

T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AlZn5.5MgCu /SiCp Köpük Malzemelerin

Mekanik Özelliklerine Isıl İşlemin Etkisinin İncelenmesi

İsmail MUTLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Yrd. Doç. Dr. Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN

2011- EDİRNE

T.C.  
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AlZn5.5MgCu /SiCp Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerine  
Isıl İşlemin Etkisinin İncelenmesi

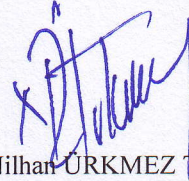
Mak. Müh. İsmail MUTLU

Yüksek Lisans Tezi  
Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN

İkinci Danışman: Yrd. Doç. Dr. Vedat TAŞKIN

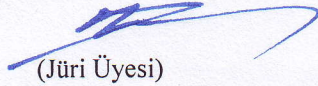
Bu tez 07.01.2011 tarihinde Aşağıdaki Jüri Tarafından Kabul Edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr. Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN

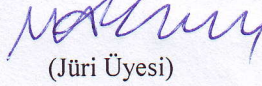
(Danışman)

Prof. Mehmet Emin YURCI



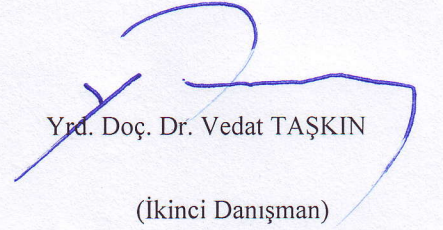
(Jüri Üyesi)

Doç. Dr. Metin AYDOĞDU



(Jüri Üyesi)

Yrd. Doç. Dr. Vedat TAŞKIN



(İkinci Danışman)

**ÖZET****Yüksek Lisans Tezi****AlZn5.5MgCu /SiC<sub>p</sub> Köpük Malzemelerin  
Mekanik Özelliklerine Isıl İşlemin Etkisinin İncelenmesi****İsmail MUTLU****Trakya Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Yrd. Doç. Dr. Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN  
Yardımcı Danışman: Yrd. Doç. Dr. Vedat TAŞKIN****2011, 73 sayfa**

Bu çalışmada, kapalı hücreli 7075 Al köpük ve 7075 Al /SiC<sub>p</sub> köpük malzeme üretimi doğrudan yarı-katı köpürtme yöntemi ile üretilmiştir. Köpürtücü toz olarak TiH<sub>2</sub>, takviye olarak 500 mesh boyutlarında SiC parçacıkları kullanılmıştır. Elde edilen numunelere T6 ısıl işlemi uygulanmış ve basma yükleri altındaki davranışları incelenmiştir. T6 ısıl işlemi uygulanmış kompozit köpük malzemeler ile doğal yaşlandırılmış kompozit köpük malzemeler kıyaslanmıştır. Mikro sertlik ölçümleri yapılarak ısıl işlemin sertlik üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Farklı takviye oranlarına sahip, birbirine yakın yoğunlukta, ısıl işlem uygulanmış kompozit köpük malzemelerin akma ve plato gerilme değerleri artan SiC<sub>p</sub> oranı ile artmıştır. Aynı takviye oranına sahip, ısıl işlem uygulanmış ve ısıl işlem uygulanmamış 7075 Al/SiC<sub>p</sub> köpükler karşılaştırılmış ve ısıl işlemin malzeme dayanımını ve sertliğini arttırdığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum, SiC, kompozit metal köpük, 7075, Isıl işlem

**ABSTRACT****Master of Science Thesis****Investigation of The Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of  
AlZn5.5MgCu/SiC<sub>p</sub> Composite Foam Materials****İsmail MUTLU****Trakya University  
Graduate School of Sciences  
Mechanical Engineering Program****Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN  
Assist Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Vedat TAŞKIN****2011, 73 pages**

In this study, it was achieved that closed cell 7075 Al foam and 7075 Al /SiC<sub>p</sub> composite foam is produced by directly foaming at semi solid temperatures. TiH<sub>2</sub> powder was used as blowing agent. T6 heat treatment was applied to aluminum foam samples and behaviors under compressive loads are investigated. Heat treatment samples of composite and metal foams were compared with samples of natural aged composite and metal foams. Also effect of heat treatment on micro hardness was investigated. With increasing fraction of reinforcement, yield and plateau stress of foam with same density of heat treated and natural aged samples were increased. It was observed that heat treatment and increasing reinforcement ratio were provided to prevent mergers and collapse of cell walls. Comparing with heat treatment and natural aged samples of foam with same reinforcement ratio, it was seen that strength and hardness of material is positively affected with heat treatment.

**Keywords :** Composite metal foam, SiC, aluminum, 7075, heat treatment

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, son zamanlarda üzerinde oldukça fazla araştırma yapılan ve sektörel olarak çok geniş bir yelpazede kullanım alanı bulunan kompozit metal köpüklerin sürekli formda üretimi için bir yöntem ve düzenek geliştirmeyi amaçlayan 108M325 numaralı TÜBİTAK 1001 projesinin bir bölümünü oluşturmaktadır.

Çalışmada, 7075 alaşımından alüminyum köpük üretimi doğrudan yarı-katı üretim yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş, üretim parametreleri ve ısıl işlemin malzemenin mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmanın hazırlanması esnasında, yardım ve desteklerini esirgemeyen, deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve yorumlanmasında emeği geçen ve deneysel çalışmayı sevdiiren danışman hocam Trakya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç.Dr. Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN'a, yol göstericiliği ile hepimizi yönlendiren, zor durumlarda yardımımıza koşan çok değerli hocam Sayın Yrd. Doç.Dr. Vedat TAŞKIN'a teşekkürlerimi arz etmeyi bir borç bilirim.

Ayrıca, proje çalışmasının bütün aşamalarında bana yardımcı olan Trakya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Sayın Pınar AYDAN DEMİRHAN'a, atelye çalışmalarında geç saatlere kadar benimle çalışan Makine Mühendisi Sayın Anıl ŞAHİN'e teşekkür etmeyi borç bilirim.

İsmail MUTLU

OCAK 2011

## İÇİNDEKİLER

|  |      |
|--|------|
| ÖZET.....  | I    |
| ABSTRACT.....  | II   |
| ÖNSÖZ.....   | III  |
| İÇİNDEKİLER.....   | IV   |
| ŞEKİLLER.....  | VI   |
| ÇİZELGELER.....  | VIII |
| 1. GİRİŞ.....  | 1    |
| 2. Metal Köpükler.....   | 2    |
| 2.1. Açık ve Kapalı Hücreli Metal Köpükler.....                                  | 3    |
| 3. METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....  | 5    |
| 3.1. Ergiyikten Doğrudan Köpürtme.....   | 5    |
| 3.2. Köpük Yapıcı Öncü Malzemeler ile Köpürtme.....                              | 6    |
| 3.3. Kapalı Hücre Alüminyum Metal Köpük Üretim Yöntemleri.....                   | 6    |
| 3.3.1. Gaz Üfleme Yöntemi.....   | 7    |
| 3.3.2. Ergiyik Metal İçerisine Köpürtücü Madde İlavesi ile Metal Köpük Üretimi.. | 8    |
| 3.3.3. Köpürebilen Öncü Tabletler Kullanarak Metal Köpük Üretimi.....            | 10   |
| 3.3.4. FORMGRIP Üretim Yöntemi.....  | 11   |
| 3.3.5. Toz Metalürjisi ile Metal Köpük Üretimi.....                              | 12   |
| 3.3.6. Yarı Katı Aralıkta Köpürtücü Toz Kullanarak Metal Köpük Üretimi.....      | 14   |
| 4. METAL KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....                                     | 16   |
| 4.1. Kapalı Hücre Metal Köpüğün Non-Linear Deformasyon Davranışı.....            | 16   |
| 4.2. Kapalı Hücre Metal Köpüklerin Akma Gerilmesi.....                           | 18   |
| 4.3. Metal Köpüklerin Enerji Sönümlemesi.....                                    | 20   |
| 4.4. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi.....                                    | 22   |
| 4.4.1. Çözeltiye Alma İşlemi.....  | 23   |
| 4.4.2. Su Verme İşlemi.....  | 24   |
| 4.4.3. Yaşlandırma İşlemi.....   | 25   |
| 5. LİTERATÜR TARAMASI.....   | 26   |
| 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....  | 30   |
| 6.1. Malzeme Seçimi.....   | 30   |
| 6.2. Ergitme Fırını ve Ekipmanları.....  | 33   |
| 6.3. Metal Köpük Kalıpları.....  | 34   |
| 6.4. Kapalı Hücre Kompozit Alüminyum Köpüklerin Üretilmesi.....                  | 35   |

|  |    |
|--|----|
| 6.5. Deney Numunelerinin Hazırlanması .....                                  | 36 |
| 6.6. Yoğunluk ölçümü .....   | 37 |
| 6.7. Alüminyum Kompozit Köpüklerin Isıl İşlemi .....                         | 38 |
| 6.8. Mikro Sertliklerin Ölçülmesi.....                                       | 39 |
| 6.9. Alüminyum Kompozit Köpüklerin Basma Testleri .....                      | 39 |
| 6.10. Mikro yapı incelemeleri .....  | 40 |
| 7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME .....                                    | 41 |
| 7.1. Kapalı Hücre Kompozit Köpük Üretimi .....                               | 41 |
| 7.2. Yoğunluk ölçüm sonuçları .....  | 43 |
| 7.3. Basma Deneyi Sonuçları .....  | 44 |
| 7.4. SiC <sub>p</sub> Oranının Basma Dayanımına Etkisi.....                  | 46 |
| 7.5. Isıl İşlemin Basma Dayanımına Etkisi .....                              | 47 |
| 7.6. Isıl İşlemin ve Takviye Oranının Mikro Sertlikler Üzerinde Etkisi ..... | 49 |
| 7.7. SiC Takviye Oranının Enerji Sönümlenme Kapiliyeti Üzerine Etkisi.....   | 50 |
| 7.8. Isıl İşlemin Enerji Sönümlenme Kapiliyeti Üzerine Etkisi .....          | 52 |
| 7.9. Metalografik İnceleme Sonuçları .....                                   | 53 |
| 7.9.1. Takviye Oranının Köpük Yapısına Etkisi.....                           | 53 |
| 7.9.2. Isıl İşlemin Köpük Yapısına Etkisi.....                               | 55 |
| 8. SONUÇLAR .....  | 58 |
| TEŞEKKÜR.....  | 59 |
| KAYNAKLAR .....  | 60 |

## ŞEKİLLER

|  |    |
|--|----|
| Şekil 2.1 Açık hücreli metal köpük.....  | 3  |
| Şekil 2.2 Kapalı hücreli metal köpük.....  | 4  |
| Şekil 3.1 Metal köpük üretim yöntemleri .....  | 5  |
| Şekil 3.2 Gaz üfleme yöntemi.....  | 7  |
| Şekil 3.3 Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile metal köpük üretimi .....                        | 9  |
| Şekil 3.4 Köpürebilen öncü parçaların hazırlanması .....   | 11 |
| Şekil 3.5 FORMGRIP yöntemi.....  | 12 |
| Şekil 3.6 Toz metalürjisi ile metal köpük üretim yöntemi.....  | 13 |
| Şekil 3.7 Yarı Katı Aralıkta Köpürtücü Toz Kullanarak Metal Köpük Üretimi.....                                 | 15 |
| Şekil 4.1 Metal köpüklerde deformasyon bölgeleri .....   | 17 |
| Şekil 4.2 Farklı yoğunluklara sahip metal köpük numunelerin Gerilme-Birim şekil<br>değiştirme grafikleri ..... | 19 |
| Şekil 4.3 Basma yükleri altında gözeneklerin plastik şekil değişimi.....                                       | 20 |
| Şekil 4.4 Köpük malzemede ve metal malzemede sönmülenen enerjinin<br>karşılaştırılması .....                   | 21 |
| Şekil 4.5 Metal köpük malzemelerde sönmülenen enerji miktarı.....  | 21 |
| Şekil 4.6 Çözeltiye alma işlemi.....   | 24 |
| Şekil 4.7 Çözeltiye alma işlemi sonucunda tek faz halindeki katı çözelti .....                                 | 24 |
| Şekil 4.8 Yavaş soğuma durumunda oluşan heterojen çekirdeklenme .....  | 25 |
| Şekil 6.1 Takviye oranları ve takviye boyutlarının seçimi .....  | 32 |
| Şekil 6.2 Metal köpük fırını .....   | 33 |
| Şekil 6.3 Karıştırma aparatları .....  | 34 |
| Şekil 6.4 Metal köpük kalıpları.....   | 35 |
| Şekil 6.5 7075 Alüminyum malzeme için yarı-katı sıcaklık bölgesi .....   | 36 |
| Şekil 6.6 Hassas kesme cihazı.....   | 37 |
| Şekil 6.7 Yoğunluk ölçümü .....  | 37 |
| Şekil 6.8 Isıl işlem süreci .....  | 38 |
| Şekil 6.9 Basma numunelerinin hazırlanması .....   | 39 |
| Şekil 6.10 Kompozit köpük basma testi.....   | 40 |
| Şekil 7.1 Köpürtme işleminden çıkmış numuneler .....   | 41 |
| Şekil 7.2 a) Takviyesiz köpük numune. b) %5 SiC takviyeli numune. ....   | 42 |
| Şekil 7.3 a) %10 SiC takviyeli numune. b) %15 SiC takviyeli numune.....  | 42 |
| Şekil 7.4 %20 SiC takviyeli numune .....   | 43 |
| Şekil 7.5 %20 SiC takviyeli, aynı ısıl işlem uygulanmış, farklı yoğunluklara sahip<br>numuneler.....           | 45 |
| Şekil 7.6 %10 SiC takviyeli aynı ısıl işlem uygulanmış yoğunlukları farklı numuneler                           | 45 |
| Şekil 7.7 SiC takviye malzemesinin basma dayanımına etkisi .....   | 46 |
| Şekil 7.8 SiC takviye oranının plato gerilmesine etkisi .....  | 47 |
| Şekil 7.9 Isıl işlemlili ve doğal yaşlandırılmış numunelerin basma grafikleri.....                             | 48 |



## VII

|   |    |
|---|----|
| Şekil 7.10 Isıl işlemlili farklı takviye oranlarına sahip numunelerin basma grafikleri ....                             | 48 |
| Şekil 7.11 Isıl işlemin basma özelliklerine etkisi.....   | 49 |
| Şekil 7.12 Isıl işlemin mikro sertlikler üzerine etkisi .....   | 50 |
| Şekil 7.13 %20 ve %10 takviyeli metal köpüklerde enerji sönümlleme kabiliyeti.....                                      | 51 |
| Şekil 7.14 %10 ve %5 takviyeli metal köpüklerde enerji sönümlleme kabiliyeti.....                                       | 51 |
| Şekil 7.15 Takviyesiz metal köpük malzemelerde ısııl işlemin enerji sönümlleme kabiliyetine etkisi .....                | 52 |
| Şekil 7.16 %20 SiC takviyeli metal köpük malzemelerde ısııl işlemin enerji sönümlleme kabiliyetine etkisi .....         | 53 |
| Şekil 7.17 %20 takviyeli köpük numunenin mikroskobik yapısı .....   | 54 |
| Şekil 7.18 Takviyesiz köpük numunenin mikroskobik yapısı .....  | 54 |
| Şekil 7.19 Tane içinde oluşan çökeltmeler .....   | 55 |
| Şekil 7.20 T6 ısııl işlemlili görmüş %20 SiC takviyeli köpük malzemenin hücre duvarı kesitinin mikroskobik yapısı ..... | 56 |
| Şekil 7.21 Doğal yaşlandırılmış %20 SiC takviyeli köpük malzemenin hücre duvarı kesitinin mikroskobik yapısı .....      | 56 |
| Şekil 7.22 Takviyesiz doğal yaşlandırılmış numunenin SEM analizi görüntüleri.....                                       | 57 |
| Şekil 7.23 %20 SiC takviyeli T6 ısııl işlemlili numunenin SEM analizi görüntüleri .....                                 | 57 |

**ÇİZELGELER**

|  |    |
|--|----|
| Çizelge 3.1 Gaz üfleme yönteminin avantaj ve dezavantajları .....                                      | 8  |
| Çizelge 3.2 Ergiyik Metal İçerisine Köpürtücü Madde İlavesi yönteminin avantaj ve dezavantajları ..... | 10 |
| Çizelge 3.3 FORMGRIP yönteminin avantaj ve dezavantajları .....  | 12 |
| Çizelge 3.4 Toz Metalürjisi ile Metal Köpük Üretim yönteminin avantaj ve dezavantajları .....          | 14 |
| Çizelge 4.1 Metal köpük firmalarının ürettikleri köpüklerin mekanik özellikleri .....                  | 20 |
| Çizelge 4.2 Alüminyum alaşımlarının temper durumları(Erdoğan, 2001) .....                              | 22 |
| Çizelge 4.3 Alüminyum alaşımlarının yaşlandırma ısı işlemine uygunluğu .....                           | 23 |
| Çizelge 6.1 7075 alaşımının kimyasal özellikleri .....   | 30 |
| Çizelge 6.2 7075 alaşımının mekanik özellikleri.....   | 31 |
| Çizelge 6.3 En AW 7075 alaşımının fiziksel özellikleri.....  | 31 |
| Çizelge 6.4 SiC parçacıklarının fiziksel özellikleri.....  | 32 |
| Çizelge 6.5 SiC parçacıklarının özellikleri .....  | 32 |
| Çizelge 6.6 Isıl işlem prosesi .....   | 38 |
| Çizelge 7.1 Numune yoğunlukları ve göreceli yoğunlukları .....   | 44 |

## 1. GİRİŞ

Günümüzde otomotiv, uzay ve havacılık sanayi teknolojik olarak en hızlı gelişen sektörlerdir. Enerji tüketimi daha az ve daha güvenli araçların geliştirilme çabaları, araştırmacıları yeni teknolojiler ve malzemeler geliştirmeye zorlamaktadır. Özellikle otomotiv firmaları, daha güvenli taşıt üretme çabasının oluşturduğu olumlu rekabetle, sürücü ve yolcuların güvenliğine giderek daha fazla önem vermekte ve oluşacak kazalarda ölümleri ve hasarı en aza indirmek için çaba harcamaktadırlar. Bu araçların imalatı sırasında kullanılan malzemelerin ağırlığı, maliyetlerin yüksekliğinde çok önemli bir yer tutmaktadır.

