarının kalınlıkları incelmiştir. Metalik köpüğün orta bölgesindeki gözenek

ebatları ile yüzey bölgelerindeki gözenek ebatlarının aynı büyüklükte ve aynı homojenlikte oldukları görülmüştür (22).

Bu yöntemle üretilen metalik köpükler genellikle kapalı gözenekli olmalarına rağmen, sonradan yapılan haddeleme işlemi akustik sönümleme artışı için, gözenek duvarlarının bazılarının kırılmasında kullanılmıştır (22). Gaz enjeksiyon yönteminden daha pahalı bir yöntemdir. Sadece küçük hacimdeki pahalı parçaların üretiminde $CaCO_3$ ve TiH_2 kullanılmıştır. Köpürtücü madde ilavesi ile metalik köpük üretimi genellikle alüminyum ve alaşımlarında kullanılır. Yüksek ergime derecesine sahip metallerde, hidrojen ayrışması düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğinden bazı problemlerle karşılaşılır (30).

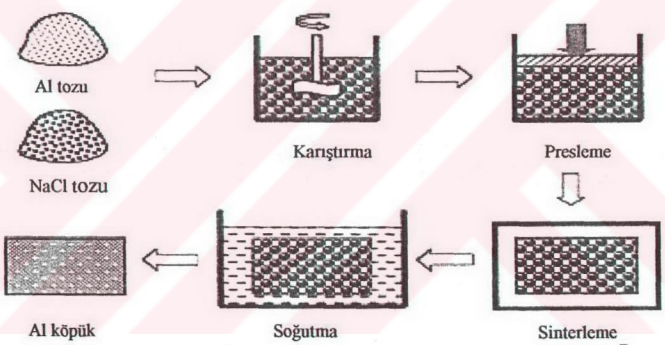
2.2.3. Toz metalurjisi yöntemi ile metalik köpük üretimi

Toz metalurjisi yöntemi ile metalik köpük üretimi Allen ve arkadaşları tarafından çalışılmış ve patenti alınmıştır (22). Metal tozları ve köpürtücü madde tozları (TiH_2, ZrH_2 veya $CaCO_3$) karıştırılmış, soğuk preslenmiş ve yaklaşık 400–480 °C sıcaklıkta haddelenmiştir. Köpürtücü madde metal matris içerisine ilave edilmiş ve homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra alaşım kısmen sıvı hale dönüştürülmüştür. Köpürtücü madde sıvı ile reaksiyona girerek gaz oluşmuş ve köpük oluşturulmuştur.

Son zamanlarda, toz metalurjisi yöntemi ile metalik köpük üretimi geliştirilerek Almanya'da Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü'nde (IFAM) sandviç köpük üretilmiştir. Sandviç köpük üretimi J. Banhart ve J. Baumister tarafından 1997 yılında patentlenmiştir (33). Daha sonra 1998 yılında Slovakya'da Malzeme ve Makine Mekaniği Enstitüsü (IMMM), Avusturya şirketi olan MEPURA için alüminyum sandviç köpük üretimini geliştirmiştir. Bu yöntemde köpürtücü ihtiva eden karışım kalıp içerisinde homojen dağıtılarak özel fırında tel veya şerit şeklinde ekstrüzyon yapılmıştır (22).

IFAM'da metalik köpükler, önceden ayrıca hazırlanmış metal tozlarından üretilmektedir (30). Köpürtücü madde ile metal tozlarının (saf metal tozları, alaşım

tozları veya metal toz karışımı) karıştırılmasıyla işleme başlanır (Şekil 2.5.). Daha sonra metal toz ve köpürtücü madde karışımı preslenir ve yarı mamul bir madde haline getirilir. Bu yönteme örnek olarak tek eksenli veya izostatik sıkıştırma, ekstrüzyon ve toz haddeleme verilebilir. Üretimde çok dikkatli olmak gerekir. Çünkü artan gözenekler ve diğer hatalar, kalitesiz ürün oluşmasına sebep olur. İkinci aşamada numune matris malzemenin ergime noktasına yakın bir sıcaklığa ısıtılır. Köpürtücü madde, ergimeye başlayan malzemeden ayrışır ve gaz çıkışı olur. Bu gaz çıkışı ergiyik metalin genişlemesine ve oldukça gözenekli bir şekle dönüşmesine sebep olur.



Şekil 2.5. Toz metalurjisi ile köpük üretiminin şeması (34).

Karmaşık şekilli parçaların köpük şeklinde üretimi için Avusturya'da IMMM'den araştırmacılar ile İllichman GmbH araştırmacılarının beraber çalışması sonucunda kalıp enjekte tekniği geliştirilmiştir. Bu teknik de, ön şekil malzeme özel döküm bölmesinde köpürtülmüştür. Köpürtülmüş sıvı köpük, çelik veya kum kalıp içerisine enjekte edilmiştir. 1999 yılında bulunan bu yöntem ile üretilen parçalardan bazıları Resim 2.6. de gösterilmiştir (22).



Resim 2.6. Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak kalıp içerisine enjekte yolu ile elde edilmiş alüminyum köpük parçalar.

Bu metot alüminyum ve alaşımlarıyla sınırlı değildir. Kalay, çinko, prinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal ve alaşımları, işlem parametreleri ve köpürtücü maddelerle ayrıştırılarak metalik köpük elde edilebilir. Köpürtücü madde olarak TiH_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.

Toz metalurjisi yöntemi ile metalik köpük elde etmek, her biri ayrı birer araştırma konusu olabilecek beş aşamadan oluşur (32). Bu aşamalar aşağıda kısaca verilmiştir.

Karışımının Yapılması : Karışımın yapılması için metal tozuyla, gaz oluşturacak köpürtücü madde tozları belli oranlarda hazırlanır. Hazırlanan tozlar homojenliği sağlamak için karıştırılır. Karıştırılan tozlar kalıp içerisine konularak preslenir.

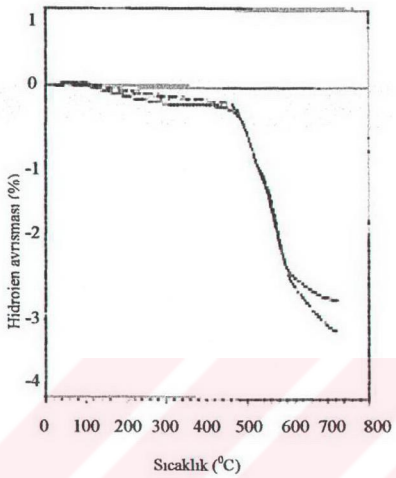
Gözenek Oluşumunun Başlangıcı : Preslenerek tablet haline getirilen karışım fırın içerisine yerleştirilir. Fırın içerisindeki sıcaklığın artmasıyla, karışımın içinde gaz ayrışır ve gözeneklerin çekirdeğini oluşturur. Köpürtücü maddenin ayrıştığı ve

alaşımın ergidiği sıcaklık değerlerine bağlı olarak, çekirdek oluşumu, katı, yarı katı ya da sıvı halde gerçekleşebilir.

Gözeneklerin Büyümesi : Ayrışmakta olan köpürtücü maddeden çıkan gazın sürekliliği sayesinde, çekirdekler büyür ve bir araya gelerek köpüğü oluşturur. Sıcaklık, ergiyik metallerin köpükleştirilmesinde genellikle sabit olduğu halde, burada sabit değildir çünkü karışım ara verilmeden ısıtılır.

Katılaşma : Hızlı soğutma, gözeneklerin bozulmasına ya da gözenek duvarlarında çatlaklar oluşmasına neden olabilir. Çok yavaş soğutma kararsız durumdaki köpüğün çökmesine sebep olur. Çökmeyi önlemek amacıyla, ısı çıkışını hızlandırmak gerekir. Bu durumu önlemek için, metalin doğru zamanlamayla ve hızla katılaştırılması gerekir. Bu yüzden köpüğün kalıp içerisinde katılaştırılması gerekir. Bir diğer yolu ise viskoziteyi artırmaktır. Zaten ticari işlemlerde kullanılan maddelerin en önemli rolü viskoziteyi artırmaktır. Viskoziteyi arttıran katkı maddeleri genellikle homojen dağıtılmış ve sıvının içinde katı olarak kalan oksitler veya karbürler gibi metal olmayan parçalardan oluşur.

Köpürtülecek malzemede hidrojen dönüşümü TiH_2 ayrışma sıcaklığı üstündeki sıcaklıklarda başlar. Çünkü her TiH_2 partikülleri kendi metal matrisinde var olan hidrojen çıkışını engeller. TiH_2'nin ayrışmasıyla hidrojen gazı kabarcık şeklinde serbest kalır ve ısının artmasıyla matris malzemenin lineer genişlemesine sebep olur. Bu yüzden TiH_2'nin ayrışarak hidrojen gazının serbest kalması gerekir. TiH_2' nin hangi sıcaklığa ulaşınca H_2 gazının serbest kalacağının belirlenmesi zordur. Bununla beraber Şekil 2.6.'de görüldüğü gibi 370-450 °C sıcaklık aralığında ayrışma olduğu bilinmektedir (21).



Şekil 2.6. TiH_2 içerisinde H_2 ayrışma sıcaklığı grafiği.

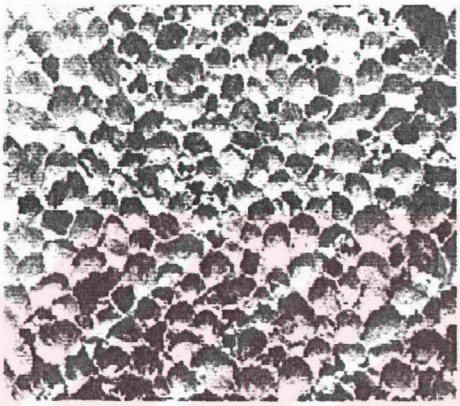
Hazırlık aşamasında deney numunesi fırın içinde köpürtülürse, metalik köpüğün parçalanacağı sonucuna varılabilir. Metalik köpük genişlemedikçe tanımlanmamış biçimde sınırlanır. Bu da yüksek gözenekli parça şeklinde elde edilmesine neden olur (35). Karmaşık şekilli parçalar üretilebilir.

Al ve alaşımlarının köpürtülmesinde kullanılan köpürtücü madde miktarının % 0,5-2,5 gibi düşük olduğu bulunmuştur (20,34). Metalik köpüklerde, örneğin köpürtücü olarak TiH_2 kullanılan Al köpüklerde, köpüğün yoğunluğu alüminyum yoğunluğu ile orantılıdır. Bu orantı kullanılan tozların ağırlıkları ölçülerek yapılır. İlk önce Al tozlarının ağırlığı, TiH_2 tozları ağırlığı, sıkıştırılmış Al/TiH_2 ve oluşan Al köpük en az 0,01 g hassasiyetindeki terazi kullanılarak ölçülür. Al köpükteki kalan TiH_2 oranını belirlemek için (34);

$$Q = \frac{W_f - W_p f_{Al}}{W_p(1 - f_{Al})}$$

formülü kullanılır. Burada W_f Al köpüğün ağırlığını, W_p Al/TiH_2 ağırlığını, f_{Al} Al/TiH_2 deki Al parçacık ağırlığını ifade etmektedir.

Yarı mamul parçaların tam genişlemesi için gerekli olan zaman, sıcaklığa ve numunenin boyutuna bağlı olup birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişir (1). İşlem parametrelerine dikkat edildiğinde elde edilen gözenek yapısı Resim 2.7.'de gösterilmiştir (36).



Resim 2.7. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş Al köpüğün gözenek yapısı (36).

Köpürtülecek bir malzeme, fırında köpürtülürse genişleme sınırlandırılmadığı sürece mamul madde düzensiz şekilli ve yumru köpük şeklinde olacaktır. Bu köpürtme işlemi, yarı mamül malzemenin içi boş kalıp içerisine konulup daha sonra ısıtılırsa, yarı mamul genişleyerek içine konulduğu kalıbın şeklini alır (10). Bu işlem hemen hemen mamül parçaların kapalı dış yüzeyli ve içinde oldukça gözenekli bir yapı oluşmasını sağlar. Uygun ısıtma yapılarak kesit boyunca sürekli veya süreksiz yoğunluk değişimi sergileyen kütleler üretmek mümkündür. Köpürtme işlemi, belli bir sıcaklıkta ve belli bir süre sonra kesilirse, belli bir yoğunluk elde edilecektir. Köpürtme işlemine devam edilirse daha düşük yoğunluk elde edilecektir. 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 iç yapıya sahip olacaktır.

Bu metotlarla üretilen alüminyum köpük metallerin bazı özellikleri Çizelge 2.1. de verilmiştir (3). Sıvı metalden köpük oluşturulmasının en büyük avantajı hızlı ve ucuz üretimin olmasıdır. Dezavantajı ise, kesme ve şekillendirme gibi ikincil işlemler gerekmektedir. Toz metalurjisi yöntemi ile metalik köpük üretiminde parçalar son şekle yakın üretilebilmektedir.

Çizelge 2.1. Alüminyum köpüklerin özellikleri (3)

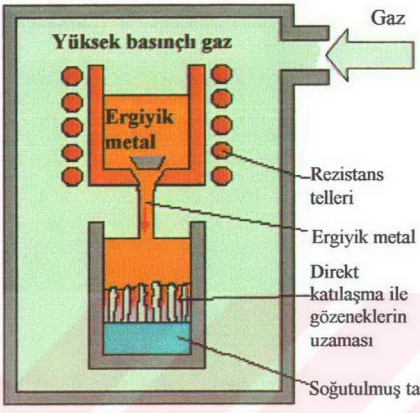
Firma İsmi	Cymat (Alcan)	Alporas	Fraunhofer
Üretim metodu	Sıvı Al+ gaz	Sıvı Al + TiH_2	Katı Al + TiH_2
Yoğunluk (g/cm^3)	0.08-0.38	0.21	0.35-0.7
Nispi yoğunluk	0.03-0.14	0.08	0.13-1.26
Hücre boyutu (mm)	4.18	6	3-6

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

Bu yöntem ile üretilen köpükler açık gözenekli yapıya sahiptirler. Açık gözenekli köpükler polimerik kalıp içerisinden alınarak süzme yolu üretilmiştir. Bu tür köpükler 1968 yılında Kaliforniya'da Enerji Üretim ve Araştırma (ERG) şirketi tarafından üretilmiş ve Duocel ticari adıyla pazarlanmıştır. Ayrıca bu köpükler GASAR metodu adı ile de bilinirler (22). Açık gözenekli köpükler değişik endüstriyel alanlarda, savunma sanayisinde, uzay ve havacılık alanlarında kullanılmıştır. Metalik köpük üretiminde genellikle alüminyum ve alaşımları (A356-6101) kullanılmıştır.