Geliştirilen birçok üstün özellikli malzemelerin arasında Metal köpükler, darbe sönümleme davranışlarının yanında düşük yoğunlukları, titreşim azaltma, ısı tutma (kapalı hücreli metal köpükler), ısı yalıtma (açık hücreli metal köpükler) gibi birçok özelliği bünyesinde barındırmaktadır. Hafifliğin ve dayanımın ön planda olduğu otomotiv, havacılık ve savunma sanayinde birçok araştırmacı bu malzemelerle çalışma yapmaktadır.

1943 yılında Benjamin Sosnick, alüminyum cıva ile birlikte köpürterek metal köpük ile ilgili ilk çalışmayı oluşturmuştur. Bu çalışmanın ardından değişik yöntemler ve malzemeler kullanılarak metal köpük üretim çalışmaları devam etmiştir ve günümüzde kendi patentli yöntemleri ile metal köpük üretimi yapan firmalar mevcuttur.

## 2. METAL KÖPÜKLER

Metal köpükler, köpük yapıların avantajlarını metallere aktarmak için doğadan esinlenilerek oluşturulmuş insan yapımı ürünlerdir. Gözenekli yapıların en büyük özelliği hafiflikleri ve enerji sönümlenme kabiliyetleridir. Bu yüzden hücresel yapıya sahip polimerlerden, seramikten ve metallere yapılmış birçok endüstriyel ürün mevcuttur. Polimerlerden yapılmış köpükler daha çok koruyucu özelliklerinden dolayı, seramik köpükler filtreleme özelliklerinden dolayı, metal köpükler ise yapısal uygulamalara elverişli olduğu için tercih edilir. Seramik köpükler kırılabilir bir yapıya sahip olduklarından dolayı kısıtlı kullanıma sahiptir, polimer köpüklerin ise dayanım özellikleri zayıftır ve özellikle sıcaklığın yüksek olduğu ortamlarda kullanımları çok sınırlıdır. Metal köpükler, seramik ve polimer köpüklerin yetersiz kaldığı uygulamalarda bu malzemelerin eksikliklerini tamamlamıştır. Hücresel yapıya sahip malzemeler genellikle literatürde hücre formlarına göre açık ve kapalı gözenekli yapılar olarak sınıflandırılmıştır.

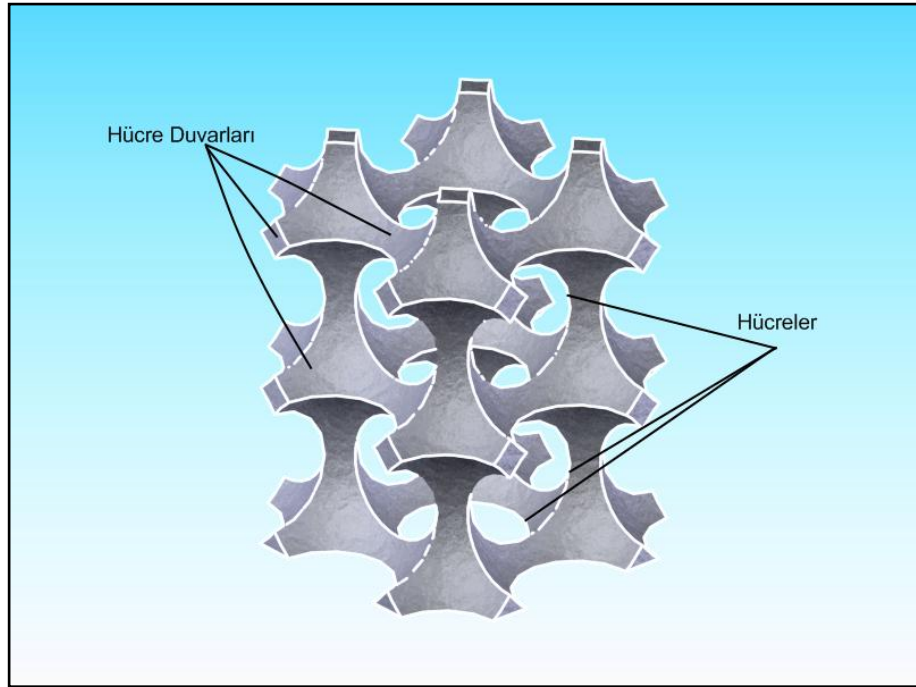
Metal köpüklerin üretiminde titanyum, nikel, magnezyum, çelik ve benzeri birçok metal kullanılmasına rağmen, düşük ergime sıcaklıkları, ideal yoğunluğa sahip olmaları ve yeterli dayanım özelliklerinden dolayı en yaygın ve en uygun malzeme olarak alüminyum ve alaşımları tercih edilmektedir.

Metal köpükler açık hücreli ve kapalı hücreli olmak üzere iki farklı formda üretilmektedir. Sıvı ve katı faz kullanılan çok sayıda kapalı hücre metal köpük üretim yöntemi mevcuttur. Ergiyik içine gaz üfleme, köpürtücü tozlar kullanılarak gözenek oluşturma ve toz metalürjisi ile hazırlanmış öncü malzemeler kullanılarak metal köpük üretimi en çok kullanılan yöntemlerdir. Köpürtücü tozların tane boyutları ve tozlara uygulanan ısı işlem, ergitme atmosferi, ergiyiğin sıcaklığı ve viskozitesi gibi birçok parametre köpük oluşumunu etkilemektedir. Homojen dağılmış gözeneklere sahip metal köpük malzeme üretmek için ergiyiğin viskozitesini arttırmak amacıyla ağırlıkça %5-20 oranında, ortalama tane boyutları 1-15 µm aralığında olan SiC<sub>p</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Ca gibi

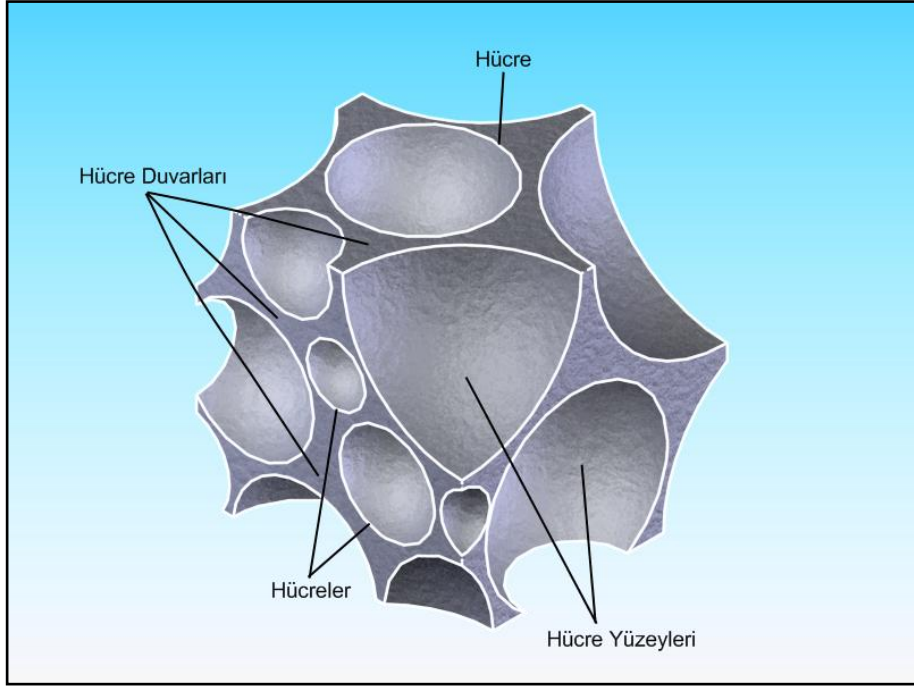
tozlar kullanılmaktadır. Ergiyik içinde köpük oluşturmak için yüksek fiyatlı olmasına rağmen en iyi sonucu verdiklerinden dolayı genellikle metal hidrürler kullanılmaktadır ve en yaygın olarak kullanılan metal hidrür  $TiH_2$ 'dir.

## 2.1. Açık ve Kapalı Hücreli Metal Köpükler

Metal köpükler yapı içindeki hücrelerin formuna göre açık hücre ve kapalı hücre olarak sınıflandırılırlar. Açık hücreli metal köpüklerde hücreleri birbirinden ayıran hücre yüzeyleri bulunmaz, yapı sadece hücre duvarlarından oluşur ve hücreler arası geçiş vardır (Şekil 2.1.) Kapalı hücre metal köpüklerde ise hücreler kapalı ve hücreleri birbirinden ayıran hücre yüzeyleri ve hücre duvarlarından oluşur yani hücreler arası temas yoktur (Şekil 2.2.)



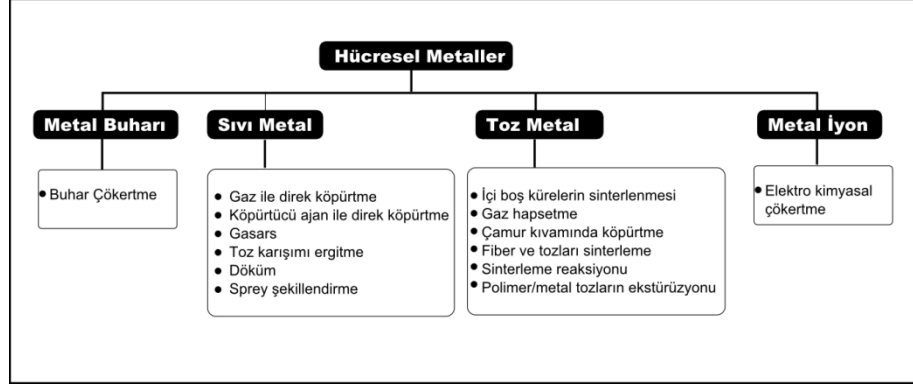
Şekil 2.1 Açık hücreli metal köpük



**Şekil 2.2 Kapalı hücreli metal köpük**

### 3. METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Metal köpük üretiminde farklı üretim yöntemleri mevcuttur. Bu üretim yöntemleri Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Metal köpük üretim yöntemleri (Banhart, 2003)

Kapalı hücre metal köpükler iki temel yöntem ile üretilmektedir bunlar ergiyikten doğrudan köpürtme ve dolaylı köpürtme yöntemleridir.

#### 3.1. Ergiyikten Doğrudan Köpürtme

Ergiyikten direk köpürtme yönteminde, köpürtme olayı metal ergiyik içerisine gaz enjeksiyonu veya köpük yapıcı tozlar ile sağlanır. Bu yöntemlerde metalin viskozitesini artırmak amacıyla metal ergiyiğe seramik türü parçacıklar ilave edilir. Silisyum karbür, alüminyum oksit veya diğer seramik parçacıklar alüminyum alaşımlarını köpürtmek için ısıl işlem ile uygun hale getirirler. Genel olarak takviye edilen parçacık oranı hacimce %10–20 ve parçacık tane boyutları yaklaşık olarak 5–20µm arasındadır. Bu yöneme örnek olarak gaz enjeksiyonunu gösterebiliriz. Gaz enjeksiyonu yöntemi, dönme ve titreşim hareketleri yapabilen özel tasarlanmış kılcal borulardan oluşur. Gaz enjeksiyonu süresince kabarcıklar metal ergiyik yüzeyinde

oluşurlar. İlave edilen seramik parçacıklar gaz kabarcıkları ile ergiyik arasına yerleşerek hücrelerin birleşmesini ve yüzeye çıkıp sönmelerini engeller (Banhart,2001).

### **3.2. Köpük Yapıcı Öncü Malzemeler ile Köpürtme**

Köpük Yapıcı Öncü Malzemeler ile Köpürtme; ön işlemlere tabi tutulmuş metal tozları ve köpürtücü malzemeler toz metalürjisi yöntemi uygulanarak öncü tabletler (precursor) üretilir ve bu tabletler daha sonra farklı şekillerde köpürtme işlemine tabii tutulurlar. Köpük yapıcı öncü malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

- Alüminyum tozları ve titanyum hidrür tozları karıştırıldıktan sonra sıkıştırılır ve belirli sıcaklıklarda preslenir veya ekstrüze edilerek öncü malzemeler haline getirilir (ALULIGHT prosesi).
- Metal ve köpük yapıcı tozlar karıştırılarak ön sıkıştırılma ile tabletler hazırlanır. Hazırlanan bu tabletler yarı-katı aralığa ısıtılarak Tiksoöküm ile öncü malzemeler haline getirilir.
- Alüminyum alaşımı ergitildikten sonra köpürtücü tozlar eklenir ve hemen ergiyik katılaştırılarak tablet haline getirilir. Köpürtücü tozların erken gaz salınımını önlemek için ısıl işleminden geçirilir. Bu yöntem basınçlı veya normal döküm yöntemlerinde kullanılabilir.(FORMGRIP) (Banhart,2001).

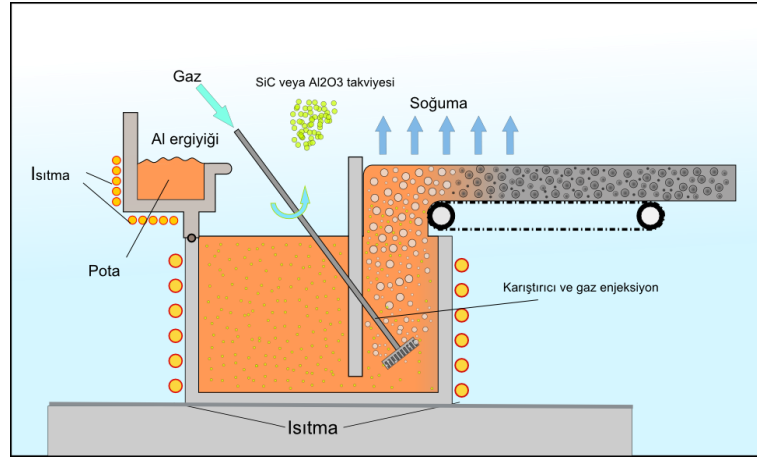
### **3.3. Kapalı Hücre Alüminyum Metal Köpük Üretim Yöntemleri**

Kapalı hücreli köpük metaller için gaz üfleme, köpürtücü toz kullanımı, toz metalürjisi ve köpürebilen tozlar kullanılarak üretim gibi v.b yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler aşağıda açıklanmaktadır.



### 3.3.1. Gaz Üfleme Yöntemi

Sıvı metal alaşımına doğrudan gaz üflenerek köpük oluşturma yöntemidir. Sıvı haldeki metal içine üflenene gaz, kabarcıklar oluşturur ve kabarcıklar düşük yoğunluklarından dolayı sıvı yüzeyine doğru hareket ederek sıvı metal yüzeyinde birikir. Gaz kabarcıkları sıvı metalin viskozitesi ne kadar düşük ise o kadar hızlı bir şekilde yüzeye çıkar. Yüzeyde biriken köpük yapı haline dönüşen kabarcıklar toplanıp bir hareketli bant vasıtasıyla soğutulmak üzere sistemin dışına taşınırlar. Sıvı metalin viskozitesi, hücreler arası duvarların kalınlığını, dolayısıyla metal köpük malzemenin dayanımını belirler. Hücre duvarlarının kalınlaştırılması ve dayanımın artırılması amacıyla sıvı metalin viskozitesi çeşitli katkılarla artırılır. Bu amaçla %10–30 oranında sıvı metal içinde çözünmeyen, ergime sıcaklıkları yüksek, 0.5-25 $\mu$ m boyutlarında SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ca vb. parçacıklar sıvı metal içine katılarak viskozitesi yükseltilir. Şekil 3.2 de yöntemin şematik anlatımı gösterilmiştir. (Ashby,2000).



Şekil 3.2 Gaz üfleme yöntemi

Sıvı alüminyum içinde kabarcık oluşturmak için çeşitli gazlar kullanılır. Bu gazlar genellikle karbon dioksit ve inert gazlardır. Köpüğü sistem dışına almak için çok sayıda farklı yöntem kullanılmaktadır. NORSE-HYDRO ve CYMAT firmaları bu yöntemle 1 metre genişliğinde 0.2 metre kalınlığında, gözenek boyutları 5–20 mm arasında dilimler

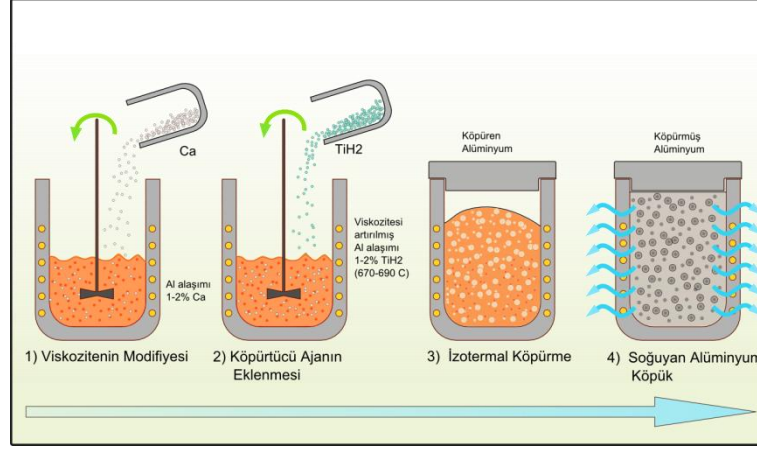
halinde sürekli alüminyum köpük üretimi yapmaktadır (Ashby,2000). Yöntemin avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.1 de verilmiştir.