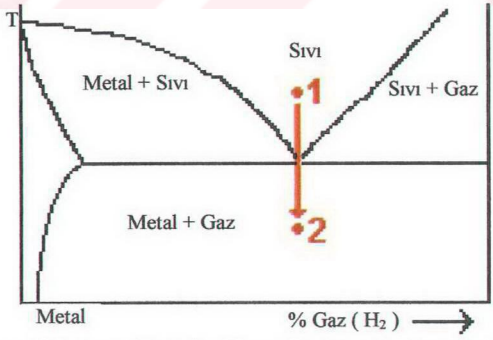
GASAR yönteminde, metal üst kısımdaki pota içerisinde ergitilmiştir. Dışardan sistem içerisine gönderilen hidrojen gazı ergiyik tarafından emilir. Emilen hidrojen gazı metali çözerek, ergiyik metal içerisinde gaz kabarcıkları oluşturur. Ergiyik metal içerisindeki hidrojenin çözücülüğü basıncın artması ile artar. Gaz emmiş olan ergiyik, tabanı soğutulmuş olan başka bir pota içerisine aktarılır. Ergiyik metal, potanın soğutulmuş olan tabanından yukarı doğru ilerleyerek katılaşır. Sistemin

tamamı kontrollü basınç altındaki gaz ile kuşatılmıştır. Katılaşma hızı 0,05–5 mm/sn oranındadır. GASAR yönteminin şematik gösterilişi Şekil 2.7.'de verilmiştir (36).



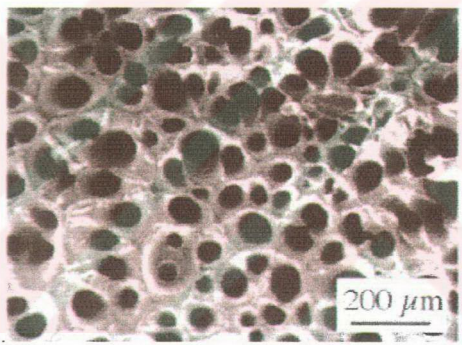
Şekil 2.7. Açık gözenekli metalik köpüğün GASAR yöntemi ile üretimi (36)

Bu metotda metal-hidrojen denge diyagramından yaralanılmıştır. Hidrojen emdirilmiş ergiyik metalin ötektik ayrışması Şekil 2.8'de gösterilmiştir (36). Sıvı fazdaki 1. noktasından soğutma ile 2. noktasına geçildiğinde yapı hidrojen gazı ve katı metal şeklinde oluşacaktır.



Şekil 2.8. Gaz emdirilmiş metalin 1 den 2'ye soğutulması ile oluşan katı metal ve gaz fazını gösteren şematik faz diyagramı (36).

Gözenekler soğutma yönü ile paralel olarak uzar. Gözenek şekli ve ebatları, kullanılan metal ve alaşımları, ergiyik sıcaklılığı, gaz basıncı, soğutma yönü ve soğutma oranı ile kontrol edilebilir (22,36). 1998 yılında Shapovalov tarafından GASAR yöntem ile elde edilen açık gözenekli alüminyum köpüğün tipik mikro yapısı Resim 2.8.' de gösterilmiştir (37). Köpük üretiminde alüminyum, nikel, bakır, demir, magnezyum ve çeşitli alaşımlar kullanılmıştır. Gözenek ebatları 5 μm ile 10 mm arasında, gözeneklilik oranı ise % 60-75 arasındadır (36). Bu yüzden kullanım alanları kısıtlıdır. Gözenek şekli genellikle yuvarlak ve homojendir. Bu yöntemle üretilen köpükler uygun kalitededir. Örgü şeklinde olması nedeni ile genellikle kolay şekilli parçalar üretilebilir. Üretim hızı yavaş ve zordur. Ayrıca yöntem karmaşık ve zordur.

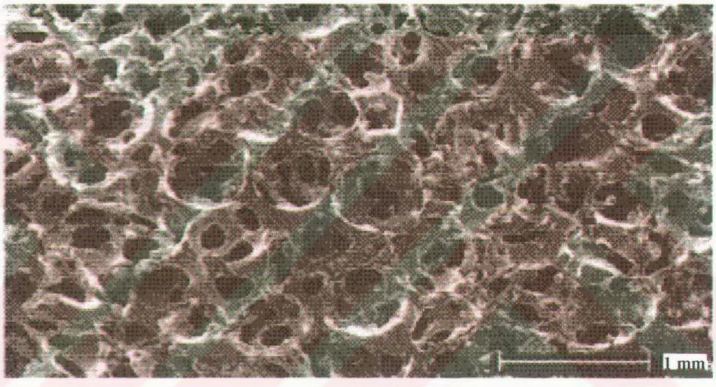


Resim 2.8. GASAR yöntemi ile üretilen açık gözenekli alüminyum köpüğün optik mikro yapısı (37).

Açık gözenekli köpüklerin üretiminde bazı malzemelerin çözücü özelliklerinden yararlanılarak alternatif yöntemler araştırılmıştır (22). Örneğin sodyum klorür uygun bir malzemedir. Asal bir kimyasaldır, ucuz ve su içerisinde ayrışarak yer değiştirebilir. Açık gözenekli metalik köpüklerin üretimi, 1961 yılında Polonsky ve arkadaşları, 1965 yılında da Seeliger ve Deuther, 1966 yılında da Kuckhek tarafından geliştirilmiştir (38). Deneysel çalışma başlangıcında paketlenmiş tuz tozları filtrasyondan önce kalıp içerisinde ısıtılarak depolanmıştır. Döküm sırasında, depolanmış tuz tozlarının filtrasyonunda geleneksel yer çekimi kullanılmıştır. Bu tozlar gaz basıncı, vakum veya titreşim kullanılarak ince toz ebatları haline

getirilmiştir. Bu köpükler ister istemez yüksek oranda boşluk içermekte ve minimum gözenek ebatları 1 mm civarındadır.

Son zamanlardaki çalışmalarda, preslenmiş tuz tozlarına ön sinterleme yapılarak ve modern basınçlı filtrasyon metodu kullanılarak yüksek boşluk içeriği ve oldukça küçük çaplardaki gözenekler (10 μm) elde edilmiştir. 1999 yılında San Marchi ve arkadaşları tarafından elde edilen köpüğün elektron mikroskobundaki mikro yapısı Resim 2.9.'da gösterilmiştir (22).



Resim 2.9. Presleme, sinterleme ve basınçlı filtrasyon yapılarak elde edilen açık gözenekli köpüğün, elektron mikroskobunda mikro yapısı (22).

Basınç yardımıyla ergiyik metalin filtrasyon tekniği gözenekli yapıların üretiminde bir kural olarak kullanılmıştır. Açık gözenekli yapılar, 1991 yılında Lanning ve arkadaşları tarafından titanyum ergiyiklerinde, 1993 yılında Rowal ve arkadaşları tarafından alüminyum ergiyikerinde ve 1998 yılında Hartman ve arkadaşları tarafından magnezyum ergiyiklerinde filtrasyon tekniği ile üretilmiştir (38).

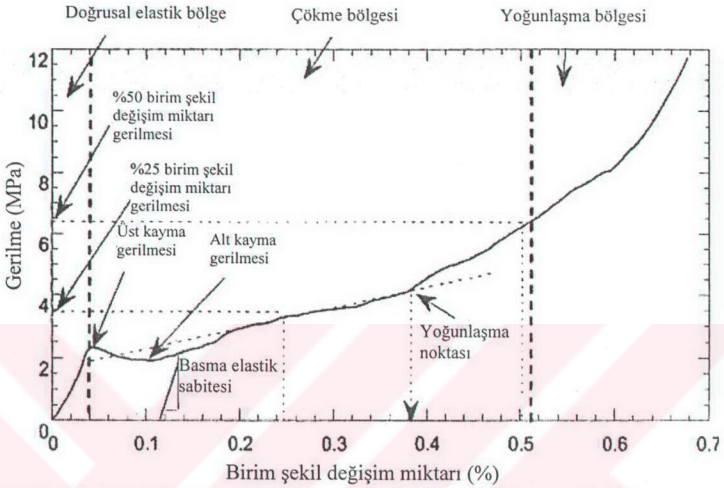
3. ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

Alüminyum köpüklerin düşük yoğunluk, yüksek dayanıklılık ve iyi enerji absorbesi gibi özelliklerinden dolayı çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanımı artmıştır (39-41). Diğer özellikleri arasında; basma yüklemeleri altında deformasyon, elastik deformasyon, eksenel basmalarda katlanma ve çentik özellikleri çok önemlidir. Bu bölümde özellikle alüminyum köpüklerin mekanik özellikleri üzerinde durulacaktır.

3.1. Lineer Elastik Deformasyon

Köpüklerin lineer elastik deformasyon özellikleri Young modülü ve kayma ile hesaplanabilir (42). Lineer elastik deformasyon mekanizması gözeneklerin açık veya kapalı olması durumuna göre değişir. Kapalı gözenekli köpükler daha karmaşıktır. Eğer gözenek zarları ince olursa çatlama veya kırılma meydana gelebilir. Bu zarlarda bazı deformasyon gerilmeleri ortaya çıkar. Bu gerilme kuvvetini, köpük malzemesinin sahip olduğu gerilme kuvveti etki ederek arttırır (43). Ayrıca gözenek içerisinde, gözenek akışkanının (genellikle hava) sıkıştırılmasıyla meydana gelen gerilme oluşur (42).

Alüminyum köpüklerin gerilme-birim şekil değişim eğrisi Şekil 3.1. de gösterilmiş ve Al 6061 metalik köpüğü için farklı üç bölgede anlatılmıştır (1,4). Bu üç bölge sırasıyla; lineer elastik bölge, çökme ve yoğunlaşma bölgeleridir. Metalik köpükler tipik bir gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi gösterirler ve lineer elastik bölgede elastik deformasyona uğrarlar. Lineer elastik bölgede gerilme ve gerinim gözenek duvarı ile kontrol edilir. Bu bölge gözenek duvarlarının bükülmesi ve yırtılması ile sona erer ve çökme bölgesi başlar. Çökme, deformasyonun çok iyi sınırlandırıldığı elastik bölgeden deformasyonun diğer deforme olmamış kısımlara sıçramasıyla ilerler. Kritik bir genleşmede gözenek duvarları birbirine değmeye başlar ve bunun sonucunda yoğunlaşma meydana gelir.



Şekil 3.1. Metal köpüklerin gerilim-birim şekil değişim miktarı grafiği (9).

Al köpüklerin basma yükleri altındaki mekanik özellikleri yoğunluklarına ve ana metalin akma gerilmesine bağlıdır. Basma gerilmesi, artan yoğunluk ve ana malzemenin akma gerilmesi ile artar. Alüminyum köpüklerin elastik modüllerini Gibson ve Ashby basit kübik ışın modelleri kullanarak formüle etmiştir (10,33). Bu formüller aşağıda verilmiştir.

$$1.\quad E^* = \frac{C_1 \rho}{E_s} \qquad 2.\quad E^* = \frac{C_2 \rho^*}{E_s} \qquad [3.1.]$$

Bu eşitliklerde E^* ve E_s köpüğün ve gözenek duvar malzemesinin elastik modülleridir. C_1 ve C_2 katsayıları gözeneğin geometrik düzlemine bağlıdır. C_1 katsayısı izotropik kapalı gözenekler için 1/3, arı peteği gözenekler için 0,35 olarak hesaplanır. C_2 birim değere eşittir. ρ nispi yoğunluğu ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi tarif edilir. Burada ρ^* ve ρ_s sırasıyla köpüğün ve gözenek duvar malzemesinin yoğunluğudur.

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_s} \qquad [3.2.]$$

Ticari Al köpüklerin deneysel olarak ölçülen modül değeri Eşitlik 3.3. ile hesaplanan değerlerden oldukça düşüktür (10). Bu modül değerinin az olması, gözenek içerisindeki köpürme işlemi sırasında yüzey gerilmesinden dolayı sıvı metalin kesişim bölgelerine çekilmeleri sebebiyle daha ince gözenek kenarlarının oluşmasından dolayıdır. Deneysel olarak tespit edilen köpüklerin modül verileri genellikle aşağıda verilen formüle uyar (40).

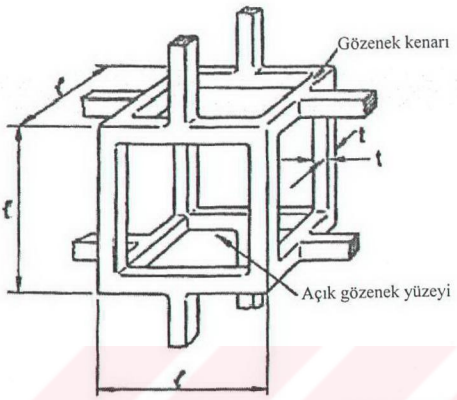
$$\frac{E^*}{E_s} = C\rho^n \qquad [3.3.]$$

Al köpükler için n değeri 1,5-2 ve C, yüksek kalite köpükler için 3, düşük kalite köpükler için 0,5 olarak kullanılır (10,40). Gözeneklerin eğilmesi, gözenek kenarının olmaması, gözenek kenarının delik olması veya homojen olmayan gözenekler Al köpüklerin mekanik özelliklerini azaltan unsurlardır (8,43). Ayrıca açık gözenekli alüminyum köpüklerin elastik deformasyon özellikleri farklıdır (42). Bu özellikler aşağıda kısaca belirtilmiştir.

3.1.1. Açık gözenekli alüminyum köpüklerin lineer elastik özellikleri

Açık gözenekli alüminyum köpükler, kübik yapılı şeklide şematik olarak Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. şekilde *l*, kübik yapılı zarın uzunluğunu, *t* kesişen kenarların kalınlığını ve I iki zar alanı arasındaki uzaklığı ifade etmektedir. Gözeneklerin nispi yoğunluğu (ρ^*/ρ_s), *t* ve *l* ölçüleri ile orantılıdır.

$$1. \quad \frac{\rho^*}{\rho_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \qquad 2. \quad I = t^4 \qquad [3.4.]$$



Şekil 3.2. Açık gözenekli metalik köpüğün şematik gösterilişi (42).

Köpükler için Young modülü, orta noktasına F kuvveti uygulanmış l kirişinin elastik eğilmesinden hesaplanmıştır. Standart kiriş teorisi bu eğilmeyi hesaplamada kullanılmıştır (43). Bu teori Eşitlik 3.5.'de verilmiştir.

$$\delta = \frac{F l^3}{E_s I} \qquad [3.5.]$$

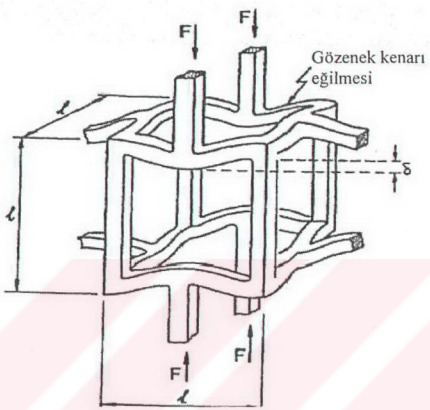
Burada E_s kiriş malzemesi için Young modülüdür. Eksenel gerilmelerde F kuvveti köpüğün diğer gözenek kenarlarına aktarılmıştır (Şekil 3.3.). Kenar eğilmesi ve lineer elastik gerilmesi Eşitlik 3.5.'den bulunmuştur. F kuvvetinin σ basma gerilimi ile $F = \sigma l^2$ orantısı vardır. Köpükler için elastik modülü aşağıdaki bağıntı ile verilmiştir (42).