**Çizelge 3.1 Gaz üfleme yönteminin avantaj ve dezavantajları**

| <b>AVANTAJLAR</b>  | <b>DEZAVANTAJLAR</b>  |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sürekli üretim için uygun bir yöntemdir ve kesintisiz üretim yapılabilir.</li> <li>• Ucuz ve nispeten basit bir yöntemdir.</li> <li>• Diğer yöntemlere nazaran daha düşük yoğunluklarda metal köpük üretimi mümkündür.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gaz dağılımını kontrol etmek zordur ve gözenekler daima büyük ve düzensizdir.</li> <li>• Sadece levha dökümüne uygundur ve yüzey düzensizdir.</li> <li>• Önceden viskoziteyi arttırmak için seramik tozların karıştırılması gerekir.</li> <li>• Bütün alaşımlar için uygun değildir.</li> <li>• Çok ince hücre duvarları nedeniyle köpük malzemenin dayanım özellikleri zayıftır.</li> </ul> |

### **3.3.2. Ergiyik Metal İçerisine Köpürtücü Madde İlavesi ile Metal Köpük Üretimi**

Bu yöntemde köpürtme işlemi, sıcaklık etkisinde difüzyon yolu ile gaz açığa çıkaran köpürtücü ajan denen tozların sıvı metal içine karıştırılması ile gerçekleştirilir. Yaygın olarak köpürtme tozu olarak titanyum hidrür kullanılır ( $TiH_2$ ). Titanyum hidrür  $465\text{ }^\circ\text{C}$  ısıtıldığında  $H_2$  gazı ayrışır. Yüksek sıcaklıktaki sıvı metal içine  $TiH_2$  tozları eklendiğinde çok hızlı bir şekilde gaz salınımı meydana gelir. Açığa çıkan gazlar sıvı ergiyik içinde düşük yoğunluklarından dolayı yukarı doğru yükselir ve sıvı metalin bulunduğu kabın alt kısmında gözeneksiz bir yapı oluşur buna drenaj bölgesi denir. Ergiyiğin viskozitesinin yüksek olması, gaz kabarcıklarının yukarı çıkışını önler ve oluşması muhtemel drenajı düşük seviyede tutar ve eğer  $TiH_2$  parçacıkları sıvı metal içinde homojen olarak dağıtılmış ise ergiyin içinde oluşan kabarcıklar homojen bir yapıya sahip olur Şekil 3.3. (Ashby,2000).



**Şekil 3.3 Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile metal köpük üretimi**

Bu proseste alüminyum sıvı hale getirilir ve sıcaklığı sabitlenir. Viskoziteyi yükseltmek için hızlı oksitlenen ve sıvı metal içine çabuk karıştırılabilen %1-2 oranında CaO ve CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> parçacıkları eklenir. Hemen ardından 5-20µm çaplarında %1-2 oranında TiH<sub>2</sub> tozları karışım içine katılır ve karıştırılır. Sıvı metal içinde dağıtılmış olan TiH<sub>2</sub> tozları H<sub>2</sub> gazını salarak gözenek oluşturmaya başlar. Bu prosesin kontrolünde sıcaklık, süre ve basınç parametrelerinin ayarlanmasıyla sonuç elde edilir. TiH<sub>2</sub> tozları bünyelerindeki gazı salması bu sıcaklıkta yaklaşık 10 dakika sürmektedir. Köpük oluşumu tamamlandıktan sonra ergiyik hızla soğutulmalıdır. Aksi takdirde gözenekler büyür birbirleri ile birleşir ve köpük yapı çökmeye başlar. (Ashby,2000).

Sıvı metale hacimce eklenen kalsiyum ve titanyum hidrür sonuç olarak göreceli yoğunluğu belirlemektedir. Bu yöntemde hücre boyutları TiH<sub>2</sub> tozlarının yapısına bağlı olarak 0.5-5mm arasında, köpük göreceli yoğunlukları 0.2-0.07 aralığında imal edilebilmektedir. Bu yöntem gaz enjeksiyon yöntemine göre daha pahalıdır. Günümüzde bu yöntem sadece alüminyum alaşımlarına uygulanmaktadır. Açığa çıkan H<sub>2</sub> gazının hidrojen gevrekleşmesine sebep olmasından dolayı diğer metallerde köpük yapıcı olarak kullanılmamaktadır. Yöntemin avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.2 de verilmiştir. Araştırmacılar alternatif olarak kullanılacak köpürtücü toz araştırmaları yapmaktadırlar (karbonatlar, nitritler) ve diğer yüksek ergime noktasına sahip metal alaşımlarına uygulamaya çalışmaktadırlar (Ashby,2000).

**Çizelge 3.2 Ergiyik Metal İçerisine Köpürtücü Madde İlavesi yönteminin avantaj ve dezavantajları**

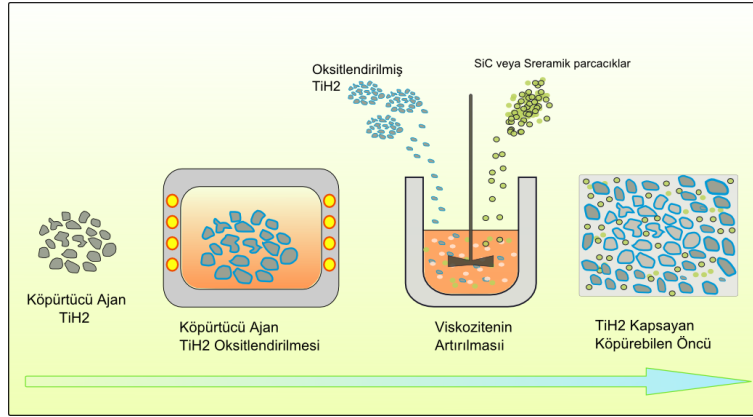
| <b>AVANTAJLAR</b>   | <b>DEZAVANTAJLAR</b>  |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcan yönteminden daha homojen köpük yapısı ve hücre boyutu elde edilebilir.</li> <li>• Küçük ve stabil hücreler elde edilebilir.</li> <li>• Hücre duvar kalınlıkları viskoziteye bağlı olarak isteğe göre ayarlanabilir.</li> <li>• Dayanımı yüksek hücre duvarları elde edilebilir.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Katkı malzemelerinden dolayı pahalı bir yöntemdir.</li> <li>• İstenilen son şekilde parça üretilemez.</li> <li>• Soğutma hızı ve köpürme zamanı köpük kalitesinde çok etkilidir.</li> <li>• Köpürtücü tozlara ısı işlem uygulamak gereklidir.</li> <li>• Köpürtücü tozların homojen dağılımını sağlamak zordur.</li> </ul> |

### 3.3.3. Köpürebilen Öncü Tabletler Kullanarak Metal Köpük Üretimi

Kimyasal köpürtücü tozlar kullanılarak üretilen metalik köpüklerin hücre yapısı kontrolü, gaz üfleme yöntemiyle üretilenlere nazaran daha iyidir. Fakat köpürtücü tozların ergiyik içinde dağılması zordur. Köpürtücü tozların ergiyik içinde iyi dağılabilmesi için pek çok yöntem araştırılmış ve denenmiştir. Bu problemin aşılması için geliştirilen bir yöntemde köpürtücü tozların katı metal tozlarıyla karıştırılarak (çok ince tozlar kullanılarak) preslenmekte ve öncü plaketler hazırlanmaktadır. Daha sonra köpük yapılacak sıvı metal içine veya toz metal içine karıştırılıp homojen karışma sağlanabilmiştir. Bu karışıma “köpürebilen öncü parçalar” adı verilmektedir. Bu yöntem direkt gaz ve toz metalürjisi yöntemiyle uygulanabilir. (Gergely, 2004).

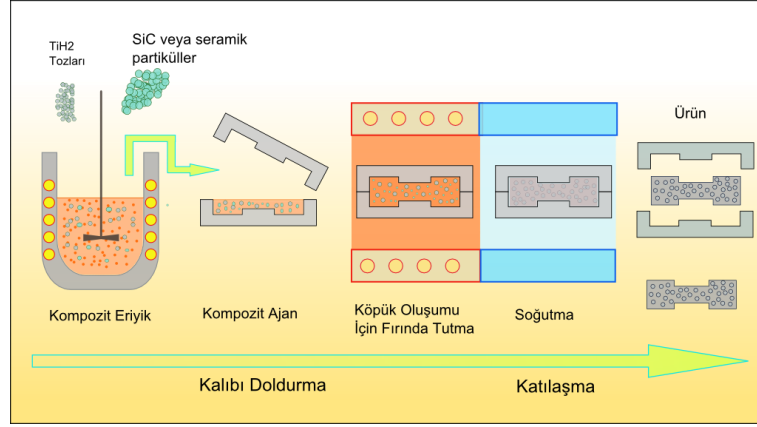
### 3.3.4. FORMGRIP Üretim Yöntemi

Bu yöntem, “Foaming of Reinforced Metal by Gas Release in Precursor” kelimelerinin baş harfleri kullanılarak adlandırılmıştır. Şekil 3.4 de görüldüğü gibi  $TiH_2$  ısıtılma işlemine tabi tutulmaktadır ve yüzeyde titanyum oksit film tabakası oluşturulmaktadır. Daha sonra  $TiH_2$  sıvı alüminyum ile karıştırılır ve viskoziteyi arttırmak için SiC parçacıkları katılır.  $TiH_2$  parçacıklarının üzerindeki oksit tabakası çözünmeyi geciktirici bariyer rolü oynamaktadır. Bu yöntem ile alüminyum, köpürtücü toz ve SiC den yapılmış düşük oranda gözenekli öncü üretilmektedir.



Şekil 3.4 Köpürebilen öncü parçaların hazırlanması

Hazırlanan öncü malzeme  $TiH_2$  hidrojen gazı çıkarması için  $630^\circ C$ 'ye getirilir. Fırında bekletme zamanı ayarlanarak, 1-10 mm arası hücre boyutu ve %50-95 gözenekli yapıya sahip köpükler elde edilebilir. Tozların iyi karışmasından dolayı köpükler homojen bir yapıya sahiptir. Şekil 3.5 de FORMGRIP yöntemi şematik olarak gösterilmektedir. (Gergely, 2004). Yöntemin avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.3 de verilmiştir.



Şekil 3.5 FORMGRIP yöntemi

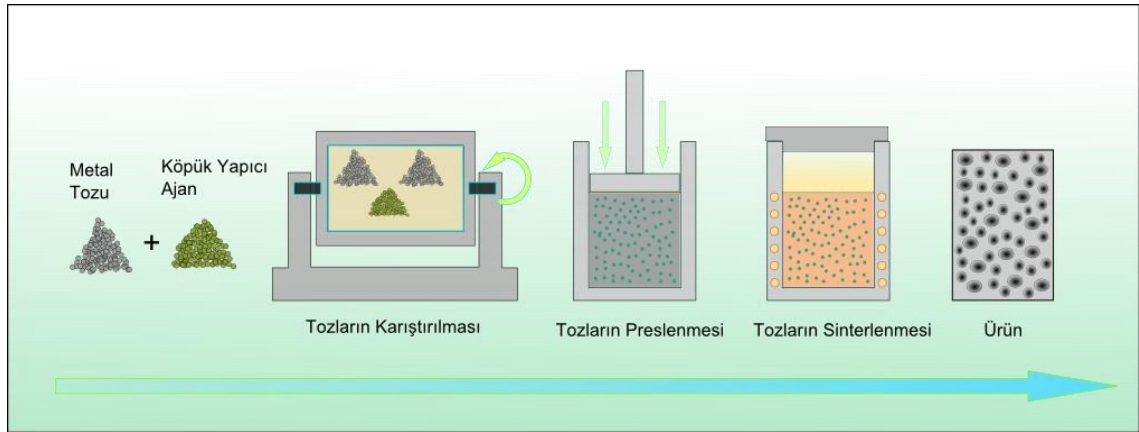
Çizelge 3.3 FORMGRIP yönteminin avantaj ve dezavantajları

| AVANTAJLAR   | DEZAVANTAJLAR  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hücrelerin homojenliği ve boyut kontrolü yapılabilir.</li> <li>• Alporas köpüğü ile aynı boyuta sahiptir.</li> <li>• Mamul üretim yapılabilir.</li> <li>• Bu işlem karmaşık kalıpları doldurmak için kullanılabilir.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sınırlı malzemeler için kullanılabilir.</li> <li>• Seramik parçacıklarının homojen dağılımı zorludur.</li> <li>• Metal ergitme sıcaklığında yeteri derecede viskoz değilse, köpük katılaşmadan önce söner.</li> <li>• Isıl işlem görmüş TiH<sub>2</sub> tozlarının köpük oluşturma kabiliyeti azalır</li> </ul> |

### 3.3.5. Toz Metalürjisi ile Metal Köpük Üretimi

ALULIGHT ve FOAMINAL adlarıyla bilinen toz metalürjisi ile metal köpük üretim yöntemleri Fraunhofer-Institut (Bremen) tarafından patenti alınmıştır (Haydn, 2002). Bu yöntemde, toz metal ve köpük yapıcı madde karıştırıldıktan sonra presleme, ekstrüzyon ve haddeleme benzeri metal şekillendirme yöntemleri ile köpük malzeme elde edilecek yoğun yapıya sahip yarı ürün elde edilmektedir (Şekil 3.6). Köpürtülecek yarı ürün, metalin ergime sıcaklığının üstüne ısıtılmakta ve bu esnada köpük yapıcı malzeme yapısındaki gazı bırakmaya başlamaktadır. Açığa çıkan gaz, ergimiş metalin

genişlemesine ve gözenekli bir yapı oluşmasına neden olmaktadır. Metal hidrürlerin yanında (örneğin  $TiH_2$ ), karbonatlar (örneğin  $CaCO_3$ , potasyum karbonat, sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat) ve buharlaşan maddeler (örneğin cıva bileşikleri ve toz organikler) köpük yapıcı toz olarak kullanılabilirler. Etkin bir köpürtme işlemi için, gazın kaçmasına engel olabilecek yüksek viskoziteye sahip bir yarı ürünün hazırlanması çok önemlidir ve köpük yapıcı maddenin metal içinde tamamen hapis edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden şekillendirmede kullanılan sıcaklık ve basınç değerleri, toz metal parçacıklarını birbirine bağlayacak ve köpük yapıcı maddeden açığa çıkan hidrojen gazının kaçışını önleyecek şekilde ayarlanmalıdır.



**Şekil 3.6 Toz metalürjisi ile metal köpük üretim yöntemi**

Yarı ürünün köpükleşmesi için gereken zaman, uygulanan sıcaklığa ve yarı ürünün büyüklüğüne bağlı olup, birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişmektedir. Bu yöntem ile sadece Al ve Al alaşımlarının kullanımı ile sınırlı olmayıp, kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal alaşımları da uygun köpük yapıcı madde ve işlem parametrelerinin seçilmesi suretiyle köpükleştirilebilir (Elbir, 2003). Alüminyum ve alüminyum alaşımları için köpürtme işleminde kullanılacak en iyi köpürtücü toz  $TiH_2$  dir. Alüminyum için  $TiH_2$  tozu genellikle % 0.6-1 arasında kullanılır (Kennedy, 2002). Diğer hidrürler ( $ZrH_2$  ve  $HfH_2$ ) pratikte kullanılabilmeyle beraber daha pahalı olduklarında tercih edilmezler.  $TiH_2$ 'nin hangi sıcaklıkta hidrojen gazı açığa çıkardığını

belirlemek zordur (Banhart, 2004). Çizelge 3.4 de toz metalürjisi kullanılarak köpük metal üretiminin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

**Çizelge 3.4 Toz Metalürjisi ile Metal Köpük Üretim yönteminin avantaj ve dezavantajları**

| <b>AVANTAJLAR</b>  | <b>DEZAVANTAJLAR</b>  |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nihai ürüne yakın üretim mümkündür.</li> <li>• Kompozitler üretilebilir.</li> <li>• Alaşım seçiminde esnektir.</li> <li>• Seramik ve fiberler eklenebilir.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tozların maliyeti yüksektir.</li> <li>• Çok büyük parçaların üretilmesi çok zordur.</li> <li>• Sürekli formda üretim yapılamaz.</li> </ul> |

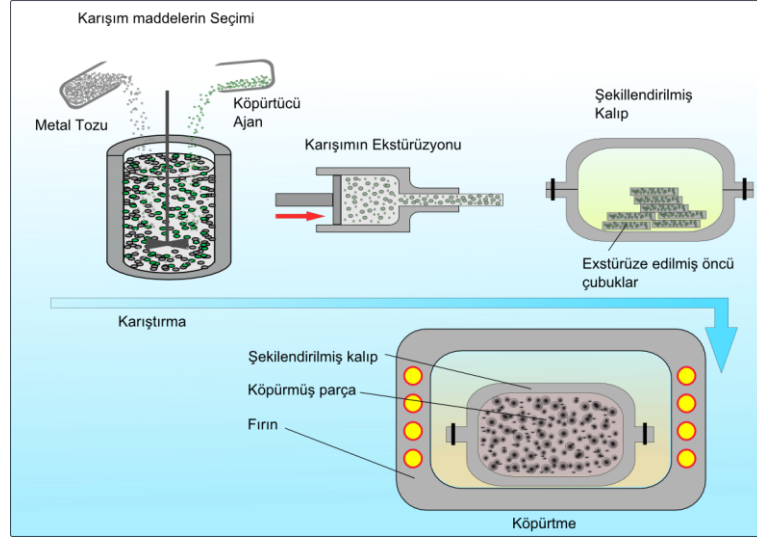
### **3.3.6. Yarı Katı Aralıkta Köpürtücü Toz Kullanarak Metal Köpük Üretimi**

Köpürtücü toz, metal tozu ile birleştirilerek karıştırılır.  $TiH_2$  çoğunlukla köpürtücü toz olarak kullanılır. Saf alüminyum ve alaşımlarının ergime noktası  $660^\circ C$  dır. Buna karşın  $TiH_2$  de  $465^\circ C$  gaz çıkarmaya başlar. Bu aralık toz metalürjisi ile köpük üretmeyi mümkün kılmaktadır. Gaz çıkarma sıcaklığının üstünde alüminyum ergimiş hale gelirken, ergiyik hücrelerin büyümesine olanak verir, soğutma işlemi hücre stabilizesini sağlar. Bu yaklaşımla IFAM (Almanya), LKR (Avusturya) ve Neuman-Alu(Avusturya) gibi firmalar üretim yapmaktadır üretimin şematik resmi Şekil 3.7 de gösterilmiştir.

Bu yöntemde seçilen alüminyum alaşım tozu köpürtücü toz ile karıştırılması ile başlar daha sonra bu karışım soğuk şekilde sıkıştırılır ve teorik yoğunluğa yaklaşık olarak plaka ve çubuklar halinde ekstürüze edilir. Hazırlanan bu öncü malzemeler daha sonra küçük parçalara bölünerek istenen parça şekline göre biçimlendirilmiş kalıba yerleştirilerek öncü malzemeler alaşımın solvus eğrisine kadar ısıtılır.  $TiH_2$  bozunması sonucu çıkan gaz yüksek bir iç basınç oluşturarak alüminyumun yarı katı aralığında



hücre oluşturmaya ve hücrelerin büyüyerek alüminyum köpük malzemenin kalıbı doldurmasını sağlar. Kalıp içine yerleştirilen öncü malzemelerin göreceli yoğunluğu 0.08 dir. Oluşan köpük kapalı hücrelere sahiptir ve hücre çapları 1-5 mm arasındadır (Ashby,2000).



**Şekil 3.7 Yarı Katı Aralıkta Köpürtücü Toz Kullanarak Metal Köpük Üretimi**

#### 4. METAL KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Üç boyutlu gözenek yapısına sahip malzemelerin, diğer bir deyişle köpüklerin, mekanik özellikleri açık veya kapalı gözenek yapısına bağlıdır. Yapısal uygulamalar için polimerler düşük mukavemette iken seramik malzemeler fazla kırılğan yapıdadır. Dolayısıyla metalik köpük malzemeler polimer ve seramik malzemelere göre daha uygun özelliklere sahiptirler

Gözenekli malzemelerin özelliklerini belirleyen en önemli parametre *göreceli yoğunluktur*. Göreceli yoğunluk ( $\rho^*/\rho_s$ ) köpük malzemenin yoğunluğunun ( $\rho^*$ ) hücre duvarını oluşturan malzemenin yoğunluğuna ( $\rho_s$ ) oranı ile ifade edilir. Genel olarak gözenekli malzemeler 0.3'ten az göreceli yoğunluğa sahiptirler. *Gözenek boyutu* da önemli bir parametre olmakla birlikte birçok mekanik ve ısıl özelliği nispeten az miktarda etkiler. *Gözenek şekli* ise malzeme özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Eşeksizli gözenek yapısına sahip malzeme; izotropik özellik gösterirken az miktarda uzamış veya düzleşmiş gözeneğe sahip malzemedeki yöne bağlı özellik değişimi gözlemlenir (Degischer, 2002). İki boyutlu gözenek yapısına (bal peteği yapısı) sahip malzemelerin modellenmesi nispeten kolayken düzensiz yapıda gözeneğe sahip malzemeler (köpükler) için modelleme oldukça güçtür (Gibson,1997)

##### 4.1. Kapalı Hücre Metal Köpüğün Non-Linear Deformasyon Davranışı

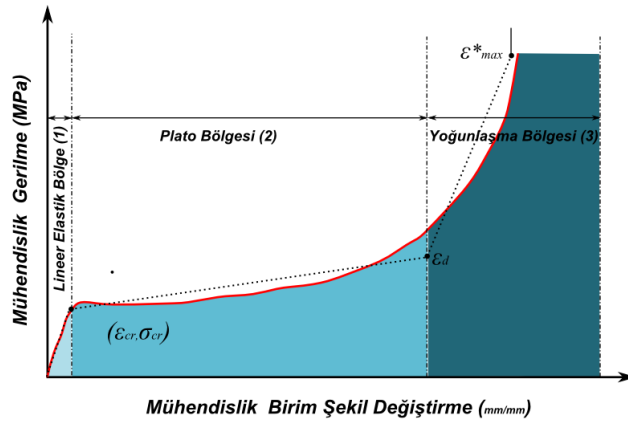
Kapalı hücre köpük non-linear deformasyon davranışına sahiptir bu da diğer uygulamalara göre köpük malzemeyi daha çekici yapmaktadır. Quasi-static (Sanki-statik) deformasyon altında, metal köpük üç farklı deformasyon bölgesi gösterir.

İlk bölge: Hücre duvarlarındaki elastik deformasyon mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme diyagramının elastik bölgesi gibi gözükmekte ve bu bölgeye “lineer elastik bölge” denmektedir

İkinci bölge: Köpük hücrelerinde hücre duvarları katlanarak çökmeye başlarlar çökme katman katman gerçekleştiği için birim şekil değiştirme oranı yüksektir ve bundan dolayı eğri yatay bir şekilde devam ettiğinden bu bölgeye “plato bölgesi” denmektedir (Şekil 4.1)

Üçüncü bölge: Köpük yapıdaki hücrelerin katman katman çökmesi sonucu, yapı bileşen malzemenin yoğunluğuna yaklaştırmaktadır ve bu bölgeye “yoğunlaşma bölgesi” denmektedir (Şekil4.1) (Lopatnikov,2003).

Köpük malzemenin mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme diyagramında Lineer-elastik ve plato bölgelerinin teğetlerinin kesişimi kritik birim şekil değiştirme ( $\epsilon_{cr}$ ) ve gerilme ( $\sigma_{cr}$ ) değerleri olarak tanımlanmaktadır. Benzer şekilde plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesindeki teğetlerinin kesişimi, yoğunlaşma veya kilitleme birim şekil değiştirmesi ( $\epsilon_d$ ) olarak tanımlanmaktadır (Lopatnikov,2003)



Şekil 4.1 Metal köpüklerde deformasyon bölgeleri

## 4.2. Kapalı Hücre Metal Köpüklerin Akma Gerilmesi

Al köpüklerinin basma yükleri altındaki mekanik özellikleri yoğunluklarına ve kullanılan metalin akma gerilmesine bağlıdır. Basma gerilmesi, artan yoğunluk ve kullanılan metal malzemenin akma gerilmesi ile artar.

Köpük malzemenin, Elastisite ve Kayma modüllerinin göreceli yoğunluğa göre değişimi Eşitlik 1. ve Eşitlik 2. de verilmiştir.

$$E_k = \alpha_1 E_{metal} \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^n \quad (1)$$

$$G_k = \frac{3}{8} \alpha_1 E_{metal} \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^n \quad (2)$$

n katsayısının değeri 1.8-2.2 ve  $\alpha_1$  katsayısının değeri 0.1-4 arasındadır.

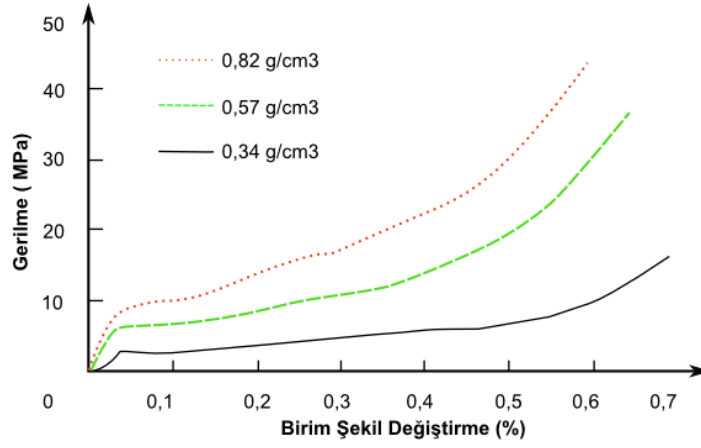
Plato gerilmeleri ( $\sigma_{pl}$ ) ve yoğunlaşma bölgesindeki birim şekil değiştirmenin ( $\varepsilon_D$ ) göreceli yoğunluklara göre değişimi Eşitlik 3. ve Eşitlik 4. ile verilmiştir.

$$\sigma_{pl} = (0,25 \dots 0,35) \sigma_{ak} \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^m \quad (3)$$

$$\varepsilon_d = \left( 1 - \alpha_2 \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (4)$$

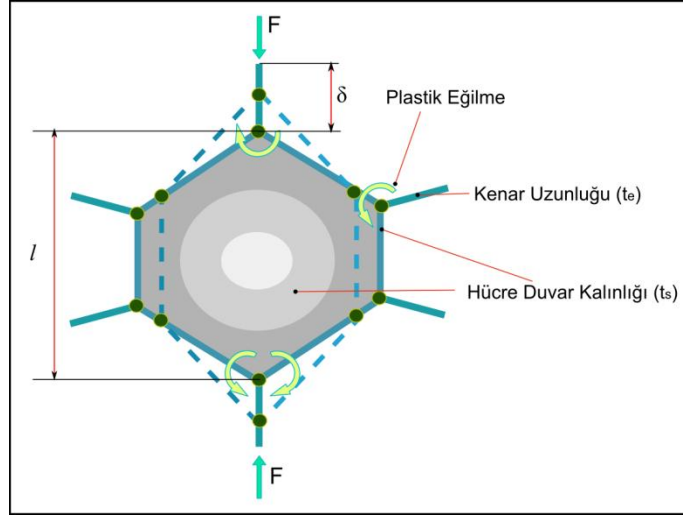
m katsayısı 1.5-2 arasında,  $\alpha_2$  katsayısı 1.4-2 değerleri arasındadır (Degischer, 2002).

Literatürden alınmış deneysel çalışmada  $0,34 \text{ g/cm}^3$ ,  $0,57 \text{ g/cm}^3$  ve  $0,82 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahip üç Al köpüğün basma eğrileri mukayese edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.2’de gösterilmiştir. (Yu, 1997).



**Şekil 4.2 Farklı yoğunluklara sahip metal köpük numunelerin Gerilme-Birim şekil değiştirme grafikleri (Yu, 1997)**

Kapalı gözenekli metalik köpüklerde, plastik şekil değişimi hücre duvarlarında meydana gelir ve hücre duvarlarının basma yönünde katlanmasıyla oluşur. Her bir hücre duvarının plastik şekil değiştirmesi için gerekli kuvvet miktarı düşük olmasına rağmen metal köpük malzemenin akma gerilmesinde belirleyicidir. Basma yükleri altında gözeneklerin plastik şekil değişimi Şekil 4.3 te şematik olarak gösterilmiştir.  $t_e$  kenar uzunluğunu ve  $t_s$  hücre duvarı kalınlığını ifade etmektedir.



Şekil 4.3 Basma yükleri altında gözeneklerin plastik şekil değişimi

Çizelge 4.1 Metal köpük firmalarının ürettikleri köpüklerin mekanik özellikleri (Degischer, 2002)

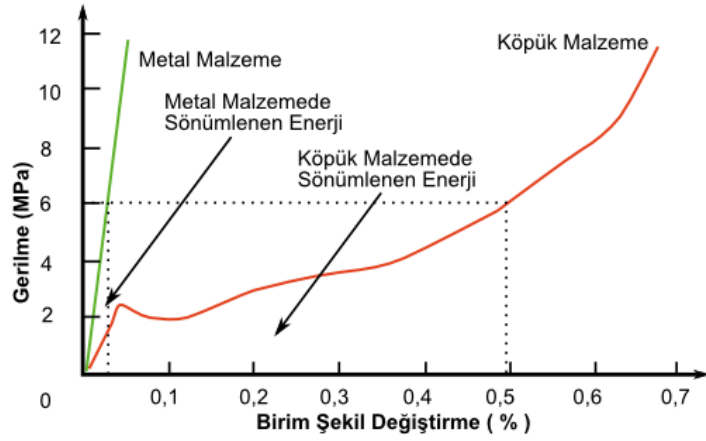
| Özellik                                    | Cymat       | Alulight    | Alporas     |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Malzeme                                    | Al – SiC    | Al          | Al          |
| Bağıl yoğunluk $\rho/\rho_s$               | 0.02–0.2    | 0.1–0.35    | 0.08–0.1    |
| Yoğunluk $Mg/m^3$ , $\rho$                 | 0.07–0.56   | 0.3–1.0     | 0.2–0.25    |
| Elastiklik modülü (GPa), E                 | 0.02–2.0    | 1.7–12      | 0.4–1.0     |
| Kayma modülü (GPa), G                      | 0.001–1.0   | 0.6–5.2     | 0.3–0.35    |
| Hacimsel Elastisite modülü (GPa), K        | 0.02–3.2    | 1.8–13.0    | 0.9–1.2     |
| Poisson oranı $\nu$                        | 0.31 – 0.34 | 0.31 – 0.34 | 0.31 – 0.34 |
| Basma dayanımı (MPa), $\sigma_c$           | 0.04–7.0    | 1.9–14.0    | 1.3–1.7     |
| Çekme dayanımı (MPa), $\sigma_t$           | 0.05–8.5    | 2.2–30      | 1.6–1.9     |
| Sertlik (MPa) H                            | 0.05–10     | 2.4–35      | 2.0–2.2     |
| Tokluk (MPa.m <sup>1/2</sup> ), $K_{IC}^C$ | 0.03–0.5    | 0.3–1.6     | 0.1–0.9     |

### 4.3. Metal Köpüklerin Enerji Sönümlenmesi

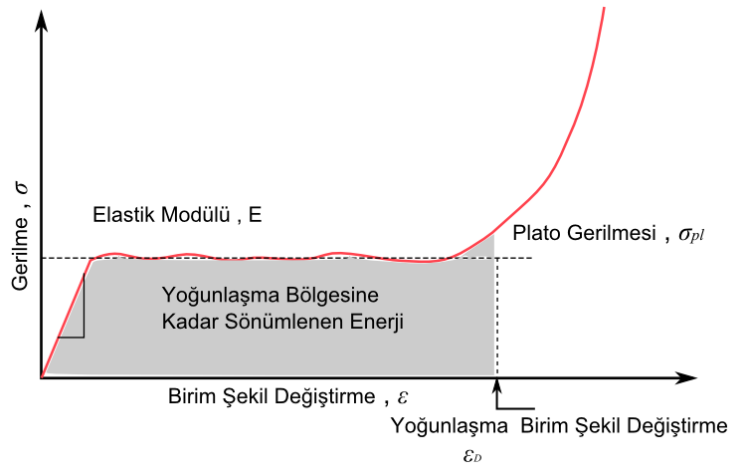
Enerji sönümlenmesi gerektiren uygulamalarda metal köpük kullanımı büyük önem taşımaktadır. Şekil 4.4 de köpük malzeme ile yüksek yoğunluğa sahip malzemenin enerji sönümlenme oranları arasındaki karşılaştırma gösterilmiştir. Gerilim-

Birim şekil değıştirme grafiğinin altında kalan alan metalin enerji sönümlenme kapasitesini göstermektedir. Metal köpüklerde sönümlenen enerji plato bölgesinin altında kalan alanın yoğunlaşma bölgesine kadar olan kısmıdır. (Şekil 4.5.) ve Eşitlik 5 ile ifade edilmiştir.

$$U = \int_0^{\epsilon_d} \sigma d\epsilon \quad (5)$$



Şekil 4.4 Köpük malzeme ve metal malzeme sönümlenen enerjinin karşılaştırılması



Şekil 4.5 Metal köpük malzemelerde sönümlenen enerji miktarı

#### 4.4. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi.

Isıl işlem, malzemelere uygulanan ısıtma ve soğutma sonucunda fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişmesine neden olur. Bu ısıtma ve soğutma işlemleri temel olarak tavlama, çözeltiye alma, yaşlandırma ve soğutma işlemleri gibi kademeleri içermekte olup, alaşımlara kazandırılmak istenilen nihai özelliklere ve kimyasal yapılarına göre çeşitlilik göstermektedir. Alüminyum döküm alaşımları için temper durumu Çizelge 4.2 de verilmiştir.

**Çizelge 4.2 Alüminyum alaşımlarının temper durumları(Erdoğan, 2001)**

| Temper        | Açıklama   |
|---------------|--|
| <b>Durumu</b> |  |
| F             | Döküm den sonraki hal ( Isıl işlemsiz)   |
| O             | Metalin özelliğine göre ısıtılıp soğutulularak sertliğini alma (Kalıntı gerilme giderme) |
| T1            | Fabrikasyon sıcaklığında soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış                       |
| T4            | Çözündürme uygulanmış ve doğal olarak yaşlandırılmış                                     |
| T5            | Fabrikasyon sıcaklığında soğutulmuş ve yapay olarak yaşlandırılmış                       |
| T6            | Çözeltiye alma, su verme ve suni yaşlandırma   |
| T7            | Çözdürme uygulanmış ve aşırı yaşlandırma ile kararlı hale getirilmiş                     |
| T8            | Çözdürme uygulanmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış               |

Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler genellikle yaşlandırma işlemine göre değerlendirilmekte ve sadece mekanik özellikler için değil, elektriksel iletkenlik ve korozyon özelliklerini de belirleyici rol oynamaktadır. Alüminyum alaşımlarının yaşlandırma işlemi uygulanabilirliği Çizelge 4.3'te verilmiştir (Askeland,1990).



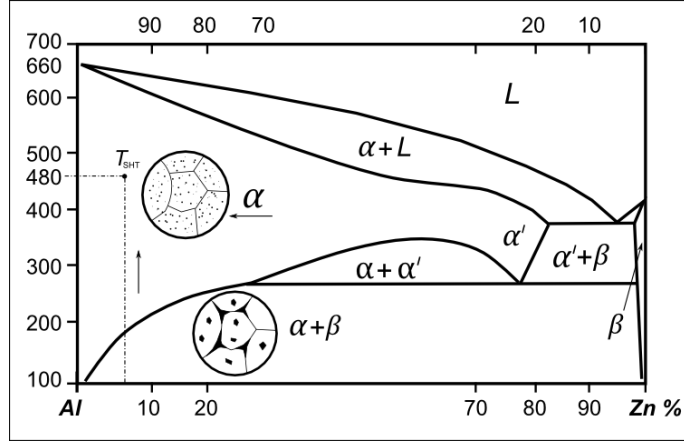
**Çizelge 4.3 Alüminyum alaşımlarının yaşlandırma ısıl işlemine uygunluğu (Askeland,1990)**

| Sınıflandırma | Temel Alaşım Elementi   | Isıl İşlem     |
|---------------|---|----------------|
| 1xxx          | Alaşımlandırılmamış Alüminyum (% 99,0 veya daha yüksek safiyet) | Uygun          |
| 2xxx          | Bakır   | Uygun          |
| 3xxx          | Silis ile Magnezyum ve/veya Bakır                               | Bazıları Uygun |
| 4xxx          | Silisyum  | Uygun Değil    |
| 5xxx          | Magnezyum   | Uygun Değil    |
| 6xxx          | Kullanılmıyor   | -              |
| 7xxx          | Çinko   | Uygun          |
| 8xxx          | Kalay (Tin)   | Uygun          |
| 9xxx          | Kullanılmıyor   | -              |

Isıl İşlemin meydana gelebilmesi için temel olarak üç kademe mevcuttur, bunlar sırasıyla; çözeltili alma, su verme ve çökeltme (yaşlandırma) işlemidir. Aşırı doymuş katı fazın yaşlanma işlemi sonucunda çok ince çökelti fazının dağılımının oluşması mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için temel kuraldır. Bu çökelti fazının oluşumu, doğal olarak gerçekleşebileceği gibi yapay olarak da yapılabilmektedir. Ancak, genellikle alüminyum alaşımlarında doğal yaşlanma ile mekanik özelliklerde çok etkili bir değişim elde edilemez.