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{C_1 E_s I}{l^4} \qquad [3.6.]$$

Buradan;

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \qquad [3.7.]$$

bulunmuştur. C_1 sabittir ve yaklaşık olarak 1'e eşittir.



Şekil 3.3. Eksenel basma kuvvetlerinde gözenek kenarı eğilmesi (42)

Makaslama modülü benzer yöntemlerle hesaplanır. Eğer makaslama kuvveti köpüğe uygulanırsa gözenek zarları eğilme ile karşılık verir. Eğilme (Fl^3 / E_sI), toplam gerilim (τ) ve gerilimle (γ) orantılıdır.

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{C_2 E_s I}{l^4} \qquad [3.8.]$$

buradan;

$$\frac{G^*}{E_s} = C_2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \qquad [3.9.]$$

bulunmuştur. Burada C_2 yaklaşık olarak 3/8'e eşittir.

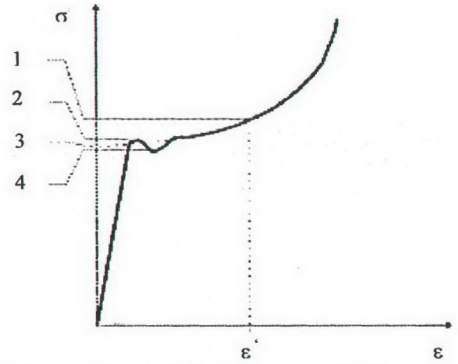
3.2. Plastik Çökme ve Yoğunlaşma

Metalik köpükler, metallerden üretildiği için belli bir plastik şekil değiştirme bölgesine sahiptirler. Bu plastik bölge lineer elastik bölge üstündeki yüklemelerde

plastik çökme ile başlar. Plastik çökme, elastik eğilmeye benzer ve gerilim- birim şekil değiştirme grafiğinde geniş bir alana sebep olur. Birim şekil değiştirme bölgesinde geri kazanım olmaz (42).

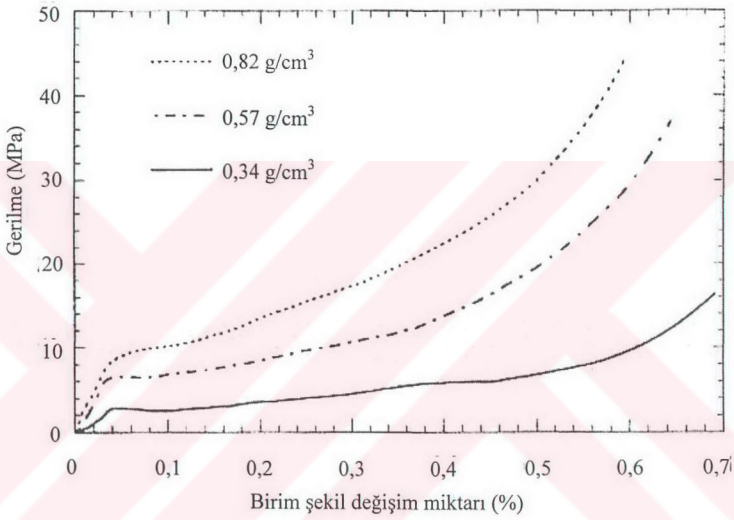
Çökme bölgesinde oluşan gerilme dalgaları bölgesel deformasyonun yayılması esnasında oluşmaktadır. Yapısında homojen gözenek boyutu ve dağılımı bulunduran köpüklerin, çökme bölgesinde sabit bir deformasyon gerilmesi göstermesi beklenir. Gerçekte ise gözenek boyutu ve dağılımındaki farklılıklar, zayıf gözeneklerin önce, kuvvetli gözeneklerin de sonradan çökmesine neden olur. Bu yüzden gerilme çökme bölgesinde artan bir özellik gösterir (44).

Metal köpükler genellikle akma noktasıyla birlikte plastik deformasyon özelliği gösterir. Şekil 3.1.de köpüğün genel deformasyon özellikleri gösterilmiştir. Başlangıçta elastik deformasyonun ardından plastik deformasyona geçiş olmuştur. Bazı durumlarda bu iki sistemin ardından üst ve alt akma noktası meydana gelmiştir. Metal köpüklerin akma dayanımı Şekil 3.4.'de gösterildiği gibi dört noktada belirtilmiştir (45). 1. gerilme dayanımı noktası, 2. üst akma noktası, 3.alt akma noktası, 4. ekstrapolasyon noktasını ifade etmektedir (45). Basma süresince numune içerisinde küçük bölgesel plastik deformasyon olabilir.



Şekil 3.4. Basma yüklemeleri altında köpüğün tipik davranış grafiği (25).

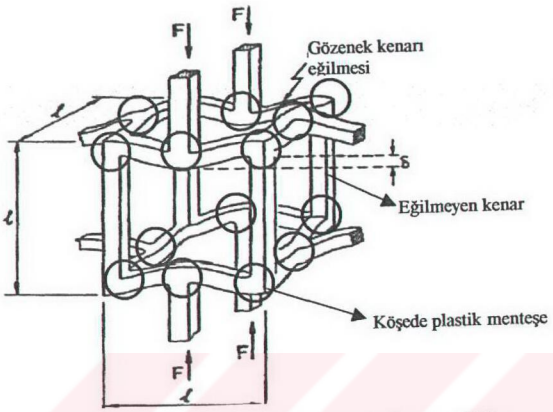
Daha önce yapılan deneysel çalışmalarda 0,34 g/cm^3, 0,57 g/cm^3 ve 0,82 g/cm^3 yoğunluklu olmak üzere üç Al köpüğün yükleme eğrileri mukayese edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.5.'de gösterilmiştir. Yüksek yoğunluktaki köpüğün yüksek gerilme miktarı gösterdiği belirtilmiştir (45).



Şekil 3.5. Gerilmenin köpük yoğunluğu ile değişim grafiği (25).

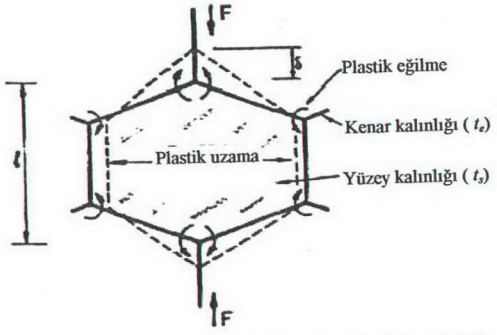
Açık gözenekli metalik köpüklerde plastik çökme, gözenek zarı üzerine gelen kuvvet miktarı (F) ve plastik moment üzerinde kuvvet etki ettiğinde meydana gelir. Bu esnada, basma yönüne paralel olan gözenek kenarında eğilme olmazken gözenek köşelerinde plastik menteşe görevi yapar (Şekil 3.6). Kenarlarda oluşan moment değeri Eşitlik 3.10'da verilmiştir (42). Burada M_p plastik moment, σ_{ys} gözenek duvar malzemesinin akma dayanımını ifade etmektedir.

$$M_p = \frac{1}{4}\sigma_{ys} l^3 \qquad [3.10.]$$



Şekil 3.6. Açık gözenekli metalik köpüklerde plastik menteşe oluşumu (42).

Kapalı gözenekli metalik köpüklerde, plastik çökme zarlar üzerinde meydana gelir. Plastik çökme, zarların basma yönünde katlanmasıyla oluşur (Şekil 3.7). Katlanma için gerekli kuvvet miktarı düşüktür. Fakat basma esnasında zarların katlanması için gerekli kuvvet, köpüğün akma noktasına önemli oranda katkıda bulunur. Bu durum deformasyon artışı sırasında yapılan işin hesaplanmasıyla bağlantılıdır (42).



Şekil 3.7. Basma yüklemeleri altında gözeneklerin plastik çökmesi (42)

Basma yüklemeleri altında gözeneklerin plastik çökmesi Şekil 3.7.'de şematik olarak gösterilmiştir. burada t_e ve t_s gözenek kenarı kalınlığını ifade etmektedir. Yapılan iş Fδ, F kuvveti ve gözenek çökme miktarı δ ile orantılıdır. Yapılan işin denklemi Eşitlik 3.10.'da verilmiştir.

$$F\delta = \alpha\, Mp\frac{\delta}{l} + \beta\, \sigma_{ys}\, \delta\, t_f l \qquad [3.11.]$$

burada α ve β sabittir. F yerine σl^2 ve M_p yerine $t^3/4$ konulursa;

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = \frac{\alpha}{4}\left(\frac{t_e}{l}\right)^3 + \beta\left(\frac{t_f}{l}\right) \qquad [3.12.]$$

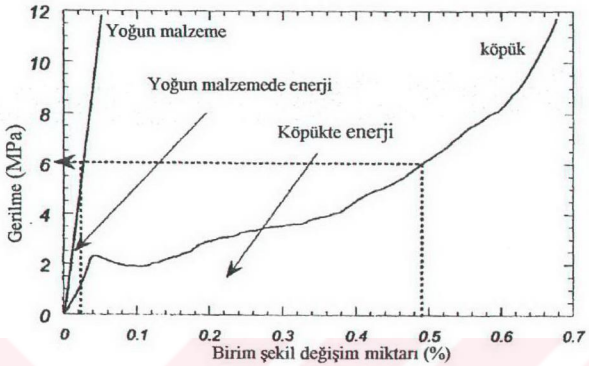
sonuçta aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = C_1\left(\varphi\,\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{3/2} + C_2(1-\varphi)\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \qquad [3.13.]$$

kapalı gözenekli metalik köpüklerde zar gerilme hesaba katılır. Formülde C_5 sabittir. C_1= 0,3 ve C_2= 1'dir. φ açık gözenekli köpüklerde 1, kapalı gözenekli köpüklerde 0'a eşittir. $\rho^* = \rho_s$ olduğunda $\sigma_{ys} = \sigma^*_{pl}$ olur. Bu eşitlik gözenek kenarı plastik eğilmesi ve yüzeyde plastik gerilmein etkilerinin toplamını ifade eder (42).

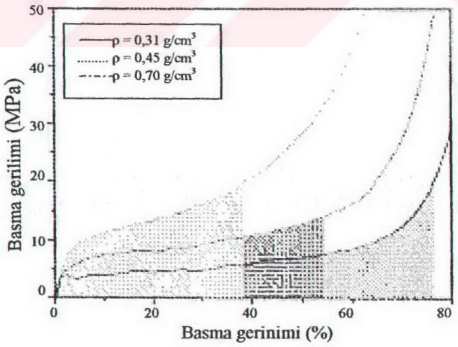
3.3. Enerji Absorbesi

Enerji absorbesi gerektiren uygulamalarda metalik köpük kullanımı büyük önem taşımaktadır. Şekil 3.8.'de köpük malzeme ile yüksek yoğunluktaki malzemenin enerji absorbeleri arasındaki karşılaştırma şematik olarak gösterilmiştir (45). Gerilim-gerinim değişim miktarı grafiğinin altında kalan alan metalin enerji emme kapasitesini göstermektedir . Şekilden de anlaşıldığı üzere köpük belirlenmiş gerilme miktarında yoğun metalden daha fazla enerji absorbe edebilir.



Şekil 3.8. Basma yüklemeleri altında Al köpük malzeme ile yoğun malzemenin enerji absorbeleri (1).

Frounhofer enstitüsünde yapılan çalışmada 0.31 g/cm^3, 0.45 g/cm^3 ve 0.70 g/cm^3 olmak üzere üç farklı yoğunluğa sahip Al köpükler kullanılmış ve bunların enerji absorbeleri Şekil 3.9.'da gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi yoğunluğun enerji absorbesini etkilediği anlaşılmıştır (45).

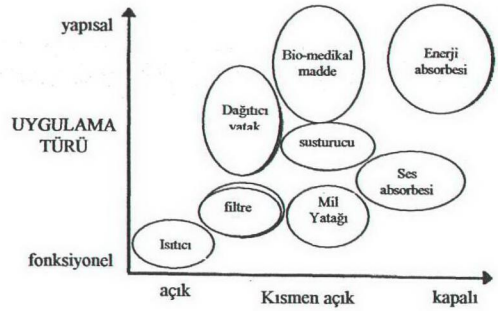


Şekil 3.9. Farklı yoğunluktaki Al köpüklerin enerji absorbeleri (41)

3.4. Uygulama Alanları

Metalik köpük araştırmalarının yeniden canlandığı dönemde, daha güvenilir ve daha homojen köpükler üretilmeye başlandı. Son gelişmelerden biri de Avusturya'daki Light Metal Compedence Center ve Hütte Kleinreichenbach'tan Dietmar Leitlmeier ve arkadaşlarının, seramik parçacıkları ilave edilerek, çok homojen alüminyum köpük yapılar üretmenin yeni bir yolunu bulmaları olmuştur. Araştırmacılar bunun için yeni bir baloncuk üretme aygıtı geliştirmişlerdir. Ürettikleri köpükleştirilmiş malzemeye ticari olarak "Combal" adını vermişlerdir (7).

Günümüzde metal köpükler, bir çok yeni uygulama alanında kendine yer edinmeye başlamıştır. Metalik köpükler iyi enerji absorbesi, ses absorbesi, yüksek sıkıştırma gücü, düşük özgül ağırlık ve yüksek rijitliğe sahip oldukları için geniş kullanma alanına sahiptirler. Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi gözenek yapısına göre (açık, kapalı, yarı açık gibi) fonksiyonel ve yapısal kullanım alanına sahiptirler (27,46). Yük taşıma gibi yapısal uygulamalar için "tam kapalı", yüksek oranda sıvı akışı için "çok açık" gibi değişik derecelerde açıklığa ihtiyaç olabilir. Örneğin; sertlik-ağırlık oranı, titreşimi söndürme kapasitesi ve ateşe dayanıklılık özelliği nedeni ile gemi yapımında, kapılar, ambar kapakları yada duvarlarda alüminyum köpük panellerin kullanımı tercih edilebilir.



Şekil 3.10. Gözeneklilik oranına göre metalik köpüklerin fonksiyonel ve yapısal kullanım alanları (46)

Medikal uygulamalar için titanyum, yüksek sıcaklık uygulamalarında ise paslanmaz çelik veya titanyum kullanılmıştır (34). Genel olarak metalik köpüklerin üretiminde üretim yöntemi ve maliyeti dikkate alınmıştır. Teknoloji gözeneksel metalik yapıların kullanılmasını gerekli kılmıştır (34,47). Makine ve taşıtlar içinde kullanılması fonksiyoneldir.

Metalik köpükler çok iyi kesme kuvvetiyle birlikte düşük yoğunluğa sahiptir. Bu yüzden iki levha arasında sıkıştırılmış metalik köpük (sandviç) konstrüksiyonlar için idealdirler. Ayrıca metalik köpükler akustik özellikleri ile ses absorbesinin gerektiği bazı yerlerde kullanılır. Bu malzeme özellikle trafik gürültüsünü azaltmada karayollarında kullanılabilir. Açık gözenekli köpükler geniş yüzey alanına sahiptirler. Yüksek gözenek duvarı, olağan üstü ısı transfer kabiliyeti sağlar. Metalik köpükler mimaride de kullanıldığı gibi aynı zamanda mimarinin estetik özelliğinde de kullanılabilir. Ağırlığın düşürülmesi de ayrıca büyük avantaj sağlar.

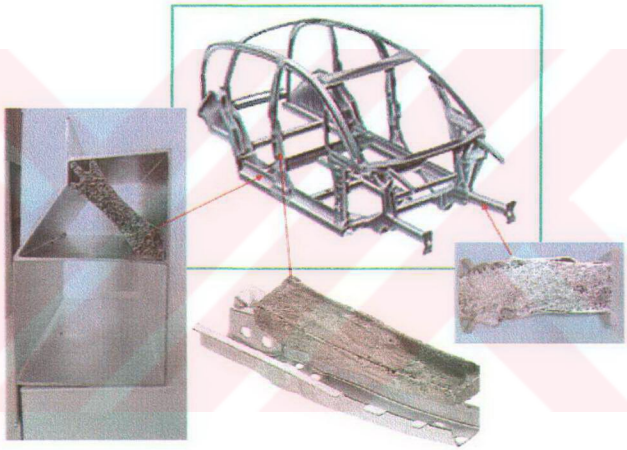
3.4.1. Otomotiv endüstrisi

Son zamanlarda otomobillerin güvenilirliği ön plana çıkmıştır. Bazı durumlarda taşıtların ağırlığı önem taşımaktadır. Taşıt ağırlığının düşürülmesi ile yakıt tüketimi azalacaktır (34). Ayrıca özellikle Avrupa ve Japonya'da küçük otomobiller tercih edilmektedir. Bu küçülme yolcu bölmesindeki alanın daraltılmasını gerektirmeyecek şekilde tasarımlanmaktadır. Otomobil parçaları veya diğer yapıların küçültülmesi yolu ile yolcu rahatlığının korunması ve güvenilirliğin artırılması yoluna gidilmektedir.

Köpük sandviç metaller ve alüminyum köpükten yapılmış hafif ve sağlam yapılar taşıtlar için ağırlığın azaltılması ve sağlamlığın artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Örneğin ; kaporta, radyatör kapağı, bagaj kapağı ve açılır tavan sağlamlık ve ağırlık yönünden önem taşımaktadır (27,45).

Enerji absorbe özelliği ele alındığında, otomobil ve trenlerde çarpışma ihtimali yüksek bölgelerdeki maksimum çarpma enerjisi dağıtılarak deformasyonu kontrol

etmek mümkün olabilir. Uygulamanın olabilirliği çarpışma sırasında ön ve kenar bölgeleri korumayı amaçlar. Resim 3.1. de metal köpüklerin otomobillerde kullanıldığı yerleri göstermektedir (48). Metal köpükle doldurulmuş boru profiller burkulma süresince ilginç şekil ve deformasyon özellikleri gösterirler. Ses absorbesi ve ısı yalıtımı otomotiv endüstrisinde önemli özelliklerdir. Bu nedenle metal köpükler ses absorbe ve ısı yalıtımı özelliklerinden dolayı da otomotiv endüstrisinde tercih edilebilirler.



Resim 3.1. Metal köpüklerin otomobillerde kullanıldığı yerlerden bazıları (47)

3.4.2. Yapı endüstrisi

Konstrüksiyon uygulama türlerinde hafiflik ve sağlamlığın yanında ateşe dayanıklı metallerde gerekir. Bu uygulama türlerinde, metalik köpüklerin iki özelliğine ihtiyaç vardır. Birincisi elastik deformasyon ve yüksek sertlik-ağırlık oranıdır (34). İkinci özellik ise örnekle daha kolay anlaşılabilir. Düz panellerin sertliği Eh^3 formülüyle orantılıdır. Burada E Young modülü ve h panel kalınlığını ifade eder. E, $h\alpha\rho^{-1}$ yöntemindeki "ρ" köpüğün yoğunluğu ile direkt olarak orantılıdır. Bu nedenle belirli

ağırlıktaki düz panellerin sertliği ρ^{-1} ile orantılıdır. Metalin yoğunluğunun sertlik-ağırlık oranı aynı ağırlıktaki geleneksel levhalardan beş kat fazladır. E' nin yoğunluğa bağlı olduğu varsayılan denklem, kusurlu köpükler üzerinde yapılan çoğu deneysel gözlemlerde ifade edilmiştir. Kapalı gözeneklerde kusursuz köpük için $E\alpha\rho$ ilişkisinin doğrusal olması istenir (34). Kusurların azaltılmasıyla daha iyi özelliklere sahip köpükler yapılabilir.

Köpürtülmüş sandviç metaller asansörlerde ağırlığın azaltılmasında dolayısı ile enerji tüketiminin azaltılmasında gereklidir. Asansörlerin yüksek hızda hızlandırılması ve yavaşlatılmasında ağırlık en önemli faktörlerden biridir.

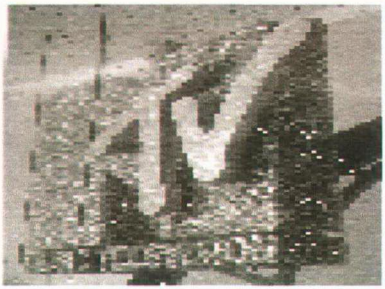
Metal köpüklerin diğer uygulaması; beton kolon ile duvarlar arasında sıkıştırılmasıdır. Duvar ile beton kolon arasındaki boşluğun doldurulmasında köpük malzeme boşluk içerisine yerleştirilmiş ve bölgesel olarak ısıtılmıştır. Isıtma süresince köpük malzeme genişlemiş ve beton kolon ile duvar arasındaki alan dolmuştur (27).

3.4.3. Diğer uygulama alanları

Sandviç şeklindeki metalik köpükler arı peteği şeklinde üretilebilmeleri ve alev almama özelliğinden dolayı uzay endüstrisinde kullanılabilirler. Ayrıca diğer metallerden yapılmış köpüğün özelliklerinden faydalanılarak bir çok uygulama alanlarında kullanılabilirler. Örneğin; kurşun ve nikel köpükler kuyumculukta kullanılabilir (1,3,27). İşlem parametrelerinin değiştirilmesi ile açık gözenekli köpükler meydana getirmek mümkündür. Nikel ve titanyum gibi alaşımların yüksek sıcaklıkta köpürtülmesi özellikle uzay ve bio-medikal alanda kullanılması uygulama alanlarını genişletecektir. Resim 3.2.'de ve Çizelge 3.1'de bazı köpük yapıları ve kullanım alanları gösterilmektedir (49,50).

Çizelge 3.1. alüminyum köpüklerin uygulama alanları ve mekanik özellikleri.

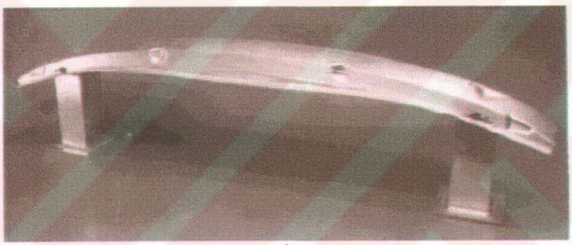
Prototip Parça (Al köpük malzeme)	**Uygulama Alanı**	**Mekanik Özellik**
Plakalar	Talaşlı imalat, mimari yapılar,	Ağırlık, tasarım
Silindirler, küpler	Yedek araba parçası	Darbe enerjisi absorbsiyonu
Tüp	Fiziksel araştırmalar	Fiziksel özellikler: iletkenlik, gözeneklilik
Maçalar, küpler ve conta	Dökümhanelerde, maça dökümlerinde	Döküm koşulları, ağırlık, enerji aborbsiyonu
Sıkı yapısal parçalar	Otomotiv endüstrisi, elektriksel uygulamalar, koruyucu kaplamalar	Rijitlik, Sönümleme, ağırlık
Yapısal parçalar	Plakalar (otomotiv parçalarında) (DaimlerChrysler, Opel)	Rijitlik, Sönümleme davranışı
Yapısal parçalar	Otomotiv parçaları (sunroof)	Rijitlik, ağırlık
Yapısal parçalar	Gemiler, sandallar, yatlar	Ağırlık
Sandviç yapılar	Taşımacılık, raylı taşıtlar	Rijitlik
Sıkı yapısal parçalar	Silahlar (kabza)	Ağırlık
Köpük malzeme ile doldurulmuş profiller	Motor bağlantıları (CRFiat), yapısal araba parçaları, raylı taşıtlar, uçaklar, yel değirmenleri	Çarpışma davranışı
Köpük malzeme ile doldurulmuş profiller	Takım tezgahlarında, inşaat endüstrisinde, robotlardaki destek elemanlarında	Sönümleme özellikleri
Sıkı yapısal parçalar	Sanatsal uygulamalar, tasarım	Görünüm



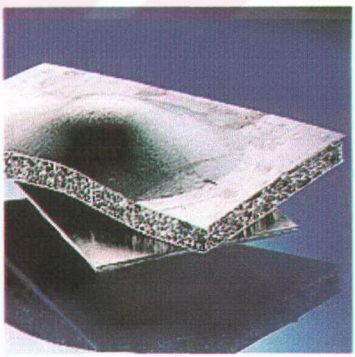
a)



b)



c)



d)

Resim 3.2. Metalik köpük uygulama alanları, a) reklam sektörü, b) Aleve dayanıklılık deneyi, c) otomobil tamponu, d) sandviç köpük

4. DENEYSEL MALZEME VE METOT

4.1. Malzeme

Bu çalışmada Almanya'dan ECKA firmasından sağlanan 200 μm'luk, AS 91/S kodlu % 99 saflıktaki alüminyum tozları, köpürtücü madde olarak ise ALDRICH firmasından sağlanan –325 mesh ve % 98 saflıktaki TiH_2 tozları kullanılmıştır.

4.2. Deneysel Metot

4.2.1. Karıştırma ve presleme

Al tozları ve % 0.5, % 1 ve % 1.5 oranlarında köpürtücü madde (TiH_2) tozları 1/10000 g hassasiyetinde terazi ile tartılarak homojen bir dağılımın oluşturulması için yüksek enerjili attritörde 30 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar Mohr-Federhaft-Lausenhousen marka 20 ton çekme basma kapasitesine sahip üniversal test cihazında presleme yapılarak 20 mm çapında ve 10 mm yüksekliğinde silindirik numuneler elde edilmiştir.

4.2.2. Ön ısıtma ve deformasyon

Elde edilen silindirik numuneler 5 ^{0}C/dk ısıtma hızına sahip SFL marka yüksek sıcaklık fırını içerisinde koruyucu gaz kullanmadan 350 ^{0}C sıcaklığa ısıtılıp 10 dk süreyle bekletilmiştir. Fırın içerisinden alınan numuneler Kurbyshev marka darbeli dövme presinde % 25, % 50 ve % 75 oranlarında preslenerek deforme edilmiştir. Deformasyon oranına bağlı olarak değişen numune ölçüleri Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deformasyon oranına bağlı olarak değişen numune ölçüleri.

Deformasyon Miktarı (%)	Deformasyon Öncesi Ölçü (mm)	Deformasyon Sonrası Ölçü (mm)
0	Ø 20x10	Ø 20x10
25	Ø 20x10	Ø 23x7,5
50	Ø 20x10	Ø 25x5
75	Ø 20x10	Ø 33x2,5

4.2.3. Köpükleştirme işlemi

Preslenerek farklı oranlarda deforme edilen blok numuneler oda sıcaklığındaki fırın içerisine yerleştirilmiştir ve 680-700 ^{0}C'deki sıcaklıklarda köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Fırın içerisinde 10, 20 ve 30 dakika süreyle bekletilerek köpük yapı elde edilmiş ve fırın içerisinden alınmıştır ve atmosfer ortamında soğutulmuştur.

4.3. Karakterizasyon

4.3.1. Metalografik numune hazırlama

Metalografik incelemeler için deney numuneleri presleme yönünde ortadan kesilmiştir. Numuneler daha sonra 240-400-800-1200' lük zımparalarda su altında zımpara yapıldıktan sonra keçelerde 3 μm' lik elmas pasta kullanılarak parlatma yapılmıştır. Elde edilen alüminyum köpüklerin gözenek şeklini, ebatını ve dağılımını görmek amacıyla dijital kamera ile makro yapı fotoğrafları çekilmiştir. Dağlayıcı olarak 45 ml HCl + 15 ml nital + 15 HF + 25 ml H_2O karışımı kullanılmıştır. Optik incelemeler Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Malzeme Bilimi Eğitimi Ana Bilim Dalı, Metalografi Laboratuarında bulunan Prior marka mikroskopta yapılmıştır.

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum köpük üretiminde köpürtücü madde miktarı (%0.5, %1, %1.5), köpürtme sıcaklığı (680-700^{0}C), köpürme süresi (10-20-30 dak.) ve deformasyon miktarı (%0, %25, %50, %75) gibi dört farklı parametre kullanılmıştır. Toz presleme basıncı 300 MPa ve ön ısıtma sıcaklığı 350 ^{0}C olarak sabit tutulmuştur. Kullanılan deney parametrelerinin gözenek dağılımı, gözenek ebatı, lineer genişleme ve köpük yoğunluğuna etkileri incelenmiş ve bu etkiler aşağıda ayrı ayrı başlıklar halinde tartışılmıştır.

5.1. Köpürtücü Madde Miktarının Al Köpük Üretimi Üzerine Etkisi

Yapılan çalışmada köpürtücü madde olarak TiH_2 seçilmiştir. Baumgartner ve arkadaşları (19) tarafından yapılan çalışmalarda, alüminyum ve alaşımlarından metalik köpük elde etmede en uygun köpürtücü madde olarak TiH_2 belirlendiği görülmüştür. ZrH_2, HfH_2 gibi diğer köpürtücülerinde metalik köpük üretiminde kullanıldıkları kanıtlanmış ancak TiH_2'den çok pahalı olduğu ve teknik avantajlarının olmadığı belirtilmiştir. Bu yüzden köpürtücü madde olarak TiH_2 kullanılmıştır.

Köpürtücü madde miktarının Al köpük üretimi üzerine etkisini incelemek amacıyla 300 MPa sıkıştırma basıncında preslenerek hazırlanan numuneler 350 °C ön ısıtma sıcaklığına tabi tutulmuştur. Daha önce yapılan çalışmalarda TiH_2 tozunun ayrışması 380 ^{0}C'den başlayıp 570 ^{0}C'ye kadar devam ettiği bulunmuştur (5, 19, 21, 52). Banhart ve arkadaşları (52) tarafından yapılan bir çalışmada 500 °C sıcaklıkta sıcak preslenmiş tabletlerde hidrojen kaçmasından dolayı köpükleşmenin olmadığı belirlenmiştir.

Köpürtme sıcaklığı 680 °C, deformasyon miktarı; %50 ve köpürtme süresi; 10 dak. olarak sabit tutulmuştur. Matris malzeme olan Al toz miktarı sabit tutularak (8 g) % 0.5, % 1, ve % 1.5 oranlarında köpürtücü madde (TiH_2) ilave edilmiş ve karıştırılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda (5, 9, 24, 28) köpürtücü madde

miktar olarak % 0,5-0,6-1-1,4-1,5-1,6 gibi farklı oranlarda kullanılmıştır. Bu sebepten dolayı köpürtücü madde miktarının alüminyum köpük üretimi üzerine etkilerini incelemek amacıyla % 0.5, % 1, ve % 1.5 oranlarında köpürtücü madde (TiH_2) ilave edilmiştir.