#### 4.4.1. Çözeltili Alma İşlemi

Çözeltili alma işleminin amacı, tek fazlı katı çözeltili elde etmektir. İlk sıcaklıkta  $\beta$  ve  $\alpha$  fazı denge halinde değildir. Alaşım solvüs eğrisinin üzerindeki sıcaklığı çıkarılır ve bu sıcaklıkta  $\beta$  fazı,  $\alpha$  fazı (Şekil 4.6) içerisinde tamamen çözününceye kadar işleme tabi tutulur (Askeland,1990). Yapının tümü tamamen  $\alpha$  fazına dönüştükten sonra ani olarak soğutulur. Çözeltili alma sıcaklığı, alaşımın ergimesine sebep olmayacak şekilde seçilmelidir. Bu sıcaklık solvüs eğrisinin üstündedir Şekil 4.6 'da  $T_{SHT}$  ile ifade edilmektedir.  $T_{SHT}$  sıcaklığında bütün bileşenler katı çözeltili tek bir faz halindedir.

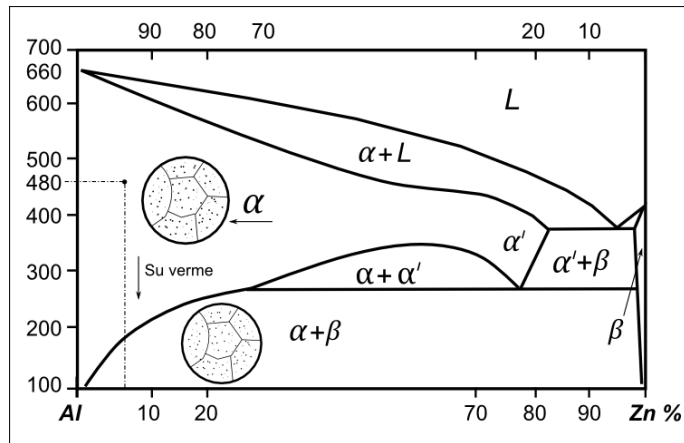


Şekil 4.6 Çözeltiyeye alma işlemi

Çözeltiyeye alma sıcaklığı ve süresi mikro yapıya, parçanın kalınlığına ve fırın kapasitesine göre değişiklik göstermektedir. Bu süre ince levhalar için, dakikalar ile ifade edilirken kesit kalınlığı arttıkça saatler ile belirtilmektedir.

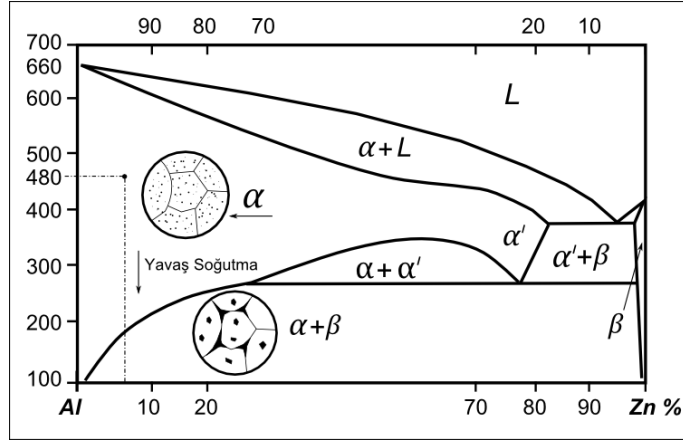
#### 4.4.2. Su Verme İşlemi

Su verme işleminin amacı, alaşımın çözeltiyeye alma sıcaklığından hızlı bir şekilde soğutulmasıdır. Ani soğuma alfa fazı içerisindeki beta fazının çökmesine imkan vermez ve bu nedenle  $\alpha$  fazı artık denge halinden daha fazla katı (aşırı doymuş) içermektedir (Şekil 4.7)



Şekil 4.7 Çözeltiyeye alma işlemi sonucunda tek faz halindeki katı çözelti

Eğer alaşım kendiliğinden (yavaş soğuma) soğumaya bırakılırsa, Beta fazı çekirdeklenerek denge halinde bir  $\alpha+\beta$  fazı oluşturmak için heterojen olarak çökler (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Yavaş soğuma durumunda oluşan heterojen çekirdeklenme

#### 4.4.3. Yaşlandırma İşlemi

Aşırı doymuş katı çözelti içerisinde çözünmüş halde bulunan Beta fazı, Eşitlik 6'da gösterildiği gibi sıcaklık ve zamanın etkisi ile kararlı bir faz olarak çökler.



Bu dönüşüm için, önce  $\beta$  fazının çekirdeklenmesi ve sonra difüzyon ile büyümesi gereklidir. Alaşım eğer ani soğutmadan sonra oda sıcaklığında tutulursa, difüzyon hızı çok yavaş olduğundan  $\beta$  fazı genellikle oluşmaz veya çok uzun sürede oluşur. Çökme, eğer oda sıcaklığında meydana geliyorsa yaşlanma işlemi “doğal”, eğer alaşım yayınma hızını arttırmak için oda sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa tabi tutuluyorsa “yapay” yaşlandırma olarak adlandırılır (Geçkinli,1990).

## 5. LİTERATÜR TARAMASI

Lehmhus ve Banhart (2003) AA6061 alüminyum alaşımından üretilmiş kapalı hücreli köpük numunelere dokuz farklı ısıtma işlem parametresini uygulamış ve ısıtma işleminin mikro sertlik ve basma özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda üretilen köpük numunelerin havada soğutulmasının suda soğutulmasına göre basma özelliklerini arttırdığını ve ısıtma işlem görmemiş köpük numunelere göre %75 basma dayanımlarının arttığını belirlemişlerdir. Mikro sertlik deneylerinde, üretimden sonra suda soğutulmuş köpüklerin havada soğutulmuş metal köpüklere göre sertlik değerlerinin daha iyi olduğunu belirlemişlerdir.

Wang ve arkadaşları (2008) açık hücreli alüminyum köpük malzemelere ısıtma işlemi uygulayarak farklı birim şekil değiştirme oranlarında ( $10^{-3}s^{-1}$  ve  $2000s^{-1}$ ) çarpışma davranışlarını incelemişlerdir. Al-Mg-Si alüminyum köpüklere ısıtma işlem parametresi olarak F-durumunda, yaşlandırma sertleştirilmesi ve T6 durumunu uygulamışlardır. Al-Mg-Si alaşımından yapılmış köpükte ısıtma işleminin etkisi ile dayanım ve enerji sönümleme özelliklerinde kayda değer bir artış olmadığını, farklı tür Al alaşımlarında ısıtma işlem etkinliğinin araştırılmasını önermişlerdir.

Campana ve Pilone (2009) 7075 ve 6061 alüminyum alaşımlarından üretilmiş kapalı hücreli metal köpüklere ısıtma işlemi uygulayarak ısıtma işleminin aksel darbe davranışlarına etkisini incelemişlerdir. 7075 ve 6061 alaşımlarından üretilmiş bütün numunelerin aksel darbe davranışı incelendiğinde, elastik bölgede ve plato bölgesinde ısıtma işlem görmemiş numunelere göre değerlerde artış olduğunu ve enerji sönümleme özelliklerinin arttırdığını belirlemişlerdir.

Koza ve arkadaşları (2003) farklı boyutlarda ve yoğunluktaki kapalı hücre metal köpük numunelerin basma dayanımı özelliklerini incelemişler ve yoğunluk artışı ile basma dayanımının lineer arttığını gözlemişlerdir.

Aly (2007) kapalı hücre metal köpüklerin farklı yoğunluk ve sıcaklıklardaki basma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Köpük yoğunluklarının ve farklı sıcaklıklarının metal köpüklerin elastik, plato ve yoğunlaşma bölgelerini değiştirdiğini belirlemiştir.

Haijun Yu ve arkadaşları (2007) kapalı hücre alüminyum köpüklerin hücre boyutlarının basma özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Hücre boyutlarının belirlenmesinde her köpük numune için aritmetik ortalama metodunu kullanmışlardır ve hücre boyutunun artması ile metal köpüklerin enerji sönümlene kabiliyetinin artırdığını gözlemlemişlerdir.

Sirong Yu ve arkadaşları (2008) birim şekil değiştirme oranının ve  $\text{SiC}_p$ 'ün kapalı hücre metal köpüklerin basma özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Metal köpüklerde akma gerilmesinin, yoğunluğun, şekil değiştirme hızı ile arttığını ve şekil değiştirme hızındaki değişimin akma gerilmeleri üzerinde önemli etkileri olduğunu belirlemişlerdir.  $\text{SiC}_p$  takviyeli köpüklerin Al köpüklere göre aynı şekil değiştirme hızında yapılan denemelerde akma gerilmelerinin daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Mondal (2009) köpürtücü toz olarak  $\text{CaH}_2$  kullanarak kapalı hücre alüminyum köpük üreterek farklı şekil değiştirme hızlarında ( $10^{-2}\text{s}^{-1}$  ve  $10\text{ s}^{-1}$ ) basma özelliklerini incelemişlerdir. Köpüklerin basma karakteristik özelliği olarak lineer elastik bölge, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi olarak üç bölge tanımlamışlardır. Plato bölgesinde şekil değiştirme hızının hassas bir etkisi olmadığını göreceli yoğunluğun deformasyon üzerinde daha etkili olduğunu belirlemiştir.

Esmaelzadeh (2008)  $\text{AlSi7}$  alüminyum alaşımından toz metalürjisinden ürettikleri metal köpüklerin  $\text{SiC}$  etkisi altında basma dayanımı özelliklerini incelemiştir.

SiC'nin köpüğün stabilitesini artırdığını, yapıdaki hücre dağılımını homojen hale getirdiğini ve köpürtücü malzemenin gaz salma sıcaklığını yükselttiğini belirlemiştir. AlSi7/SiC metal köpüğün AlSi7 metal köpüğe göre basma dayanım özelliklerinin daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir.

Luo ve arkadaşları (2007) SiC<sub>p</sub>/AlSi<sub>9</sub>Mg alüminyum alaşımından CaCO<sub>3</sub> köpürtücü tozunu kullanarak değişik oranlarda SiC<sub>p</sub> takviyesi ile metal köpük üretmişlerdir elde ettikleri köpük numunelerin basma dayanımı özelliklerini incelemiştirler. SiC<sub>p</sub> miktarının dayanım özelliklerini artırdığını belirtmektedirler ve oluşan basma eğrisinde AlSi<sub>9</sub>Mg alaşımından üretilen köpüğün grafiğinin daha düzgün bir yapıda olduğunu SiC<sub>p</sub>/AlSi<sub>9</sub>Mg alaşımından üretilen köpüğün grafiğinin ise testere dişi gibi olduğunu belirtmektedirler.

Banhart (1998) metal köpüklerin deformasyon karakteristiklerini belirlemek için çalışma yapmıştır. 7xxx serisi alüminyum alaşımından üretilmiş köpük numunelere köpürme doğrultusunda ve farklı eksenel doğrultularda basma deneyleri yapmıştır. Yaşlandırma sertleştirilmesi uygulayarak metal köpüklerin basma dayanımı özelliklerini incelemiştir. Basma doğrultusunun elde edilen sonuçları değiştirdiği, metal köpüklerin basma dayanımını etkileyen birçok parametre olduğunu, numune yüzeyinin açık veya kapalı olmasının dahi sonuçları etkilediğini bu çalışmasında belirtmiştir

Elbir ve arkadaşları (2003) toz metalürjisi yöntemi ile SiC<sub>p</sub> takviyeli alüminyum köpük üreterek SiC<sub>p</sub> ün metal köpükler üzerindeki etkisini incelemiştirler. SiC<sub>p</sub> ler metal köpüğün lineer genişmesini artırdığını, drenajı azalttığını, gözeneklerin daha homojen bir yapıda olmasını sağladığını ve basma dayanımı özelliklerini artırdığını tespit etmişlerdir.

Yu ve Banhart (1997) metal köpüklere uyguladıkları değişik testlerle akma dayanımı, eğilme dayanımını ve enerji sönümlenme kapasitelerini ölçmüşlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda yoğunluk miktarı arttıkça basma dayanımının arttığını ve basma doğrultusunun basma dayanımını etkilediği belirlemiştirler.

Liu ve arkadaşları (2008) Zn-22Al(ZA22) alüminyum alaşımından ergitme yöntemi ile köpürtücü toz olarak  $\text{CaCO}_3$  kullanarak metal köpük üretmişlerdir. ZA22 alüminyum köpüğün basma davranışlarını incelemişlerdir. ZA22 alaşımından üretilmiş köpüğün plastik deformasyonlarının göreceli yoğunluğun artışı ile artığını ve bu ilişkinin Gibson ve Ashby modeline uyduğunu belirtmektedirler.

Lehmhus ve arkadaşları (2002) ısıtma işlemi uygulanabilir dört farklı alüminyum alaşımına ısıtma işlemi, sertleştirme uygulayarak ve farklı su verme şartlarındaki alüminyum metal köpüklerin basma özelliklerini incelemişlerdir. 6082 ve 7020 alaşımlarından üretilmiş metal köpükler 7075 ve 6061 alaşımlarından üretilmiş köpüklere göre düşük dayanım özellikleri gösterdiğini belirtmişlerdir.

Babcsan (2003) gaz enjeksiyonu ile metal köpük üreterek, köpük üretiminde karakteristik olan parçacık boyutunu, ortam sıcaklığını, hücre duvarlarının yapısını ve enjekte edilen gaz türü gibi parametreleri incelemiştir. Matris alaşımında ve köpürmede sıcaklığın, hücre duvarı kalınlığına etkileyen bir parametre olduğunu, hücre duvarı kalınlığındaki artışın sıcaklık azalması ile artığını ve Si ve Mg elementlerinin eklenmesi ile hücre duvar kalınlıklarında azalma olduğunu belirtmiştir.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve SiC eklenmesi ile hücre stabilitesinin sağlandığını ve hücre duvar kalınlığını artırdığını belirtmiştir.

Banhart (2001) metal köpüklerin üretim yöntemleri, karakterizasyon metotları ve uygulama alanları hakkında genel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma da ergiyikten direkt köpürme ve ön hazırlıklı yöntemleri ayrıntılı olarak açıklamıştır. Üretilen metal köpükler için X-ray, yoğunluk ölçümü, titreşim analizleri gibi karakterizasyon metotlarını ayrıntılı bir şekilde açıklamıştır.

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar dört farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada AlZn5.5MnCu (7075) alüminyum alaşımından takviyesiz ve değişik takviye oranlarında kapalı hücreli kompozit metal köpükler üretilmiştir. Üretilen numunelerden yoğunluk ölçümü ve mekanik deneyler için numuneler çıkarılmıştır. İkinci aşamada üretilen köpük malzemelere T6 ve doğal yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanmıştır. Üçüncü aşamada, köpük malzemenin mekanik özelliklerine, ısıl işlemin ve takviye oranlarının etkilerinin incelenmesi amacı ile basma ve mikro sertlik testleri uygulanmıştır. Son aşamada mikro yapı özelliklerinin belirlenmesi amacı ile numuneler üzerinde mikro yapı ve SEM incelemeleri yapılmıştır.

### 6.1. Malzeme Seçimi

7xxx grubu alüminyum alaşımları diğer alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek dayanım özellikleri gösterirler. Bileşimlerinde bulunan çinko ve magnezyum nedeniyle bu alaşımların ısıl işlem ile dayanım özellikleri artırılabilir. Bu nedenlerle 7075 alüminyum alaşımı matris malzemesi olarak seçilmiştir. 7075 alaşımının kimyasal özellikleri Çizelge 6.1 de, mekanik özellikleri Çizelge 6.2 de ve fiziksel özellikleri Çizelge 6.3 de verilmiştir.

**Çizelge 6.1 7075 alaşımının kimyasal özellikleri**

| Ağırlık %       | Si  | Fe  | Cu  | Mg  | Mn  | Cr   | Zn  | Ti  |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| <b>Minimum</b>  | -   | -   | 1.2 | 2.1 | -   | 0.18 | 5.1 | -   |
| <b>Maksimum</b> | 0.4 | 0.5 | 2   | 2,9 | 0,3 | 0.28 | 6.1 | 0.2 |



**Çizelge 6.2 7075 alaşımının mekanik özellikleri**

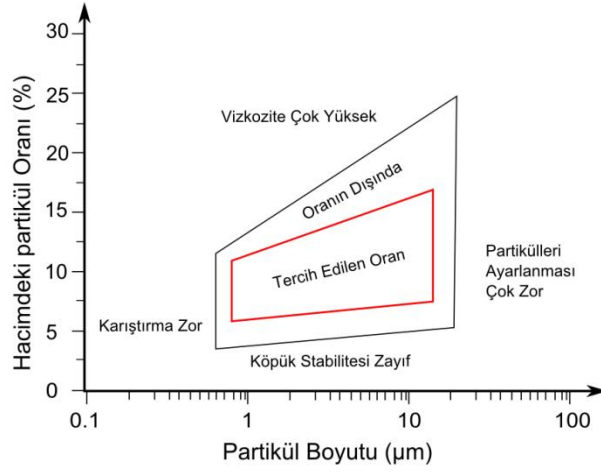
| Isıl İşlem<br>(temper) | Çekme<br>Dayanımı<br>Mpa | Akma<br>Dayanımı<br>$\sigma_{0.2}$ Mpa | Uzama<br>% | Kesme<br>Modülü<br>Mpa | Elastisite<br>Modülü<br>Gpa |
|------------------------|--------------------------|--|------------|------------------------|-----------------------------|
| T651                   | 572                      | 503                                    | 11         | 331                    | 72                          |
| T7351                  | 503                      | 434                                    | 13         | 303                    | 72                          |
| T7651                  | 503                      | 434                                    | 13         | 303                    | 72                          |

**Çizelge 6.3 En AW 7075 alaşımının fiziksel özellikleri**

| Alaşım | Yoğunluk          | Ergime<br>sıcaklığı | Spesifik ısı<br>kapasitesi<br>c | Isı iletim<br>katsayısı | Genleşme<br>katsayısı |
|--------|-------------------|---------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| EN AW  | g/cm <sup>3</sup> | °C                  | J/(kg.°C)                       | W/(m.°C)                | 1/°Cx10 <sup>-6</sup> |
| 7075   | 2.81              | 475-635             | 866                             | 134                     | 23.5                  |

Kompozit alüminyum köpük üretiminde takviye malzemesi olarak, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Ca gibi seramik parçacıklar kullanılmaktadır. Takviye malzemesi olarak kullanılmasının yanında viskoziteyi artırma etkisinden dolayı da tercih edilmektedirler.