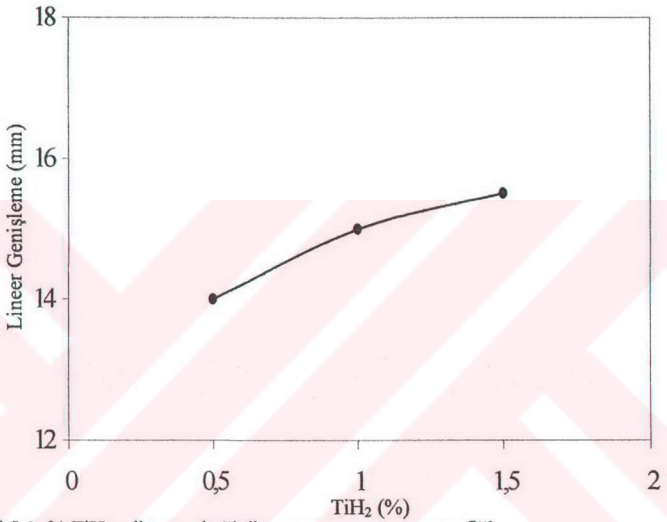
Karışım presleme ve deforme işleminden sonra mufle fırın içerisine yerleştirilmiş, fırın içerisinde sıcaklığın 680 °C çıkartılmasıyla TiH_2'ün ayrışıp H_2 gazına dönüşmesi sağlanmıştır. TiH_2'ün ayrışmasıyla oluşan H_2 gazı kabarcık şeklinde serbest kalmış ve ısının etkisi ile matris malzemenin sıkıştırma yönünde lineer genişlemesine sebep olmuştur.

5.1.1. Köpürtücü madde miktarının lineer genişlemeye etkisi

Köpürtücü madde miktarının lineer genişlemeye etkisini incelemek amacıyla yapılan deneylerde 10 dak. köpürtme süresinde, % 0.5, % 1 ve % 1.5 TiH_2 ilavesinin numunelerin sıkıştırma yönünde yaklaşık % 200 oranında genişlemeye sebep olduğu görülmüştür. Yapılan ölçümler, ilave edilen %0.5 TiH_2 toz miktarı, numunenin sıkıştırma yönüne dik olan 25 mm'lik boyutuna herhangi bir etki etmediği, sıkıştırma yönünde 5 mm yüksekliği ise 14 mm'ye çıkarttığı görülmüştür. % 1 TiH_2 ilavesi, aynı ebattaki numunelerin sıkıştırma yönüne dik boyuta etki etmemiş ancak sıkıştırma yönünde ise 15 mm'ye yükseltmiştir. Aynı şekilde % 1.5 TiH_2 ilavesi aynı ebattaki numunelerin sıkıştırma yönüne dik boyuta etki etmemiş, sıkıştırma yönünde ise 15.5 mm'ye yükselttiği görülmüştür.

Şekil 5.1'de alüminyum içerisine ilave edilen TiH_2 toz miktarı ile lineer genişleme arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir. Lineer genişleme oranlarını karşılaştırdığımızda % 0,5 TiH_2 ilavesinde, açığa çıkan hidrojen gazı miktarı daha az olacağından buna bağlı olarak lineer genişleme oranı daha az olmuştur. % 1 TiH_2 ilave edildiğinde açığa çıkan hidrojen gazı miktarı daha fazla olacağından lineer genişleme oranı fazla olmuştur. Lineer genişleme oranı sadece köpürtücü madde miktarına bağlı olmayıp aynı zamanda ergiyik viskozitesine ve yüzeyden ayrılan köpürtücü madde miktarına bağlıdır (9, 25, 28). Dolayısıyla % 1,5 TiH_2 ilavesi

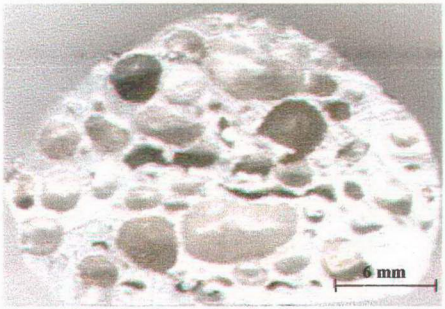
sonucunda elde edilen lineer genişleme oranı % 1 TiH_2 ilave edilerek elde edilen lineer genişleme oranına yakın olmuştur. Benzer şekilde ilave edilen TiH_2 toz miktarı oranı arttıkça lineer genişleme oranının arttığı literatürde de (5, 25, 53) verilmektedir.



Şekil 5.1. % TiH_2 miktarına bağlı lineer genişleme oranı grafiği.

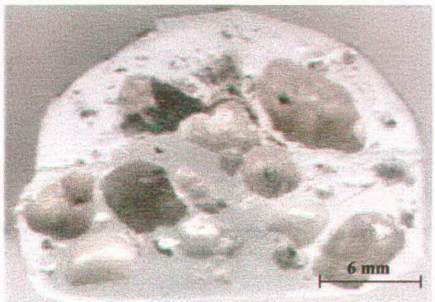
5.1.2. Köpürtücü madde miktarının gözenek yapısına etkisi

Alüminyum içerisine ilave edilen TiH_2 toz miktarının dolayısı ile serbest kalan H_2 gazı miktarı artışının gözenekliliğin artışına sebep olduğu Resim 5.1, Resim 5.2. ve Resim 5.3.'de gösterilmiştir. Köpük üretiminde ilave edilen TiH_2 miktarına bağlı olarak, gözenek yapısının değiştiği görülmüştür. %0.5 TiH_2 toz miktarına sahip numunede gözeneklerin küresel ve düzgün geometrik şekillerde oluştuğu, %1 TiH_2 gözeneklerin daha düzensiz geometrik şekilli ve küresel olmadığı, %1.5 TiH_2 miktarında ise gözeneklerin genellikle birleştikleri ve düzensiz şekillerde olduğu gözlenmiştir.



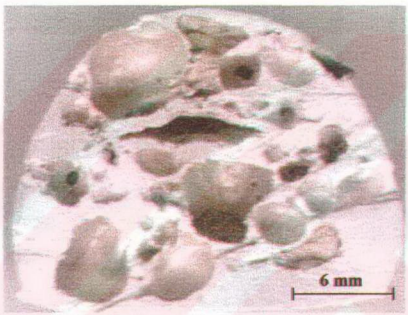
Resim 5.1. %0.5 TiH_2 ilave edilerek elde edilen metalik köpük.

Resim 5.1.'deki gözenek yapılarını incelediğimizde, %0.5 TiH_2 ilave edilerek elde edilen alüminyum köpükte gözenek ebatlarının küçük ve gözenek dağılımının homojen olduğu görülmüştür. Bununla birlikte numunenin her tarafında bir birine yakın ölçü ebatlarına sahip gözeneklerin oluştuğu tespit edilmiştir. Fakat, numune ortalarında soğuma hızının yavaş olmasından dolayı, bu bölgede oluşan gözeneklerin ebatlarının daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Gözenekler arasındaki duvar kalınlıkları yaklaşık olarak eşit ölçülerde oluşmuştur. Gözenek şekilleri genellikle küresel yapıya sahiptir. Numuneye ait resimde farklı renkler görülmektedir. Bunun sebebi kesme çizgisinin gözeneklerin farklı bölgelere rastlamasından kaynaklanmaktadır. Kesme hattı bazı gözeneklerin uç kısmına rastladığı için gözenek derinliği fazla olan bölgeler resim üzerinde siyah olarak görülmektedir. Bazı gözeneklerde ise kesme hattı gözeneklerin orta kısımlarına rastladığı için gözenek derinliği az olan bölgeler resim üzerinde açık renkte görülmüştür.



Resim 5.2. %1 TiH_2 ilave edilerek elde edilen metalik köpük

%1 TiH_2 tozu ihtiva eden numunede oluşan gözeneklerin gözle görülür bir şekilde büyük olduğu tespit edilmiştir (Resim 5.2). Gözenekler homojen bir dağılım sergilemiştir. Ancak burada, küçük gözeneklerin büyük gözeneklerle birleşme eğilimi gösterdiği görülmüştür. Numunenin her tarafında gözenekler oluşmuş ancak oluşan bu gözenekler çok farklı boyutlarda oluşmuştur. Özellikle numunenin yüzeyine yakın bölgelerde geniş bir hatta hemen hemen hiç gözenek oluşmadığı, numune merkezinde ve alt bölgelerde ise iri ve düzensiz şekilli gözeneklerin oluştuğu tespit edilmiştir. Gözenek duvar kalınlıkları farklılık gösterdiği ve oluşan gözeneklerin düzensiz şekilli oldukları dikkat çekmektedir.



Resim 5.3. %1,5 TiH_2 ilave edilerek elde edilen metalik köpük.

Resim 5.3.'de %1,5 TiH_2 tozu ihtiva eden numunede gözenek yapısı görülmektedir. Bu numunede köpürtücü madde miktarının fazla olmasından dolayı serbest kalan H_2 gazı miktarı da dolayısıyla gözenek ebatları daha büyük olmuştur. Gözeneklerin homojen bir şekilde ve farklı ebatlarda oldukları belirlenmiştir. Numunenin özellikle üst kısmında gözeneklerin birleştikleri gözenek şekli ve büyüklüğünden oldukça açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca bu numunede gözeneklerin yüzeyden dışarı çıkma eğiliminde oldukları tespit edilmiştir. Bu numunelerde de gözenek duvar kalınlıkları farklılık gösterdiği ve düzensiz şekillerde oluştuğu dikkat çekmektedir. Oluşan gözenek miktarı ve yapısı %1 oranında TiH_2 ihtiva eden numuneye benzemektedir.

Yapılan çalışmalarda 680 °C, %50 deformasyon miktarı ve 10 dak. köpürtme süresi kullanılarak üretilen alüminyum köpük için %1 ve %1,5 TiH_2 ilavesinin uygun olmadığı tespit edilmiştir. Bu iki numunede yapı içerisinde gözenekler homojen

dağılım sergilemiş, ancak gözenekler bölgesel olarak ve farklı büyüklüklerde oluşmuştur. Oluşan bu gözenekler çok düzensiz geometrik şekillere sahiptir. %0.5 TiH_2 ilave edilerek üretilen alüminyum köpükte ise gözenek yapıları daha düzgün, ve daha homojen dağılım sağlanmıştır. Buna bağlı olarak daha ince hücre duvarı kalınlığı elde edilmiştir. Yang ve arkadaşları (5) tarafından yapılan çalışmada, köpürtücü madde miktarı olarak % 0,5, % 1 ve % 1,5 oranları, köpürtme sıcaklığı olarak da 630 °C seçilmiştir. Yapılan bu çalışma sonunda %0,5 TiH_2 miktarının köpükte yapısal düzensizliklere ve katı alüminyum fazı oluşumuna neden olduğu için yetersiz olduğu belirtilmiştir. % 1 ve % 1,5 oranındaki TiH_2 ilavesinin küresel gözenek dağılımına ve yüksek gözeneklilik miktarına neden olduğu görülmüştür. Dolayısıyla bu oranların daha uygun olduğu belirtilmiştir. 630 °C sıcaklıkta elde edilen alüminyum köpüklerin gözenek yapılarıyla 680 °C köpürtme sıcaklığında elde edilen alüminyum köpüklerin gözenek yapıları karşılaştırıldığında benzer olmadığı görülmüştür. Bunun sebebinin ise ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda gözenek oluşumunun daha zor olduğu bilinmektedir (19).

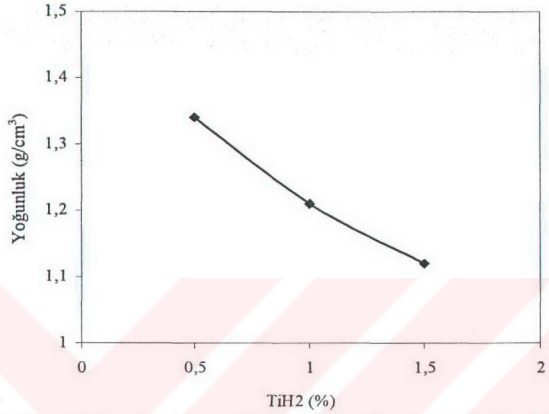
5.1.3. Köpürtücü madde miktarının Al köpük yoğunluğuna etkisi

Deneysel çalışma sonucunda Eşitlik 5.1'e göre yapılan yoğunluk hesabında, artan köpürtücü madde miktarıyla yoğunluğun azaldığı tespit edilmiştir. Bunun sebebinin TiH_2 miktarının artmasına bağlı olarak meydana gelen gözenek miktarı ve gözenek hacmindeki artış olduğu düşünülmektedir. Yoğunluk hesabı eşitlik 5.1. de verilen Arşimet prensibi esasına göre yapılmıştır (41).

$$d = \frac{m}{V_y - V_s} \qquad [5.1.]$$

Bu eşitlikte, d yoğunluk, m ağırlık, V_y yaş ağırlık, V_s ise su içerisindeki ağırlığı ifade etmektedir. Köpürtücü madde miktarına bağlı yoğunluk değişimi Şekil 5.2'deki grafikte verilmiştir. Grafiği incelediğimizde köpürtücü madde miktarı oranı arttıkça malzemenin yoğunluğunda önemli oranda düşüş olduğu görülmektedir. Aslında köpürtücü madde miktarının artışı ile çok daha düşük yoğunlukta numune elde etmek mümkündür. Ancak yüzeye yakın yerlerdeki gözeneklerin yüzeyden dışarı çıkmak

suretiyle azalmasından dolayı yoğunluk gerçek değerinden daha yüksek çıkmıştır. Bu durum literatürde de (9,25) desteklenmiştir.



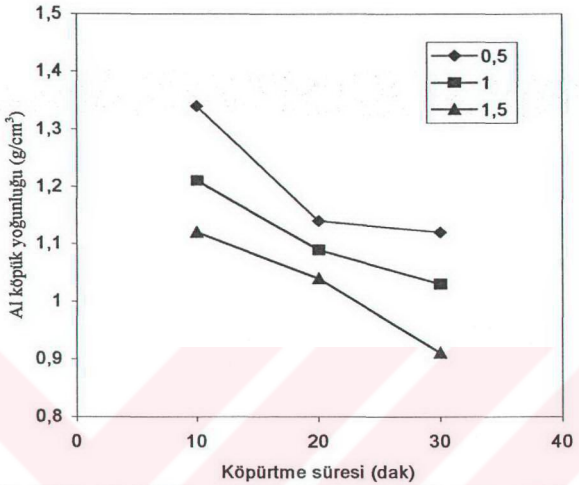
Şekil 5.2. Al matris içerisine ilave edilen % TiH_2 miktarına bağlı olarak blok numunelerde yoğunluk değişimi.

Ayrıca sıkıştırma basıncı 300 MPa, köpürtme sıcaklığı 680 ^{0}C ve deformasyon miktarı sabit tutulup (% 50), malzemelerin yoğunluklarında meydana gelen değişimleri incelemek amacıyla köpükleştirme süresi 20 ve 30 dakikaya çıkartılmış ve blok numunelerin yoğunlukları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1 de verilmiştir. Köpürtme süresinin 20 dakika sabit tutulmasıyla üretilen alüminyum köpüğün yoğunluğundaki azalma, 10 dakika köpürtme süresi kullanılarak üretilen alüminyum köpüğün yoğunluğundaki azalma ile benzer olduğu görülmüştür. Aynı durum 30 dakika köpürtme süresi kullanılarak üretilen alüminyum köpükte de görülmüştür.

Çizelge 5.1. Köpürtme süresine bağlı olarak yoğunluk değişimi

TiH_2 (%)	0,5			1			1,5		
Köpürtme süresi (dk)	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Al köpük yoğunluğu (g/cm^3)	1,34	1,14	1,12	1,21	1,09	1,03	1,12	1,04	0,91

Hesaplanan yoğunluk hesapları sonucunda elde edilen grafik Şekil 5.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Farklı köpürtücü madde miktarlarına sahip numunelerin, köpürtme süresine bağlı olarak elde edilen yoğunlukları.

Deneysel çalışma sonucunda sıkıştırma basıncı, köpürtme sıcaklığı, deformasyon miktarı ve köpürtme süresi sabit tutulup, köpürtücü madde miktarının değiştirilmesinin gözenek miktarına ve gözenek yapısına etki ettiği görülmüştür. Ayrıca köpürtücü madde miktarının artmasıyla yoğunluğun azaldığı ve lineer genişlemeye etkisinin ise daha düşük olduğu görülmüştür.

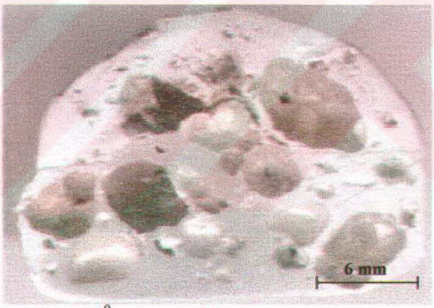
5.2. Sıcaklığın Al Köpük Üretimine Etkisi

Sıcaklığın Al köpük üretimine etkilerini incelemek amacıyla yapılan deneysel çalışmada literatürden (5,9,19,25) yararlanılarak alüminyumun ergime sıcaklığının üzerinde (680 ^{0}C ve 700 ^{0}C olmak üzere) iki farklı sıcaklık seçilmiştir. Deney çalışmada köpürtücü madde miktarı %1 ve köpürtme süresi 10 dakika. olarak seçilmiştir.

5.2.1. Sıcaklığın gözenek yapısına etkisi

680 ^{0}C ve 700 ^{0}C sıcaklıkta yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen gözenek yapısı Resim 5.4. ve Resim 5.5. de gösterilmiştir. Metal matrisin köpürtme sıcaklığı arttıkça metalin direnci azalmakta ve gözenekler, içerdeki hidrojen basıncının malzeme direncinin üzerine çıkmasıyla büyümektedir (50, 51).

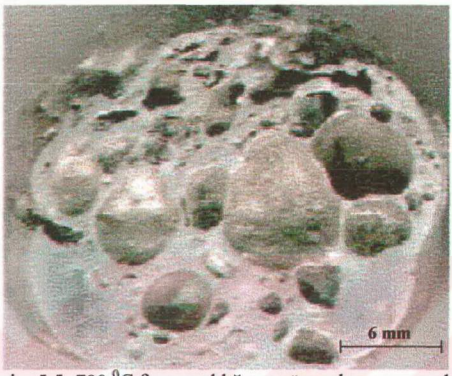
Resim 5.4.'de 680 ^{0}C sıcaklıkta elde edilen alüminyum köpüğün gözenek yapısı gösterilmiştir. Resim incelendiğinde, oluşan gözeneklerin homojen denilebilecek bir dağılım sergilediği görülmüştür. Ancak burada, küçük gözeneklerin büyük gözeneklerle birleşme eğilimi gösterdiği dikkat çekmektedir. Numunenin her tarafında gözenekler oluşmuş ancak oluşan bu gözenekler çok farklı ebatlarda büyümüşlerdir. Gözenek duvar kalınlıkları da farklılık göstermektedir. Oluşan gözenekler genellikle düzensiz şekillerde oluşmuştur.



Resim 5.4. 680 ^{0}C fırın sıcaklığının gözenek yapısına etkisi

700 ^{0}C köpürtme sıcaklığı kullanılarak yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen alüminyum köpüğün gözenek yapısı Resim 5.5.'de gösterilmiştir. Elde edilen alüminyum köpükte oluşan gözeneklerin 680 ^{0}C'de elde edilen gözeneklerden daha büyük olduğu görülmüştür. Gözenekler homojen olarak dağılmış fakat numunenin üst kısmında gözenek yoğunluğu artmıştır. Bununla birlikte bu kısımda oluşan gözeneklerin genelde düzensiz şekilli ve zaman zaman çatlak görünümünde olduğu tespit edilmiştir. Numunenin orta kısımda oluşan gözenekler ise daha düzgün şekilli oldukları görülmüştür. Gözenek duvarları orta kısımlarda daha belirgin, üst

kısımlarda ise belirgin değildir. Alt kısımlarda daha az sayıda gözenek oluşmuş ve bu gözenek ebatları daha küçüktür.



Resim 5.5. 700 ^{0}C fırın sıcaklığının gözenek yapısına etkisi

Resim 5.4. ve Resim 5.5.'deki gözenek yapıları karşılaştırıldığında gözenek yapısının sıcaklık artışıyla arttığı görülmüştür. Sıcaklığın 680 ^{0}C den 700 ^{0}C ye çıkartılması, numunede köpürmenin ve buna bağlı olarak genişlemesinin daha erken başlamasına sebep olmuştur. Yüksek sıcaklık, fırın içerisinde bulunan numunenin sıcaklığını arttırmakta ve ergiyik metalin viskozitesini azaltmaktadır (19). Viskozitenin azalmasıyla gözenek üzerine etki eden drenaj etkisi azalacağından, gözenek içerisindeki hidrojen gazının basıncı, numune direncinden fazla olmakta ve gözenekler daha kolay büyümektedir (5, 19). Bu nedenle 700 ^{0}C sıcaklıkta üretilen alüminyum köpüğün gözenek yapısı daha büyük oluşmuştur. 680 ^{0}C sıcaklıkta gözenek üzerine etki eden drenaj etkisi daha fazla olduğundan gözenek yapısı daha küçük olmuştur. Burada 700 ^{0}C deki H_2 gazının hacminin 680 ^{0}C deki gazın hacmine göre daha büyük olacağını da dikkate almak gerekir. Ayrıca 700 ^{0}C fırın sıcaklığı ve 10 dakika köpürtme zamanı kullanılarak üretilen alüminyum köpükteki gözenek sayısının ve ebadının, 680 ^{0}C fırın sıcaklığı ve 10 dakika köpürtme zamanı kullanılarak elde edilen alüminyum köpükteki gözenek sayısından ve ebadından daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen bu değerlerin yapılan diğer çalışmalarla da uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir (5,9,19). Yang ve arkadaşları (5) tarafından yapılan çalışmada alüminyumun ergime sıcaklığı altında olan 620 ^{0}C ve 660 ^{0}C sıcaklıkları kullanılmıştır. 620 ^{0}C sıcaklıkta küçük ebatlarda ve homojen dağılımlı olmayan gözeneklerin oluştuğu, 660 ^{0}C sıcaklıkta ise daha büyük ebatlarda ve daha homojen dağılımlı gözenelerin oluştuğu tespit edilmiştir. Yapılan benzer bir çalışmada (9) 750 ^{0}C ve 850 ^{0}C köpürtme sıcaklığı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda artan sıcaklıkla gözenek ebatlarının arttığı ve köpürtme süresinin azaldığı sonucu bulunmuştur.

5.2.2. Sıcaklığın lineer genişlemeye etkisi

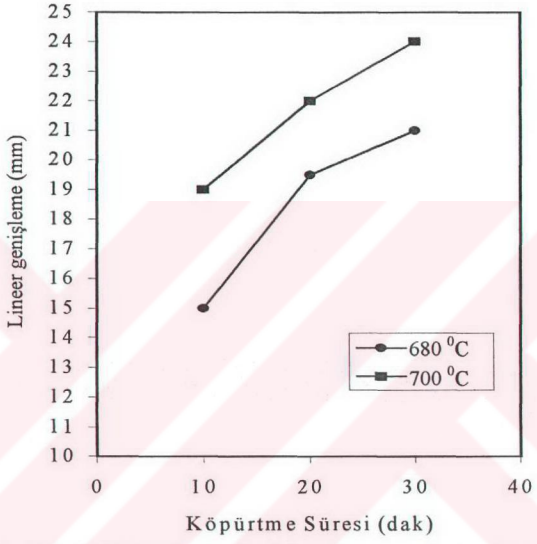
Farklı köpürtme sıcaklıkları, numunelerin ısınma oranlarına farklı şekilde etki ettiğinden köpürtme işlemi de farklı olmaktadır. Numune sıcaklığı matris malzemenin ergime sıcaklığının altında olması durumunda burada genişleme hemen hemen hiç gerçekleşemez (18 ,44, 51). Bunun sebebi katı durumda Al matris içerisinde atomlar arası çekme kuvvetinin, oluşan gaz basıncından daha büyük olması nedeniyle, gazın oluşturduğu köpüğün Al matris içerisinde büyümesine kafi gelmemektedir. Artan fırın sıcaklığı, numunenin viskozitesini azaltmanın yanı sıra hacimce genişlemeye de sebep olmaktadır. Çizelge 5.2. de alüminyum köpük üretim işleminde sıcaklığın lineer genişleme üzerine etkisi gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Sıcaklığın lineer genişleme üzerine etkisi

Fırın sıcaklığı (^{0}C)	680			700		
Köpürtme süresi (dak.)	10	20	30	10	20	30
Lineer genişleme (mm)	15	19,5	21	19	22	24

Çizelge 5.2. de gösterildiği gibi 680 – 700 ^{0}C fırın sıcaklıklarında ve 10 dakika köpürtme süresinde lineer genişleme oranı fazla olmuştur. Köpürtme süresi arttıkça bu oranın azaldığı görülmüştür. Lineer genişleme oranının azalmasıyla beraber gözenek ölçülerinde makro düzeyde artış görülmüştür. Burada numunenin köpürtme işlemi öncesi sıkıştırma yönünde yüksekliği 5 mm, sıkıştırma yönüne dik ölçü ise

25 mm olarak alınmıştır. Köpürtme işlemi sonucunda sıkıştırma yönünde genişleme görülmüş, sıkıştırma yönüne dik yönde ise değişme olmadığı görülmüştür. Sıcaklık değişimi ile meydana gelen lineer değişim grafiği Şekil 5.4.de verilmiştir.

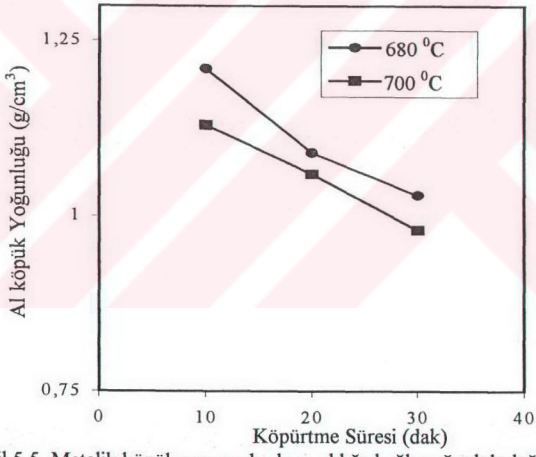


Şekil 5.4. Sıcaklık değişimine bağlı olarak köpük numunede meydana gelen lineer değişim

Düşük fırın sıcaklıklarında H_2 gaz basıncı, numunelerin ısınma oranları ve malzeme direnci düşük olacağından lineer genişleme oranı da düşük olur. Dolayısı ile köpürme miktarı düşer. Sıcaklığın düşük olmasına bağlı olarak köpürme miktarının düşmesinin sebeplerinden biri de, köpürme sırasında köpürtücü maddenin (TiH_2) ayrışma hızının yavaş olması ve bu ayrışma esnasında hidrojen gazı kaybının olmasıdır. Yapılan bazı çalışmalarda (9) belli bir sıcaklıkta yüksek lineer genişleme elde edilmiştir. Bu sıcaklık değeri üzerindeki sıcaklıklarda lineer genişlemenin etkilenmediği, köpürme süresinin ve lineer genişleme zamanının azaldığı tespit edilmiştir.

5.2.3. Sıcaklığın yoğunluk üzerine etkisi

Yüksek fırın sıcaklıklarında oluşan hacimce genişlemeye bağlı olarak değişen Al köpük yoğunluk miktarı Şekil 5.5. de gösterilmiştir. 700 ^{0}C sıcaklıkta alüminyum köpüğün lineer genişlemesi köpüğün hacminin genişlemesine sebep olmuştur. Eşitlik 5.1. de görüldüğü üzere, hacimce artış yoğunluğun düşmesine sebep olacaktır. Bu nedenle yüksek sıcaklıkta yoğunluk düşüşü görülmüştür. Bu iki sıcaklıkta farklı köpürtme süreleri kullanılarak yapılan köpürtme işleminde yoğunluk ölçümü yapılmış ve aynı köpürtme sürelerinde de yüksek sıcaklıkta yoğunluğun düştüğü görülmüştür.



Şekil 5.5. Metalik köpük numunelerde sıcaklığa bağlı yoğunluk değişim grafiği.

Şekil 5.5.'de görüldüğü gibi 680 ^{o}C köpürtme sıcaklığında ve 10 dak. köpürtme süresinde elde edilen yoğunluk, 700 ^{0}C köpürtme sıcaklığı ve 10 dak. köpürtme süresinde elde edilen yoğunluktan fazladır. Köpürtme süresinin 20 dakikaya çıkartılmasıyla, 680 ^{o}C köpürtme sıcaklığında elde edilen alüminyum köpüğün yoğunluğunda önemli miktarda azalma görülmüştür. Yoğunluktaki bu düşüş köpürtme süresinin 30 dakikaya çıkartılmasıyla azalmıştır. 700 ^{0}C köpürtme

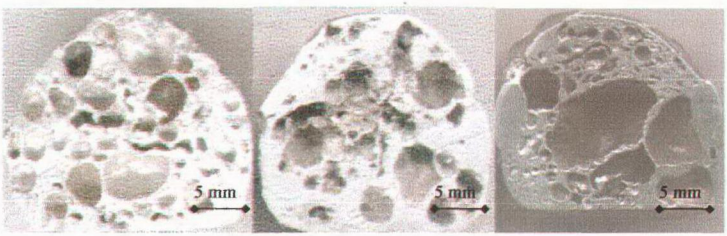
sıcaklığında, köpürtme süresinin artmasıyla yoğunluktaki düşüş oranı daha azdır. Elde edilen bu sonuçlardan ve yapılan diğer çalışmalardan da anlaşılacağı gibi (9,25) köpürtme işleminde hem sıcaklık hem de süre artışı köpük yoğunluğunun azalmasına sebep olmaktadır.