Bu çalışmada kompozit köpük üretiminde takviye malzemesi olarak, matris malzemesine iyi karıştırıldığı durumda dayanım özelliklerini arttırdığı, ucuz ve kolay temin edilebilir olduğu için SiC parçacıkları seçilmiştir. SiC fiziksel özellikleri Çizelge 6.4 verilmiştir. SiC' ler ortalama 12 µm (500 mesh) tane büyüklüğüne sahip yeşil renktedir. Takviye oranları ve takviye boyutlarının seçiminde literatürde önerilen değerler kullanılmıştır (Şekil 6.1) (Banhart, 2002). Çizelge 6.5 te deneysel çalışma için seçilen SiC parçacıklarının özellikleri verilmiştir.



Şekil 6.1 Takviye oranları ve takviye boyutlarının seçimi (Banhart, 2002)

Çizelge 6.4 SiC parçacıklarının fiziksel özellikleri

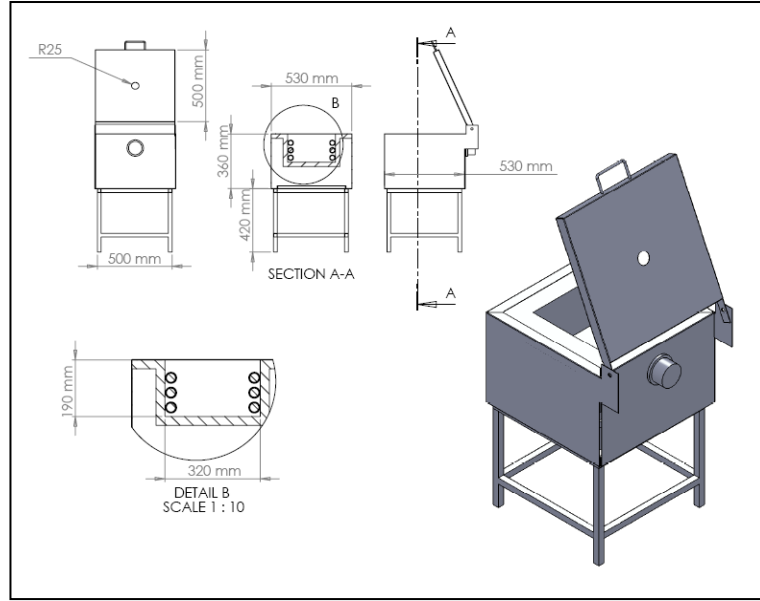
| Parçacık Tipi  | SiC     |
|--|---------|
| Kristal Tipi   | Hex.    |
| Ergime Derecesi [ $^{\circ}\text{C}$ ]               | 2300    |
| Elastik Modülü [GPa]                                 | 480     |
| Yoğunluk [ $\text{g cm}^{-3}$ ]                      | 3.21    |
| Isı İletkenliği [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]    | 59      |
| Termal genleşme katsayısı [ $10^{-6}\text{K}^{-1}$ ] | 4.7-5.0 |

Çizelge 6.5 SiC parçacıklarının özellikleri

| Ürün     | Tane iriliği | %SiC | % Serbest C | %Si  | %SO <sub>2</sub> | %Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|----------|--------------|------|-------------|------|------------------|---------------------------------|
| GW Micro | F500         | 99.5 | 0.10        | 0.10 | 0.10             | 0.05                            |

## 6.2. Ergitme Fırını ve Ekipmanları

Yarı katı halden doğrudan köpürtme ile alüminyum kompozit köpük üretiminin yapılabilmesi için ergitme fırını imal edilmiştir (Şekil 6.2).



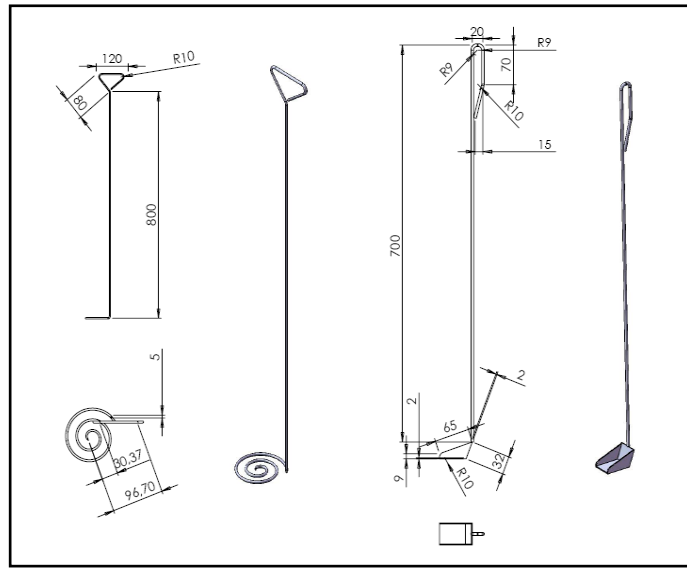
Şekil 6.2 Metal köpük fırını

Alüminyum kompozit köpük malzeme hazırlama ünitesi bir fırın, karıştırma aparatları, pota, azot tüpü ve ısı kontrol birimlerinden oluşmaktadır. Hazırlanan ünite, fırın atmosferinin daha kolay kontrolünü sağlamak amacı ile mümkün olan en küçük iç hacim ölçüleri seçilmiştir. Refrakter tuğla ve refrakter harç ile hazırlanan fırın iç cidarının dışı 40 mm gaz beton tuğlalar ile çevrelendikten sonra seramik battaniye ile kaplanmıştır. İmal edilen ergitme ünitesinde aşağıdaki özellikler sağlanmıştır.

- Sıcaklık kontrolü
- Isıtma hızı kontrolü
- Azot gazı koruyucu atmosferi
- Gözlem ve karıştırma penceresi
- 1200°C Maksimum sıcaklık

Fırın ve metal sıcaklığının kontrolü termostat ve iki adet termokupul (K-tip) yardımıyla sağlanmıştır.

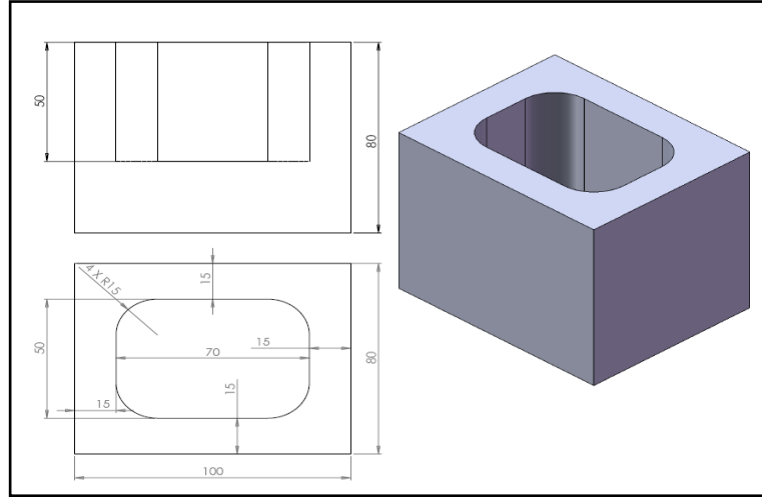
Takviyelerin matris malzemesine yarı katı sıcaklık aralığında karıştırılabilmesi için ve karışımın kalıplara aktarılması için yardımcı aparatlar yapılmıştır. Bu aparatlar çelik çubuklardan ve çelik saçtan yapılmıştır (Şekil 6.3) .



Şekil 6.3 Karıştırma aparatları

### 6.3. Metal Köpük Kalıpları

Kalıp malzemesi olarak ısı iletkenliği düşük olan gaz beton seçilmiştir. Yapılan deneme üretimlerinde metal ve grafitten hazırlanan kalıplar, yüksek ısı iletim katsayılarından dolayı yarı katı durumdaki malzemenin sıvılaşmasına yol açarak köpük oluşumunu engellediği görülmüştür. Kalıplar 80x80x100 mm dış, 50x50x70 mm olacak şekilde oluşturulmuştur.( Şekil 6.4)



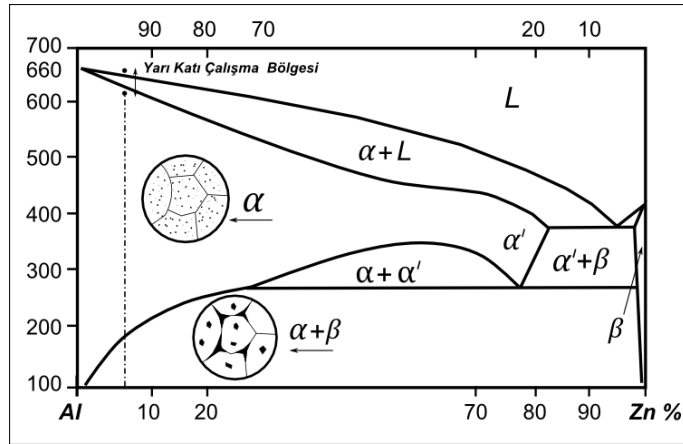
**Şekil 6.4 Metal köpük kalıpları**

#### **6.4. Kapalı Hücre Kompozit Alüminyum Köpüklerin Üretilmesi**

Kompozit malzemelerin sıvı karıştırma yöntemi ile üretilmesinde, takviye malzemesinin ergiyik dışına itilmesi, potanın dibinde veya potanın üzerinde toplanması, takviye malzemesinin topaklanması ve matris malzemesi tarafından ıslatılmaması, homojen karışım sağlanamaması gibi problemler ile karşılaşılmaktadır. Bu problemleri en aza indirmek amacı ile 7075 alaşımdan kompozit köpük üretiminde yeni geliştirilen doğrudan yarı katı karıştırma yöntemi kullanılarak takviye malzemelerinin istenilen oranda matris malzemesine karıştırılabilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada, kompozit alüminyum köpük üretimi için kullanılan yöntemlerde değişikliğe gidilerek farklı bir üretim yöntemi geliştirilmiştir. Yarı katı haldeki alüminyum alaşımına takviye malzemesi ve köpürtücü tozlar doğrudan katılarak kısa bir karıştırma işleminden sonra köpürmesi sağlanmıştır. Köpük üretiminde malzemeye istenen özelliklerin kazandırılmasında etkili çok sayıda parametre vardır. Karıştırma aşamasında, atmosfer şartları, takviye tane boyutları, takviye miktarı, köpürtücü tozların karışım oranı, tane boyutları, takviyenin ıslatılabilme özellikleri, karıştırma süresi, karıştırıcının yapısı, karışımın döküm sıcaklığı, kalıp malzemesi, katılma şartları, belirlenmesi ve kontrol edilmesi gereken değişkenlerdir.

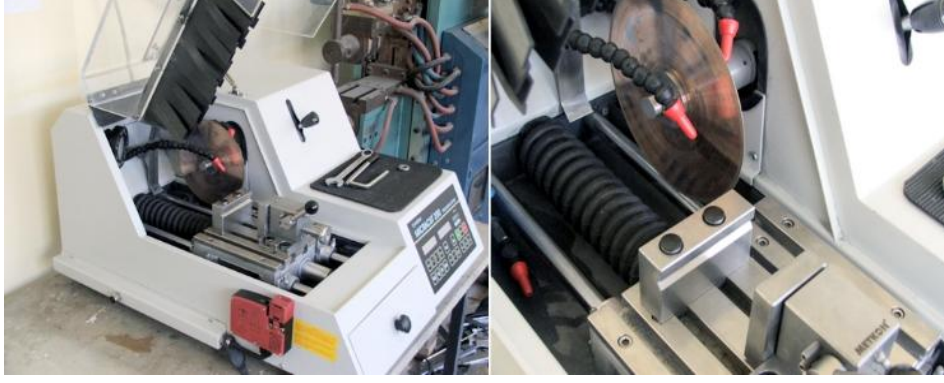
Köpük malzemenin imalatında, takviye malzemesi SiC (%5, %10, %15 ,%20 oranlarında) ve köpürtücü toz  $TiH_2$  (%0.5) yarı katı sıcaklık aralığında (Şekil 6.5) bulunan matris malzemesine ilave edilmiş ve kontrollü bir şekilde karıştırılarak yarı katı halde kalıplara alınarak fırın içinde köpürtülmüştür.



Şekil 6.5 7075 Alüminyum malzeme için yarı-katı sıcaklık bölgesi

### 6.5. Deney Numunelerinin Hazırlanması

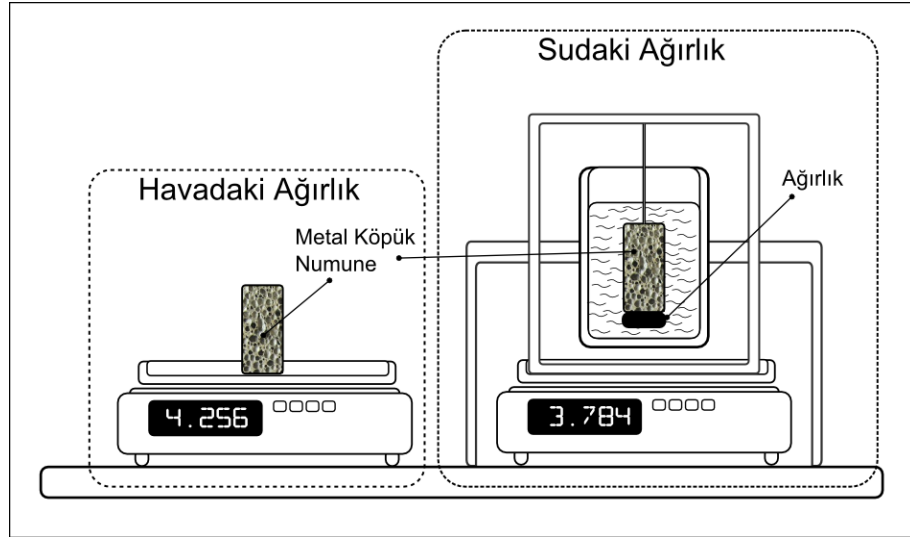
Her takviye oranı için iki kalıp üretilmiştir ve her kalıp altı adet basma numunesi çıkacak şekilde boyutlandırılmıştır. Üretilen kompozit köpüklerden yoğunluk ölçümleri, ısıl işlem ve diğer mekanik deneyler için numuneler çıkarılmıştır. Numune hazırlama işlemlerinde, köpük yapısı bozulmadan düzgün yüzeyli numuneler hazırlanabilecek, 0.5 mm kalınlığında elmas kesici diske sahip Mikrocut 200 hassas kesme cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.6)



Şekil 6.6 Hassas kesme cihazı

## 6.6. Yoğunluk ölçümü

Köpük malzemelerin yoğunluklarının ölçümü Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Tartım işlemleri 1/1000 g hassasiyete sahip terazi ile yapılmıştır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 Yoğunluk ölçümü

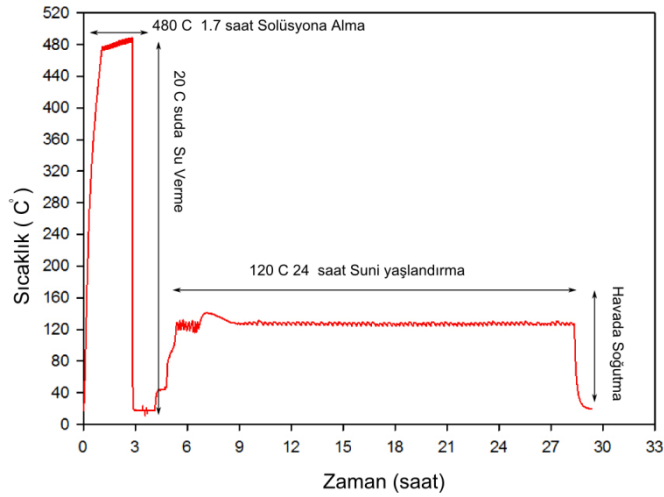
## 6.7. Alüminyum Kompozit Köpüklerin Isıl İşlemi

Üretilen kompozit köpüklere, EN AW 7075 alüminyum alaşımlarına uygulanan standart T6 ve doğal yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ısıl işlem prosesi çizelge 6.7 de verilmiştir.

**Çizelge 6.6 Isıl işlem prosesi**

| Yaşlandırma işlemi     | Proses   |
|------------------------|--|
| T6                     | 480 °C de 1.7 saat çözeltiye alma, oda sıcaklığında suda su verme ve 120 °C 24 saat suni yaşlandırma, havada yavaş soğutma |
| T1 (Doğal Yaşlandırma) | 20 °C de 22 gün bekleme  |

Isıl işlem için mevcut köpük üretim fırını kullanılmıştır. Uygulanan ısıl işlem sürecini kontrol etmek için fırının içine numunelere temas edecek şekilde K-tipi termokupullar yerleştirilmiş ve elde edilen ölçüm sonuçları veri toplama cihazı üzerinden kaydedilerek ısıl işlemin süreci takip edilmiştir (Şekil 6.8)



**Şekil 6.8 Isıl işlem süreci**

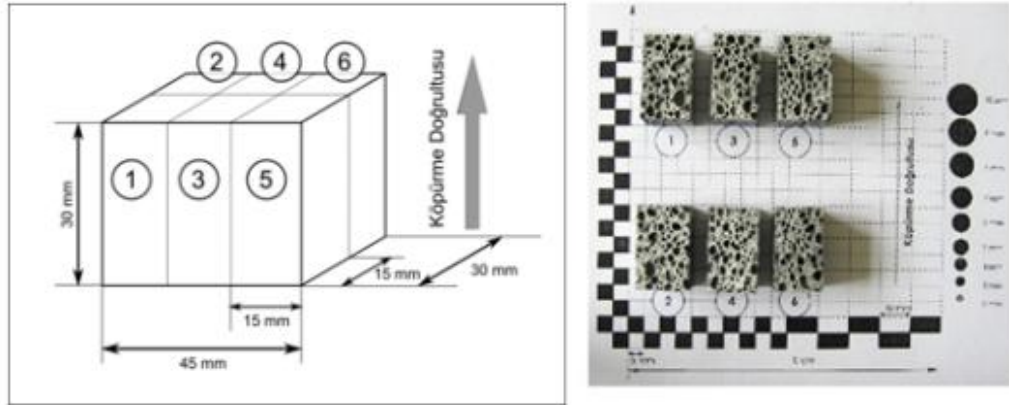


## 6.8. Mikro Sertliklerin Ölçülmesi

Isıl işlemin ve doğal yaşlandırmanın metal köpüklerin mikro sertliği üzerindeki etkisini incelemek amacı ile 15x15 mm kare kesitli numuneler hazırlanmıştır. Her bir numune bakalite alınmıştır. Vickers sertlik ölçüm metodunda HV 0.2 test yükü ve 1.961 N test kuvveti uygulanmıştır. Her bir numuneden 6-8 noktadan ölçüm alınmıştır.

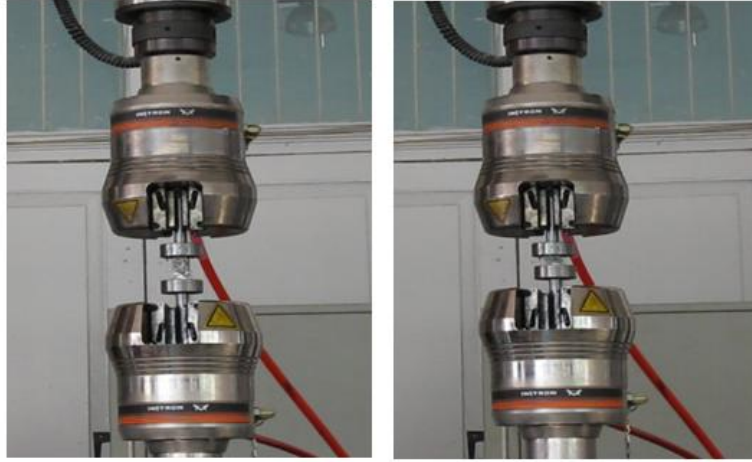
## 6.9. Alüminyum Kompozit Köpüklerin Basma Testleri

Kompozit köpüklerden, 15x15x30 mm boyutlarında standart basma numuneleri çıkarılmış, yoğunluk ve takviye oranlarına göre sınıflandırılmıştır (Şekil 6.9)



Şekil 6.9 Basma numunelerinin hazırlanması

Basma deneyleri, Instron 8501 universal test makinesi kullanılarak köpürme yönünde 5 mm/ dakika ilerleme hızında %70 şekil değişimi elde edilene kadar uygulanmıştır (Şekil 6.10).



**Şekil 6.10 Kompozit köpük basma testi**

## 6.10. Mikro yapı incelemeleri

Kompozit malzemelerde metalografik incelemeler için numune hazırlama işlemi, yumuşak matris fazı ile beraber sert takviyelerin birlikte parlatılma zorunluluğu olan bir işlemdir. Takviye ile matris fazını aynı düzleme getirmek, takviye parçacıklarını yerinden oynatmadan veya sökmeden bu işlemi gerçekleştirmek, parlatma ve temizleme işlemleri sırasında hücre duvarlarının zarar görmesini engellemek için numuneler bakalite alınmış ve gerekli işlemler daha sonra yapılmıştır. Numuneler sırasıyla 280, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000 ve 4000 Mesh SiC zımparasından geçirildikten sonra yine sırası ile uygun keçeler kullanılarak 6 $\mu$ m, 3 $\mu$ m, 1 $\mu$ m diamond paste ile parlatılmış, en son koloidal silika ile parlatılarak mikro yapı incelemeleri için hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde, gözenek dağılımının homojen olup olmadığı, takviye malzemelerinin hücre duvarlarında meydana getirdiği değişiklikler ve ısıl işlemin etkileri optik laboratuvar mikroskobu ve yarı niceleyici elementsel analiz sistemine sahip, JOEL-FEG-SEM / INCA/ EDS tarama elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

## 7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

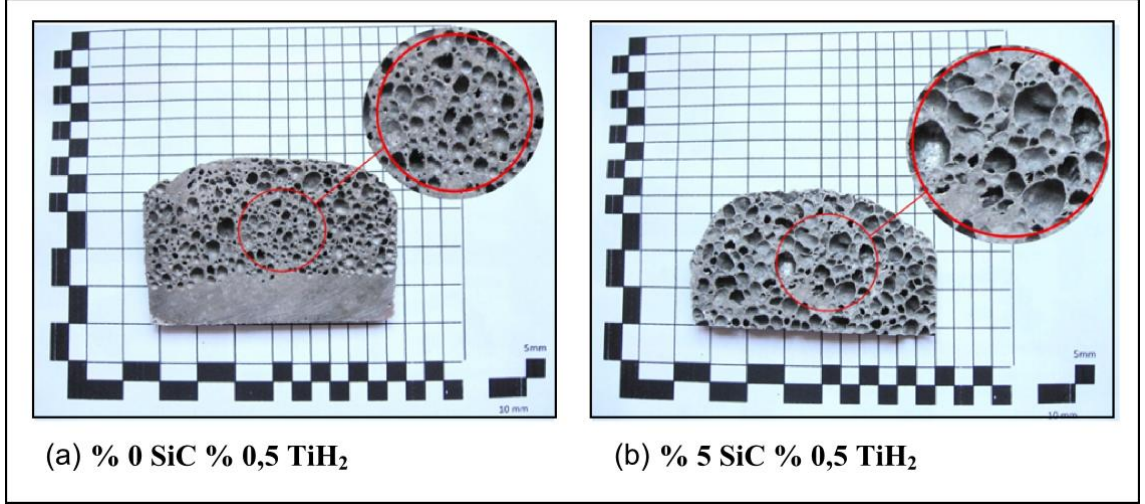
### 7.1. Kapalı Hücre Kompozit Köpük Üretimi

Doğrudan yarı-katı köpürtme yöntemi kullanılarak farklı takviye oranlarında AlZn5.5MgCu kompozit köpük malzemeler üretilmiştir. Takviye malzemesi SiC (ağırlıkça) %20 oranına kadar sorunsuz bir şekilde yarı katı aralıkta matris malzemesine karıştırılmıştır. Şekil 7.1 de kalıp içinde ve kalıptan çıktığı hali ile köpük numune gösterilmiştir.



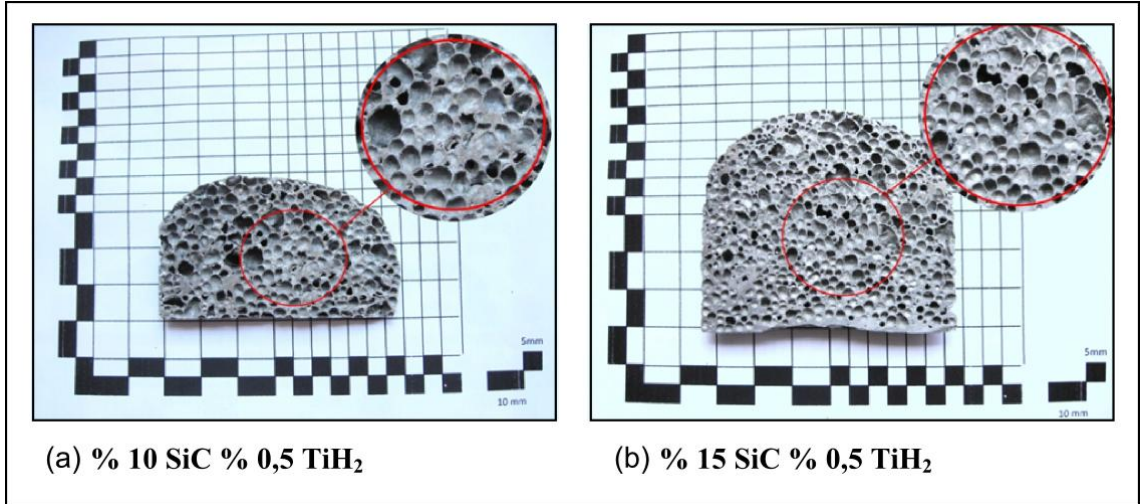
Şekil 7.1 Köpürtme işleminden çıkmış numuneler

Takviye malzemesi kullanılmadan üretilen köpük numunelerde drenaj oluştuğu, hücre boyut ve dağılımının kontrol edilemediği ve lineer genişlemenin takviye malzemesi kullanılarak elde edilen köpüklere göre daha az olduğu gözlenmiştir. (Şekil 7.2a) Takviye malzemesi kullanılmadan yapılan köpük üretim işleminde, gözeneklerin yukarı doğru hareketini engelleyecek takviye olmadığından alt kısımlarda gözeneksiz bölgeler oluşturmakta, hücre duvarları yeterli dayanıma sahip olmadığından oluşan gaz basıncına dayanamamakta ve gözenekler birleşerek homojen olmayan bir yapı oluşturmaktadır.



Şekil 7.2 a) Takviyesiz köpük numune. b) %5 SiC takviyeli numune.

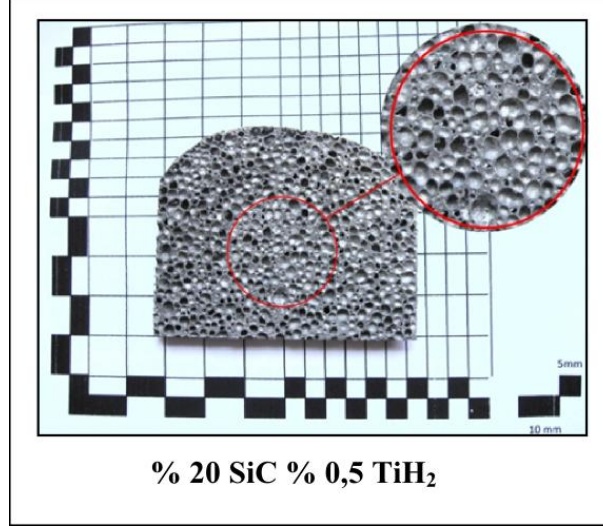
Köpük malzemeye katılan takviye oranı artıkça drenaj oluşumu ortadan kalkmakta ve daha homojen boyutları birbirine yakın gözenekli yapı oluşmaktadır. (Şekil 7.3a-7.3b).



Şekil 7.3 a) %10 SiC takviyeli numune. b) %15 SiC takviyeli numune.

Şekil 7.4 te %20 SiC takviyeli kompozit köpük malzemenin lineer genişmesinin daha fazla olduğu, %10 ve %15 SiC takviyeli kompozit köpük malzemelerde olduğu gibi drenaj bölgesinin oluşmadığı ve homojen, boyutları birbirine

yakın gözenekli yapı gözlenmiştir. Hücre duvarlarına yerleşen  $\text{SiC}_p$  parçacıkları dayanımı artırdığından hücreler birleşmemiş ve birim hacimde nispeten küçük ve çok sayıda gözenek oluşumu gözlenmiştir.



Şekil 7.4 %20 SiC takviyeli numune

## 7.2. Yoğunluk ölçüm sonuçları

Takviye oranındaki artış ile köpük yoğunluğunda azalma meydana gelmiştir. Takviye artması ile matris malzemesinin viskozitesi artmaktadır, karışım içindeki takviye malzemesi gaz çıkışı sırasında oluşan hücre duvarını sararak gaz kaçışlarını engellemekte ve daha düzenli homojen hücelere sahip yapılar oluşturmaktadır. Dolayısı ile takviye oranındaki artış ile daha fazla hücreye sahip yapılar meydana gelmektedir ve bu etkiden dolayı yapının yoğunluğu azalmaktadır. Hazırlanan tüm numunelerin yoğunluk ve göreceli yoğunlukları Çizelge 7.1 de verilmiştir.

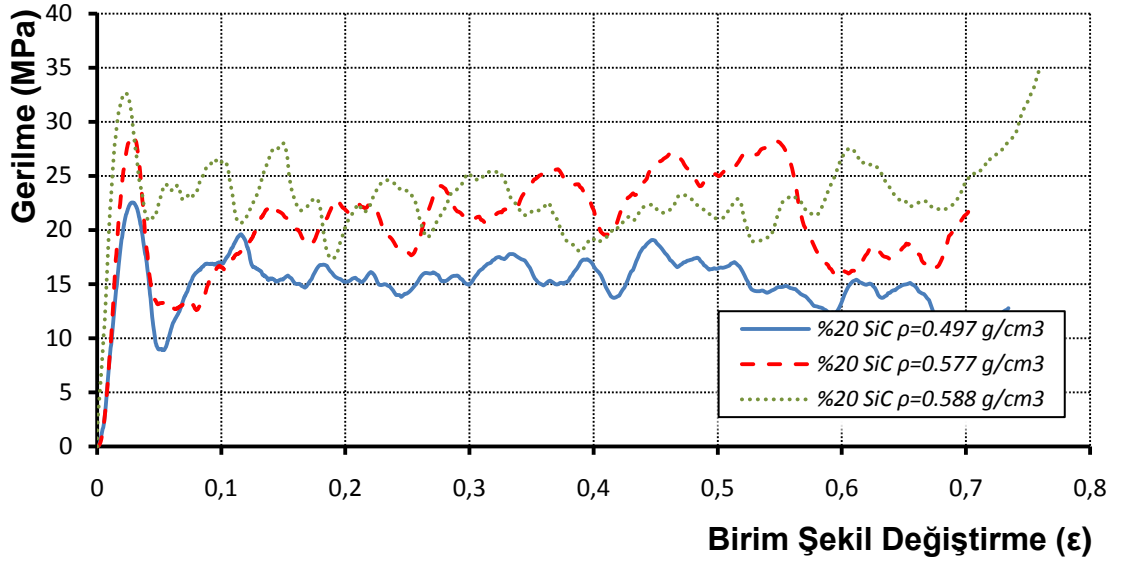
**Çizelge 7.1 Numune yoğunlukları ve göreceli yoğunlukları**

| Takviye                          | T6                               |                      | Doğal Yaşlandırılmış             |                      |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|
|                                  | Yoğunluk<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Göreceli<br>yoğunluk | Yoğunluk<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Göreceli<br>yoğunluk |
| <b>%20 SiC</b><br><b>7075 Al</b> | 0.549 ±0.043                     | 0.198 ±0.016         | 0.568 ±0.004                     | 0,204 ±0.002         |
| <b>%15 SiC</b><br><b>7075 Al</b> | 0559 ±0.025                      | 0.202 ±0.009         | 0.625 ±0.035                     | 0.226 ±0.013         |
| <b>%10 SiC</b><br><b>7075 Al</b> | 0.510 ±0.015                     | 0.186 ±0.005         | 0.548 ±0.009                     | 0.199 ±0.003         |
| <b>%5 SiC</b><br><b>7075 Al</b>  | 0.796 ±0,010                     | 0.291 ±0.004         | 0.801 ±0.031                     | 0.293 ±0.011         |
| <b>%0 SiC</b><br><b>7075 Al</b>  | 0.787 ±0.013                     | 0.292 ±0.005         | 0.775 ±0.021                     | 0.287 ±0.008         |

### 7.3. Basma Deneyi Sonuçları

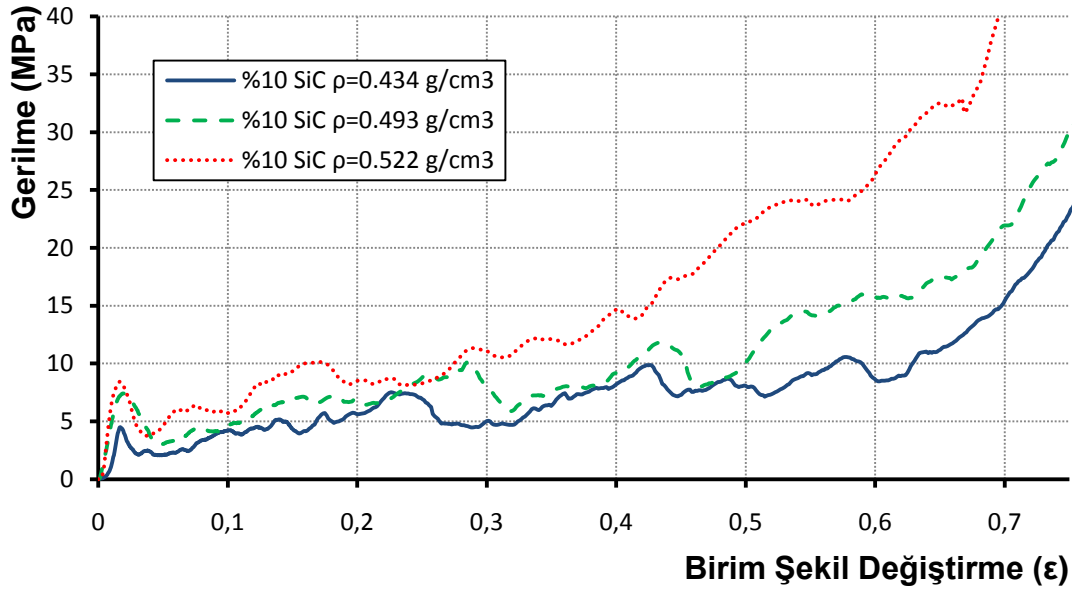
Metal köpüklerin basma yükleri altında karakteristik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri vardır. Bu eğri üzerinde Lineer elastik deformasyon bölgesi, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi olmak üzere üç farklı bölge gözlenmiştir.