5.3. Köpürtme Süresinin Al Köpük Üretimi Üzerine Etkisi

5.3.1. Köpürtme süresinin gözenek yapısına etkisi

Sıcaklıktan bağımsız olarak, köpürtme süresinin alüminyum köpük üretimi üzerine etkilerini değerlendirmek amacıyla köpürme sıcaklığı 680 ^{0}C tutulmuştur. Çalışılmış olan üç köpürtme süresi sonucu elde edilen alüminyum köpüğün gözenek yapısına etkisi Resim 5.6., Resim 5.7. ve Resim 5.8.'de gösterilmiştir. Ayrıca köpürtücü madde miktarı değiştirilerek elde edilen Al köpüklere sürenin etkisini incelemek amacıyla numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde %0.5-1-1.5 oranlarında köpürtücü madde kullanılmıştır.

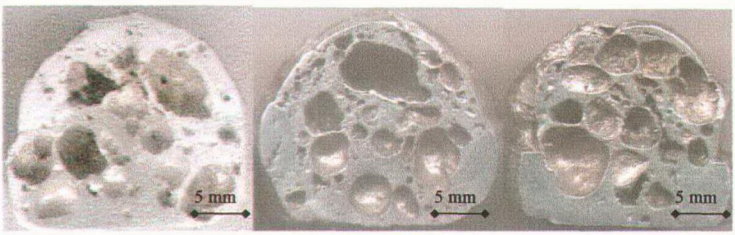
Alüminyum tozuna % 0,5 TiH_2 ilavesi ve 10-20-30 dakika. köpürtme süresi kullanılarak yapılan deneysel çalışmada, 10 dakika köpürtme süresinde gözeneklerin homojen olarak dağıldığı ve gözenek ebatlarının yaklaşık olarak aynı ölçülerde olduğu görülmüştür (Resim 5.6 a). Gözenekler düzgün şekilli ve küresele yakın görünümdedir. Köpürtme süresinin 20 dakikaya çıkartılmasıyla gözeneklerin düzensiz şekillerde ve bölgesel olarak birleştikleri görülmüştür (Resim 5.6 b). Bu köpürtme süresinde gözenekler homojen dağılım sergilemiş fakat gözenek ebatları farklılık göstermiştir. Ayrıca gözenek duvar kalınlığının arttığı ve numune dış cidarında gözenek içermeyen bir bantlı yapı tespit edilmiştir. 30 dakika köpürtme süresinde ise, özellikle numunenin orta kısımlarında gözenek ebatlarının çok daha büyük olduğu görülmüştür (Resim 5.6 c) . Numunenin üst kısımlarında oluşan gözeneklerin, numune yüzeyinde meydana gelen ince tabakayı kıramadığı için küçük ebatlı olduğu tahmin edilmektedir.



a) b) c)

Resim 5.6. %0,5 TiH_2 ilave edilerek elde edilen Al köpüğe sürenin etkisi.
a) 10 dak., b) 20 dak., c)30 dak.

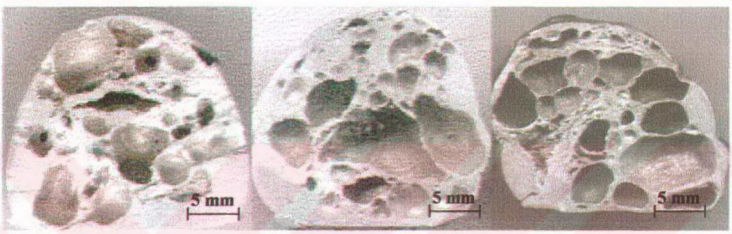
%1 TiH_2 ilavesinde ise köpürtme süresinin artmasıyla gözenek yapılarının daha düzgün şekilde oldukları tespit edilmiştir (Resim 5.7 a,b,c). 10 dakika köpürtme süresinde gözenekler düzensiz şekilli ve bölgesel olarak birleştiği tespit edilmiştir (Resim 5.7 a). 20 dakika köpürtme süresinde gözenekler biraz daha düzgün şekilli ve homojen olarak dağıldığı görülmüştür (Resim 5.7 b). 30 dakika köpürtme süresinde ise gözenek ebatları büyümekle birlikte daha küresel şekilde oluşmuştur (Resim 5.7 c). Köpürtücü madde miktarının artmasına bağlı olarak açığa çıkan hidrojen gazı basıncının, malzeme direncinin üzerine çıkmasıyla gözenekler numune yüzeyinden bölgesel olarak dışarı çıktığı tespit edilmiştir. Oluşan gözenek duvarları daha düzgün şekilde teşekkül etmiştir.



a) b) c)

Resim 5.7. %1 TiH_2 ilave edilerek elde edilen Al köpüğe sürenin etkisi.
a) 10 dak., b) 20 dak., c)30 dak.

% 1.5 köpürtücü madde ilavesinde de köpürtme süresinin artmasıyla gözeneklerin daha da büyüdüğü tespit edilmiştir. Gözenekler homojen olarak dağılmış ve daha düzgün şekildedir (Resim 5.8 a,b,c). Köpürtme süresinin artmasıyla gözenek yapısının ve gözenek boyutlarının arttığı gözlenmiştir. Literatürde (9, 19) bu durum artan köpürtme süresi gözenek ebatlarını arttırdığı şeklinde yorumlanmaktadır.



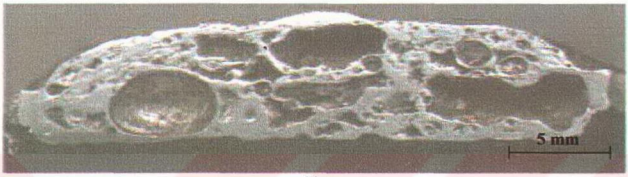
a) b) c)

Resim 5.8. % 1,5 TiH_2 ilave edilerek elde edilen Al köpüğe sürenin etkisi.
a) 10 dak., b) 20 dak., c)30 dak.

Deformasyon miktarı değiştirilerek yapılan deneysel çalışmada, numunelere % 1 TiH_2 ilave edilerek % 75 deforme edilmiş ve 680 ^{0}C'de 10, 20, 30 dakika köpürtme süresine tabi tutulmuşlardır. 10 dakika köpürtme süresi sonunda elde edilen Al köpükte gözeneklerin sıkıştırma yönüne dik ve yönlenmiş olarak oluştuğu ve gözenek ebatlarının küçük olduğu tespit edilmiştir (Resim 5.9 a). 20 dakika köpürtme süresi sonucunda yönlenmiş gözenek yapısının bazı bölgelerde küresel hale dönüştüğü ve gözenek boyutlarında artış olduğu görülmüştür (Resim 5.9 b). 30 dakika köpürtme süresi sonucunda ise gözenek boyutlarının oldukça arttığı ve gözeneklerin daha da küresel hale dönüştüğü görülmüştür (Resim 5.9 c). Bununla birlikte deformasyonun etkisinden dolayı gözeneklerden bazılarının hala yönlenmiş olduğu tespit edilmiştir.



a)



b)

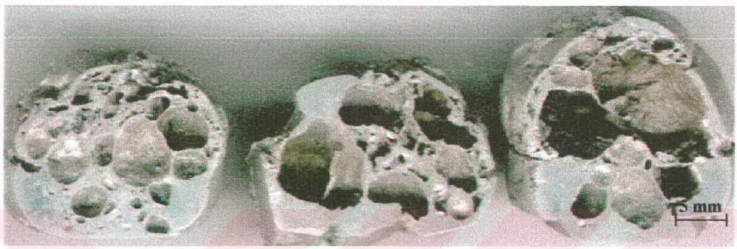


c)

Resim 5.9. % 75 deformasyon miktarına sahip Al köpüğe sürenin etkisi
a) 10 dak., b) 20 dak., c) 30 dak.

Resim 5.10. da 700 ^{0}C sıcaklıkta elde edilen alüminyum köpüğe, köpürtme süresinin etkisi gösterilmiştir. Deneysel işlem sırasında deformasyon miktarı (%50) ve köpürtücü madde miktarı (%1) sabit, köpürtme süresi ise 10, 20 ve 30 dakika olarak seçilmiştir.10 dakika köpürtme süresinde oluşan gözeneklerin küçük ve homojen denilebilecek bir dağılıma sahip olduğu, yüzeye doğru küçük gözeneklerin, merkez ve alt kısımda daha iri ve küresele yakın gözeneklerin oluştuğu tespit edilmiştir. 20 dakika köpürtme süresinde gözeneklerin büyüdüğü, düzensiz şekil aldığı ve küçük gözeneklerin çoğunun kaybolduğu görülmüştür. 30 dakika köpürtme süresinde gözenek duvarlarında yırtılma meydana gelerek daha önce büyümüş olan gözeneklerin daha da büyüyerek birbirleriyle birleşmeye başladıkları tespit edilmiştir. Çok az miktarda küçük gözeneklerin genelde üst kısımda yoğunlaştığı görülmüştür. 700 ^{0}C'nin malzeme ergime derecesinin çok üzerinde olması nedeni ile

oluşan köpükler kolaylıkla bir araya gelerek gözeneklerin büyümesine sebep olmaktadır. Bu nedenle bu şartlarda 10 dakika gibi kısa köpürtme süresinde bekletmek gereklidir.

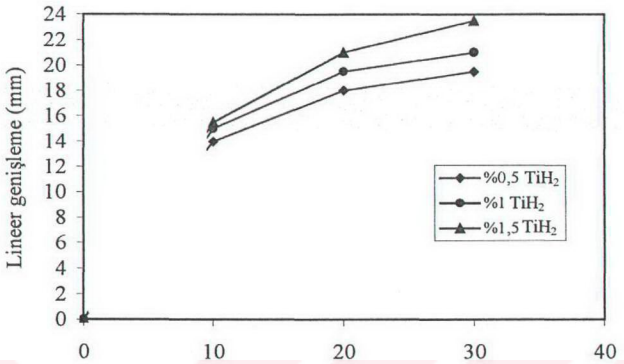


a) b) c)

Resim 5.10. 700 ^{0}C sıcaklıkta elde edilen Al köpüğe sürenin etkisi
a) 10 dak.., b) 20 dak.., c) 30 dak..

5.3.2. Köpürtme süresinin lineer genişlemeye etkisi

Şekil 5.6. de köpürtme süresinin Al numunelerin lineer genişlemeye etkisini gösteren grafik verilmiştir. 10 dakika köpürtme süresinde meydana gelen lineer genişleme oranında büyük bir artış görülmüştür. Köpürtme süresinin artmasıyla beraber küçük gözenekler birleşerek büyük gözenekler haline gelirken, diğer taraftan numunelerin presleme yönündeki lineer genişlemeye çok fazla etki etmiştir (9). Bununla birlikte 20 dakika köpürtme süresinde lineer genişleme oranında azalma görülmüştür. Köpürtme süresinin 30 dakikaya çıkartılmasıyla bu oran daha da azalmıştır. Köpürtme süresinin lineer genişleme oranına etkisinin köpürtücü madde miktarına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. % 0,5 TiH_2 ve % 1 TiH_2 ilave edilerek elde edilen alüminyum köpükte lineer genişleme oranı birbirine yakınken, bu oran % 1,5 TiH_2 ilave edilerek elde edilen alüminyum köpükte artmıştır.



Şekil 5.6. Köpürtme süresine bağlı lineer genişleme grafiği.

5.3.3. Köpürtme süresinin yoğunluğa etkisi

Köpürtme süresine bağlı olarak büyüyen gözenek yapısından kaynaklanan lineer genişlemeyle beraber hacim artacağından yoğunluk da azalmıştır. Bu yoğunluk azalması Şekil 5.3.'de gösterilmiştir. 10 dakika köpürtme zamanı için gözenek ebatları küçük olduğu için numune hacmi fazla ve yoğunluğu da yüksektir. 20 ve 30 dakika köpürtme zamanında lineer genişlemenin fazla olmasıyla görülen hacim artışı bu numunelerde yoğunlukta düşüşe sebep olmuştur. % 0,5 ve % 1 TiH_2 ihtiva eden numunelerde düşük köpürtme sürelerinde yoğunlukta hızlı bir düşüş görülürken uzun sürelerde daha az yoğunluk kaybı görülmüştür. % 1,5 TiH_2 ihtiva eden numunelerde yoğunluk düşüş hızında azalma görülürken sürenin artmasıyla birlikte bu yoğunluk düşüş hızı daha da azalmıştır. % 1,5 TiH_2 ihtiva eden numunelerde ise düşük köpürtme sürelerinde yoğunlukta yavaş bir düşüş görülürken uzun sürelerde hızlı bir yoğunluk düşüşü görülmüştür.

Daha önce yapılan benzer çalışmada (25) 750 ^{0}C ve 775 ^{0}C köpürtme sıcaklıklarında 30 ve 45 dakika köpürtme süreleri kullanılmıştır. Her iki köpürtme sıcaklıklarında artan köpürtme süresinin yoğunluğu azalttığı belirtilmiştir.

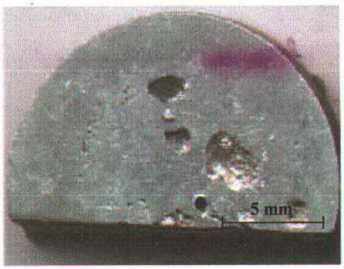
5.4. Deformasyon Miktarının Al Köpük Üretimi Üzerine Etkileri

Deformasyon miktarının Al köpük üzerine etkilerini incelemek amacıyla deforme edilmemiş ve % 25-50-75 oranlarında deforme edilmiş numuneler hazırlanmıştır. Deneysel çalışma esnasında köpürtücü miktarı (% 1 TiH_2), köpürtme sıcaklığı (680^{0}C) ve köpürtme süresi (10-20-30 dakika) sabit tutulmuştur. Yalnız deforme edilmeden hazırlanan numunelerle yapılan deneylerde 10 ve 20 dakika köpürtme sürelerinde gözenek oluşmadığı görüldüğü için bu numunelerde köpürtme sıcaklığı 30-60-120 dakika olarak alınmıştır.

5.4.1. Deformasyon miktarının gözenek yapısına etkisi

Deforme edilmeden hazırlanan numuneden elde edilen Al köpükte, gözeneklerin 30 dakika köpürtme süresi sonucu oluştuğu tespit edilmiştir. Oluşan gözeneklerin oldukça az ve çok küçük boyutlarda oldukları dikkat çekmektedir (Resim 5.11 a). 60 dakika köpürtme süresi sonucunda gözenek miktarının daha fazla ve ölçülerinin daha büyük olduğu ve genelde numune yüzeylerine yakın bölgelerde oluşmadığı tespit edilmiştir.

(Resim 5.11 b). 120 dakika köpürtme süresi sonucunda ise gözeneklerin büyüyerek birbirleri ile birleşmeye başladıkları dikkat çekmektedir (Resim 5.11 c). Ancak daha kısa sürelerde oluşturulan numunelere benzer şekilde gözeneklerin yüzeye yakın bölgelerde oluşmadığı, gözenek içermeyen bir duvar şeklindeki blok yapının altında oluştuğu görülmektedir. Gözeneklerin birleşerek büyük gözenekleri oluşturduğu tespit edilmiştir.



a)



b)



c)

Resim 5.11. 680 ^{0}C köpürtme sıcaklığında deforme edilmeden hazırlanan numunelerden elde edilen Al köpük resimleri. Köpürtme süreleri a) 30 dak., b) 60 dak., c) 120 dak.

Deformasyon miktarının gözenek yapısına etkisini incelemek amacıyla yapılan deformasyon işlemi sonucunda numuneler 30 dakika süre ile köpürme işlemine tabi tutulmuştur. Sürenin 30 dakika olarak belirlenmesinin sebebi; daha önceki Bölüm 5.3.'de "Köpürme Süresinin Al Köpük Üretimi Üzerine Etkileri" konusunda da bahsedildiği gibi köpürtme süresinin arttırıldığı malzemelerde oluşan gözeneklerin oldukça büyük olduğu, daha düşük tutulduğunda ise gözenek ebatlarının henüz ideal boyutlara gelmediğinin görülmüş olmasındandır. Farklı deformasyon miktarları kullanılarak elde edilen Al köpük numunelerde gözenek yapısı karşılaştırılmıştır.

Deforme edilmeden elde edilen Al köpük de gözeneklerin oldukça karmaşık şekilli oldukları görülmüştür. Gözenek duvarları kaybolmuş ve gözeneklerin birbirleri ile birleşmiş oldukları tespit edilmiştir (Resim 5.11 a). Ayrıca bu numunenin yüzeyinde daha kalın bir tabaka oluşmuştur.

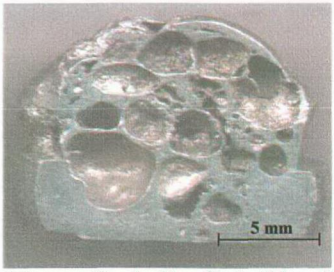
Aynı şartlarda hazırlanan numune % 25 deforme edildiğinde gözeneklerin daha homojen olduğu ve farklı geometrik şekillere sahip oldukları, gözenekleri birbirlerine bağlayan hücre duvarlarının ince olduğu görülmüştür (Resim 5.12). Numunenin üst kısmında biraz daha ince tabaka oluşmuştur.



Resim 5.12. % 25 deforme edilerek elde edilmiş Al köpüğün gözenek yapısı.

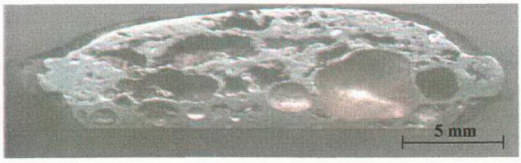
Resim 5.13.'de gösterilmiş olan Al köpük de % 50 deformasyon uygulanmış ve gözenek dağılımının homojen bir şekilde olduğu, gözeneklerin küresel bir şekilde

oluştuğu gözlenmiş, ayrıca gözenekleri birbirlerinden ayıran hücre duvarının da kalınlığının artmış olduğu görülmüştür.



Resim 5.13. % 50 deforme edilerek elde edilmiş Al köpüğün gözenek yapısı.

% 75 deformasyon miktarı uygulanarak elde edilen Al köpükte ise gözeneklerin sıkıştırma yönüne dik olarak bazı bölgelerde elips şeklinde bazı bölgeler de ise küresele yakın şekilde oldukları, hücre duvarlarının ince kesitli olduğu tespit edilmiştir (Resim 5.14). Bu da % 75 deformasyonun bu numuneler için fazla olduğu anlamına gelmektedir. Çalışmalar, bu malzeme için gerekli iç enerjinin %50 deformasyonla sağlandığını, daha düşük deformasyon miktarlarında numunelerde yeterince homojen gözenek elde edilemediğini daha yüksek deformasyon oranlarında ise yönlenmiş yapının elimine edilemediğini göstermektedir.



Resim 5.14. % 75 deforme edilerek elde edilmiş Al köpüğün gözenek yapısı.

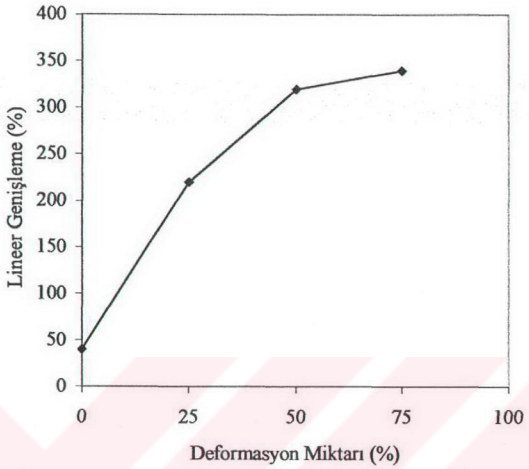
5.4.2. Deformasyon miktarının lineer genişlemeye etkisi

Deformasyonun lineer genişleme üzerine etkilerini incelemek amacıyla 20 mm çapında ve 10 mm yüksekliğinde numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 350 ^{0}C sıcaklığa ısıtılarak % 25, % 50 ve % 75 oranlarında deformasyona tabii tutulmuş ve akabinde 680 ^{0}C köpürtme sıcaklığında köpürtme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deformasyon miktarları, deformasyon öncesi ve deformasyon sonrası boyutlar Çizelge 5.3.'de toplu olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Deformasyon miktarları, deformasyon öncesi ve deformasyon sonrası boyutlar

Deformasyon Miktarı (%)	Deformasyon Öncesi Ölçü (mm)	Deformasyon Sonrası Ölçü (mm)	Köpürtme Sonrası Ölçü (mm)
0	Ø 20x10	Ø 20x10	Ø 20x14
25	Ø 20x10	Ø 23x7,5	Ø 23x24
50	Ø 20x10	Ø 25x5	Ø 25x21
75	Ø 20x10	Ø 33x2,5	Ø 33x11

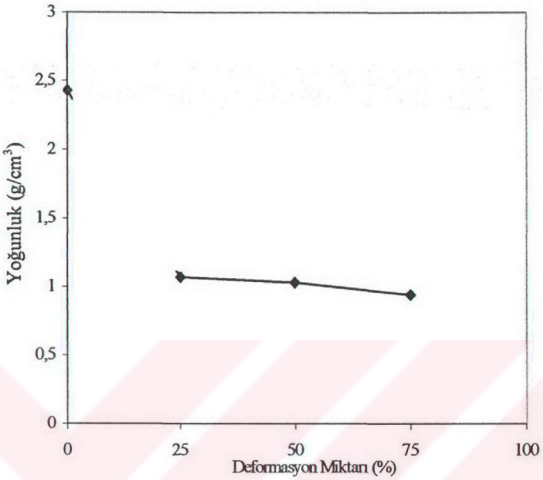
Şekil 5.7.'de deformasyon miktarının lineer genişlemeye etkisi gösterilmiştir. Burada deforme edilmeden elde edilen numunenin ilk ölçüleri sıkıştırma yönüne dik 20 mm sıkıştırma yönünde ise 10 mm iken köpürtme işlemi sonucunda numunenin sıkıştırma yönüne dik ölçüsünde herhangi bir değişme görülmezken sıkıştırma yönündeki yüksekliği 14 mm olarak değişmiştir. % 25-50-75 deformasyon oranlarında elde edilen numunelerde sıkıştırma yönüne dik ölçülerde değişme olmadığı tespit edilmiştir. % 25 oranında deformasyona tabi tutulan numune, köpürtme işlemi sonucunda lineer olarak % 220 genişleyerek 24 mm olurken % 50 deforme edilerek elde edilen numunede ise yaklaşık % 320 genişleme görülmüştür. Aynı şartlarda hazırlanan numune % 75 oranında deforme edildiğinde ise lineer genişlemenin yaklaşık % 340 olarak arttığı görülmüştür. Bu da gösteriyor ki iç enerji miktarına bağlı olarak lineer genişlemede artmaktadır.



Şekil 5.7. 680 ^{0}C köpürtme sıcaklığında deformasyon miktarının lineer genişlemeye etkisi

5.4.3. Deformasyon miktarının yoğunluğa etkisi

Deformasyon miktarının Al köpük üzerine etkisini incelemek amacıyla yapılan deneysel çalışmada 350 ^{0}C ön ısıtma sıcaklığında dört farklı oranda deformasyona tabi tutulmuş numuneler 680^{0}C köpürtme sıcaklığında köpürtülmüş ve yoğunlukları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.8.'de verilen grafikte deformasyon miktarları farklı olan numunelerin yoğunluk değişimi gösterilmiştir. Deforme edilmeden elde edilen Al köpükte hesaplanan yoğunluk 2,43 g/cm^3, % 25 deforme miktarına sahip Al köpüğün yoğunluğu 1,06 g/cm^3, % 50 deforme miktarına sahip Al köpüğün yoğunluğu 1,03 g/cm^3 ve % 75 deforme miktarına sahip Al köpüğün yoğunluğu 0,98 g/cm^3 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla deforme edilmeden elde edilen Al köpüğün yoğunluğunun fazla olduğu, % 25 deformasyon miktarına sahip Al köpüğün lineer genişleme oranının fazla olmasına bağlı olarak yoğunluğunun azaldığı tespit edilmiştir. Deformasyon miktarı % 25-50-75 olan numunelerin yoğunlukları arasında çok küçük farklılıklar olduğu görülmüştür.



Şekil 5.8. Deformasyon miktarına bağlı olarak değişen yoğunluk grafiği.

Yapılan deneysel çalışma sonucu 680 ^{0}C köpürtme sıcaklığında, % 1 TiH_2 köpürtücü madde miktarına sahip, 30 dakika köpürtme süresi için % 50 deformasyon miktarının Al köpük üretimi için uygun olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi bu parametrelerde elde edilen Al köpüğün gözenekleri homojen dağılımlı, lineer genişleme miktarı yüksek, gözenek yapısı küresel ve hücre duvarı kalınlığının yüksek olmasıdır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada toz metalujisi yöntemi ile alüminyum bazlı metalik köpük üretilmiş ve köpürtücü madde miktarı, köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi ve köpürtme işlemi öncesi deformasyon miktarının alüminyum köpük üretimi üzerine etkileri incelenerek aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir.

1. Kullanılan köpürtücü madde miktarı ve köpürtme süresi arttıkça oluşan gözenek ebatları ile lineer genişlemenin arttığı, alüminyum köpüğün yoğunluğunun ise azaldığı görülmüştür.
2. Alüminyum köpük üretiminde lineer genişlemenin presleme yönünde meydana geldiği gözlenmiştir.
3. Sıcaklığın arttıkça köpürtme süresinin dolayısıyla lineer genişleme süresinin azaldığı tespit edilmiştir.
4. Çalışmalar, alüminyum için gerekli iç enerjinin % 50 deformasyon miktarıyla sağlandığını, daha düşük deformasyon miktarlarında numunelerde yeterince homojen gözenek elde edilemediğini, daha yüksek deformasyon oranlarında ise yönlenmiş yapının önlenemediğini göstermektedir.
5. Deformasyon miktarı arttıkça lineer genişleme oranının artığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

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

2. Hanssen A.G., Langseth, M., Happerstad, O.S., "Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler", ***Int. J. of Impact Eng.***, 24 (5): 475-507, (2000).

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

4. Davies, G.J., Zhan, S., "Review metallic foams, their production, properties and applications", ***J. Mat. Sci.***, 18: 1899-1911, (1983).

5. C.C. Yang, H. Nakae, "Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam" ***Journal of Alloys and Compounds***, 313:188-191, (2000).

6. Banhart, J., Weaire, D., "On the road again - metal foams find favor" ***Pyhsics Today,*** 55: 37-42, (2002).

7. Simone, A.E.,Gibson, L.J., "The effects of cell face curvature and corrucations on the stiffness and strength of metalic foam", ***Acta Materialla,*** 46: 3926-3935, (1998).

8. Gradinger, R., Rammerstorfer, F.G., "On the influence of meso-inhomogeneties on the crush worthiness of metal foam", ***Acta Materialla,*** 47: 143-148, (1999).

9. Elbir, S., "Kapalı hücre alüminyum kompozit köpüklerin hazırlanması ve karakterizasyonu", Yüksek Lisans , ***İzmir Teknoloji Enst.***, 12-30, (2001).

10. Davies, G.J., Zhen S., "Metallic Foams: Their production, properties and applications" ***J. Material Sci.*** 18: 1899-1911, (1983).

11. Ma,L., He D., "Cellular Structure Controllable Aluminum Foams Produced By High Pressure Infiltration Process" ***Scripta Materialia*** 41(7): 785–789, (1999).

12. Elliot ,J. C., ***US Pattent***, 2,751,289 (1956).

13. Drolet , J.P., "Metallic Foams" ***International Journal of Powder Metalurgy & Powder Technology*** 13:35-44, (1977).

14. Kulkarni, S.B., Ramakrishnan, P., "Porous and cellular materials for structural applications" ***Int.J. Powder Met.*** 9(1):(1973)

15. Güden, M., Elbir, S., Yılmaz, S., " kompozit alüminyum köpüklerin hazırlanması ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi", ***II. Makine malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu,*** 317-325 (2001)

16. Banhart, J., "Manufacturing Routes for Metallic Foams", ***Journals of Materials*** 52(12):,22-27,(2001).

17. Banhart, J., "Properties and applications for cast aluminium sponges", ***Adv. Eng. Mat.***, 2: 168 (2000)

18. Baumgartner, F., Duarte, I., Banhart, J.,"Industrialization of powder compact foaming process", ***Advanced Eng. Mat.***, 2 (4): 168-174, (2000).

19. Ashold, P., "Metal Foams and Porous Metal Structures", Banhart, J., Ashby M.F., ***MIT-Verlag,*** German,13, (1999)

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

21. Gergely, V., Degischer, H.P., Clyne, T.W., "Recycling of MMCs and production of metallic foams", ***Comprehensive Composite Materials*** 3; 797-820, (2000)

22. Prakash, G.O., Sang, H., Embury, J. D., "Structure and properties of Al-Si foam", ***Mater. Sci. Eng.***, A 199: 195-203, (1995).

23. Curran, D., Gergely, V., Clyne, T.W "Modelling of Material Redistribution During Melt Route Processing of Metallic Foams", ***Symposium on MMCs and MetallicFoams,*** Munich, 51-56, (1999)

24. Karakuş, S., "Al-Cu metalik köpük üretimi", Yüksek Lisans Tezi, ***ODTÜ Fen Bilimleri Enst.*** , 5-27, (1998).

25. Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., Kitahara, A., "Alporas aluminium foam : production, properties and applications", ***Adv. Eng. Mat.***, 2 (4):179-183 (2000)

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

27. L. Ma, Z. Song, "Cellular structure control of aluminium foams during foaming process of aluminium melt", ***Scripta Mater.***, 39;1523-1528, (1998)

ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Erzurum'da doğdu. İlk öğrenimini Erzurum Aliravi İlk Okulu'nda, orta öğrenimini Şair Nef-i Orta Okulu'nda, lise öğrenimini Erzurum Atatürk Teknik Lisesi Makine Bölümü'nde tamamladı. 1996 yılında başlamış olduğu Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitim Bölümü Metal Öğretmenliği Programını 2000 yılında bitirdi. Mezuniyetine müteakip Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Bölümünde yüksek lisansa başladı. 2002 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitim Bölümü Mekanik Metalurji Ana Bilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak başladı ve halen bu görevine devam etmektedir.