Yapılan basma deneyleri sonucunda yoğunluğun akma gerilmesi değerleri üzerinde etkili olduğu, köpük malzemenin yoğunluğunun artması ile akma gerilmesi değerinin arttığı gözlenmiştir. % 20 SiC takviyeli malzemelerin akma gerilmesi değerlerinin yoğunluk ile değişimleri Şekil 7.5 te gösterilmiştir



Şekil 7.5 %20 SiC takviyeli, aynı ısıl işlem uygulanmış, farklı yoğunluklara sahip numuneler

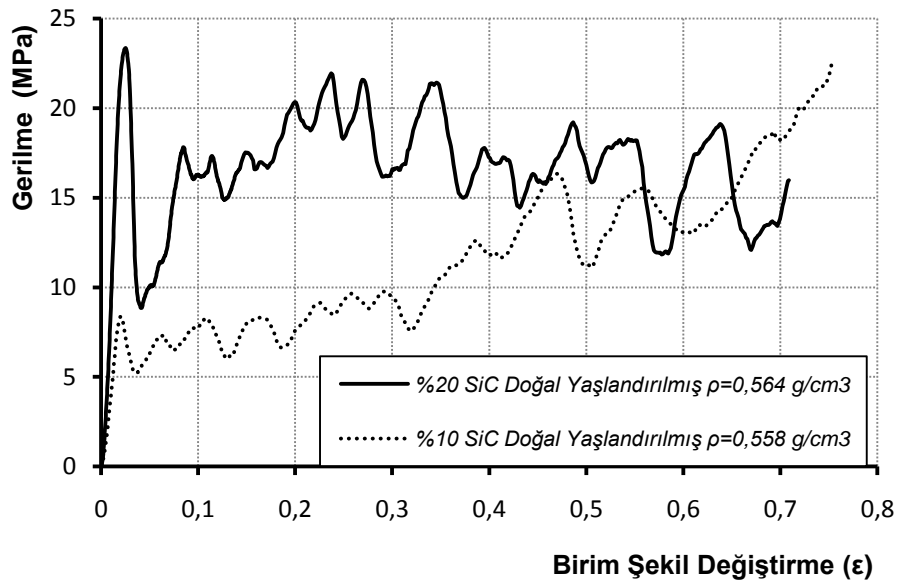
Aynı karşılaştırma %10 SiC takviyeli köpük numunelerle yapılmış ve şekil 7.6 da gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi akma dayanımı değerleri yoğunluk azaldıkça düşüş göstermektedir.



Şekil 7.6 %10 SiC takviyeli aynı ısıl işlem uygulanmış yoğunlukları farklı numuneler

#### 7.4. SiC<sub>p</sub> Oranının Basma Dayanımına Etkisi

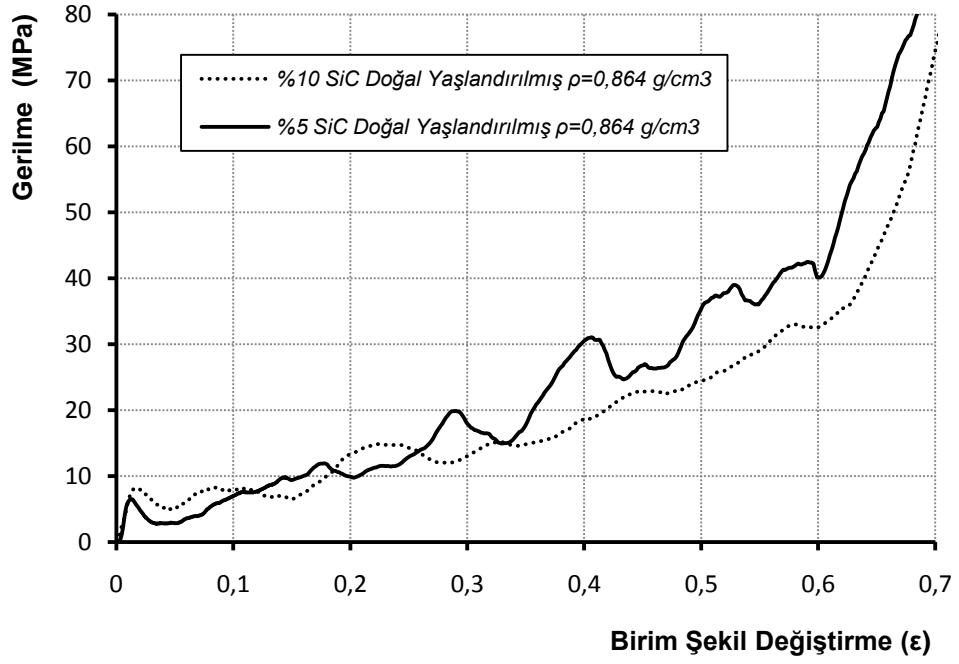
SiC<sub>p</sub> parçacıklarının etkisini gözlemlemek için yaklaşık aynı yoğunluğa sahip farklı takviye oranlarındaki numunelerin basma eğrileri kıyaslanmıştır. Şekil 7.7 da doğal yaşlandırılmış %20 SiC takviyeli numunelerle %10 SiC takviyeli numunelerin basma grafiği görülmektedir.



Şekil 7.7 SiC takviye malzemesinin basma dayanımına etkisi

Takviye edilen SiC miktarı arttıkça malzemenin akma dayanımı artmakta, hücreler daha yüksek gerilmelere dayanabilmekte ancak malzemenin kırılabilirliğinin artmasından dolayı basma işlemi sırasında hücre duvarları kırılarak çökmektedir. %20 SiC takviyeli numunede plato bölgesindeki gerilme değişimi testere dişi şeklinde bir yapı göstermekte takviye oranı %10 dan % 5 düştüğünde hücrelerin plastik şekil değiştirerek plato bölgesindeki gerilmelerin daha yumuşak bir şekilde değiştiği görülmektedir (Şekil 7.8).

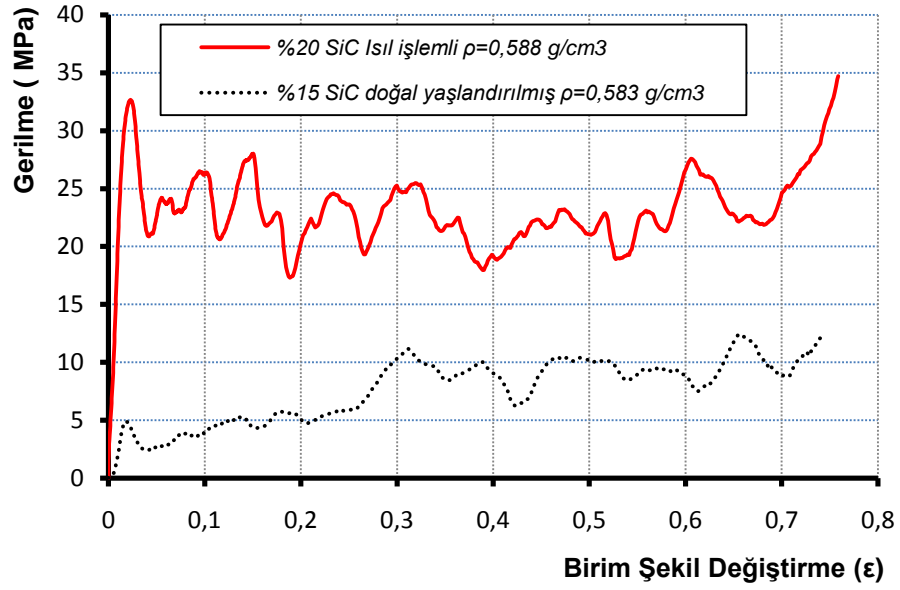




Şekil 7.8 SiC takviye oranının plato gerilmesine etkisi

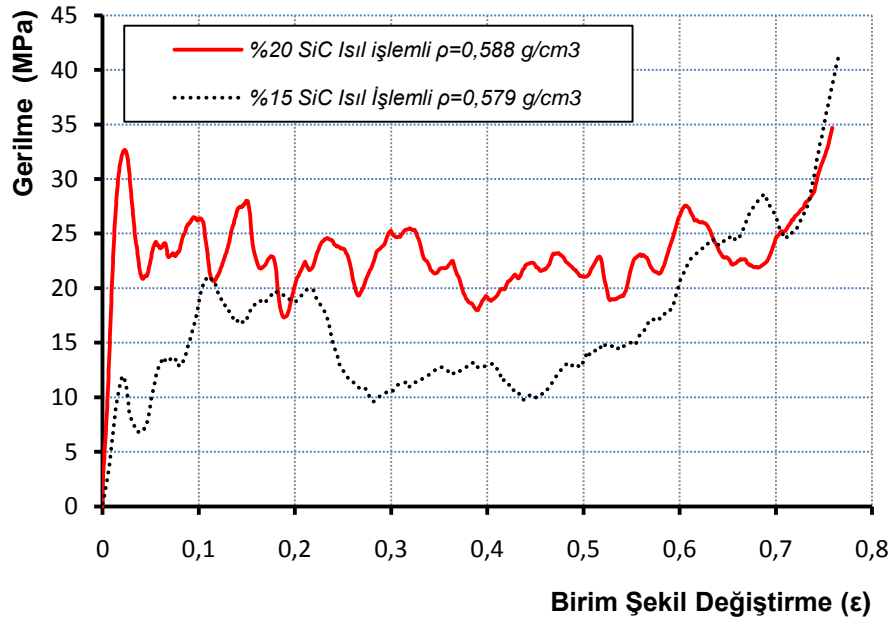
### 7.5. Isıl İşlemin Basma Dayanımına Etkisi

Isıl işlemin kompozit köpüklerin basma davranışı üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak amacı ile yoğunlukları yaklaşık olarak aynı olan takviyesiz ve takviyeli numunelere T6 ve doğal yaşlandırma işlemi yapılarak karşılaştırılmıştır. Isıl işlemin metal köpüklerin akma gerilmesi değerini yükselttiği plato bölgesi boyunca gerilme değişiminin yaklaşık olarak sabit kaldığı gözlenmiştir (Şekil 7.9) .



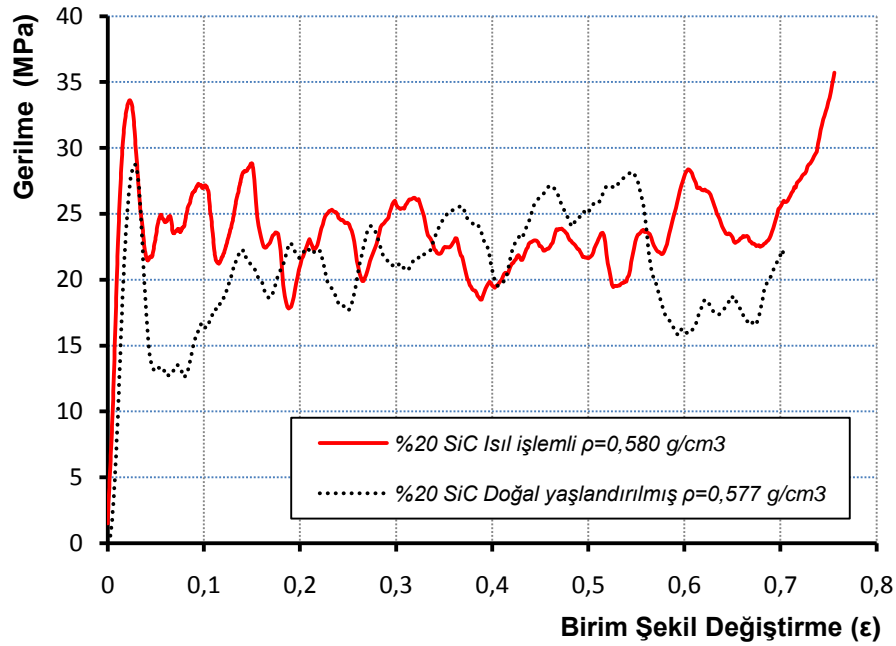
Şekil 7.9 Isıl işlemlı ve doğal yaşlandırılmış numunelerin basma grafikleri

%20 takviyeli ve %15 takviyeli doğal yaşlandırılmış numune karşılaştırıldığında plato gerilmeleri arasında yaklaşık 7 kat fark gözlenmiştir. %20 takviyeli ısıl işlemlı numune ile %15 takviyeli ısıl işlemlı numunelerin basma grafikleri karşılaştırıldığında akma gerilmeleri arasında yaklaşık 3 kat fark gözlenmiştir (Şekil 7.10).



Şekil 7.10 Isıl işlemlı farklı takviye oranlarına sahip numunelerin basma grafikleri

SiC takviye oranındaki artış malzemenin dayanımını artırmakta fakat aynı zamanda malzemeyi gevrekletirmektedir. Bununla beraber yapılan ısıl işlemin etkisi ile malzeme daha gevrek davranış göstermektedir. Bu etkilerden dolayı ısıl işlemin yüksek takviye oranlarında hücre duvarlarını destekleyici etkisi azalmaktadır. Farklı ısıl işlem uygulanmış takviye oranı ve yoğunlukları aynı numunelerin karşılaştırılması Şekil 7.11 de gösterilmiştir.

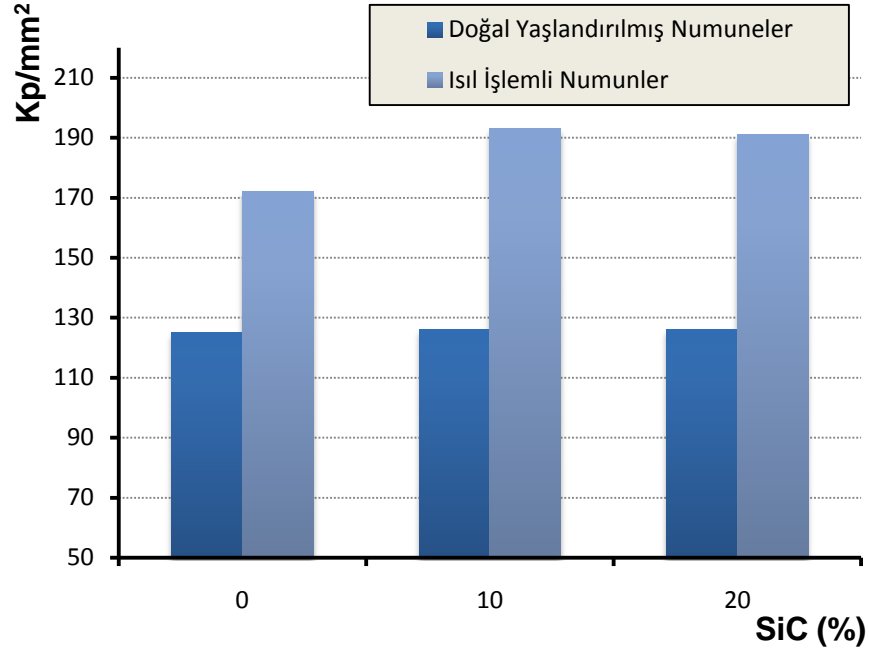


Şekil 7.11 Isıl işlemin basma özelliklerine etkisi

## 7.6. Isıl İşlemin ve Takviye Oranının Mikro Sertlikler Üzerinde Etkisi

Isıl işlemin metal köpük malzemelere etkisini görmek amacı ile mikro sertlik testleri uygulanmıştır. Mikro sertlik ölçümleri matris fazı üzerinden alınmıştır. Doğal yaşlandırılmış numunelerde takviye artışının mikro sertlik üzerinde bir etkisi yoktur. T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerde takviye artışı ile mikro sertlik artışı olduğu görülmüştür. Isıl işlem etkisi ile SiC parçacıkları etrafında silis çökeltileri oluşarak matris fazın sertliğini artırmıştır. Takviye oranı artışı ile SiC parçacıklarının hücre

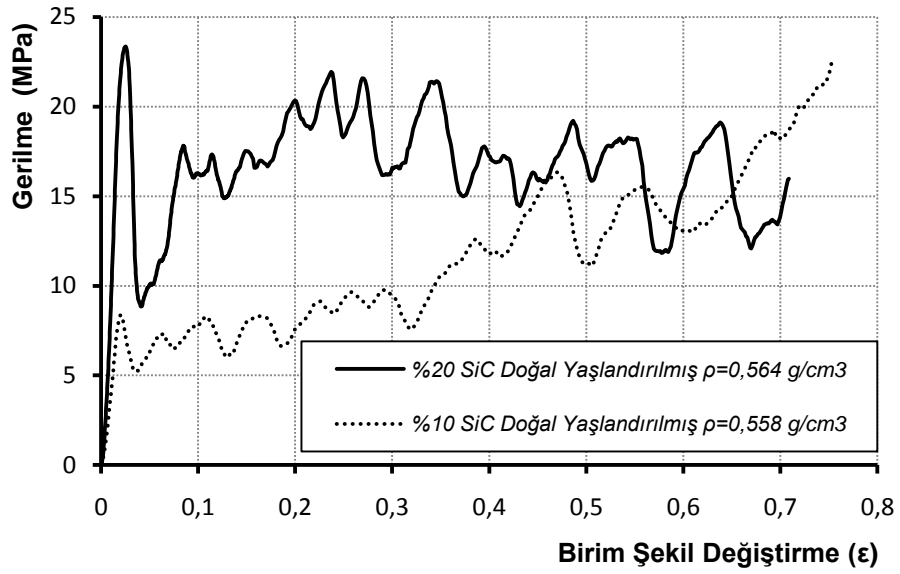
duvarlarındaki yoğunluğunu artırdığı için silis çökeltilerinde oranı artmıştır bu sebepten dolayı matris fazının sertliği artış göstermiştir(şekil 7.12).



Şekil 7.12 Isıl işlemin mikro sertlikler üzerine etkisi

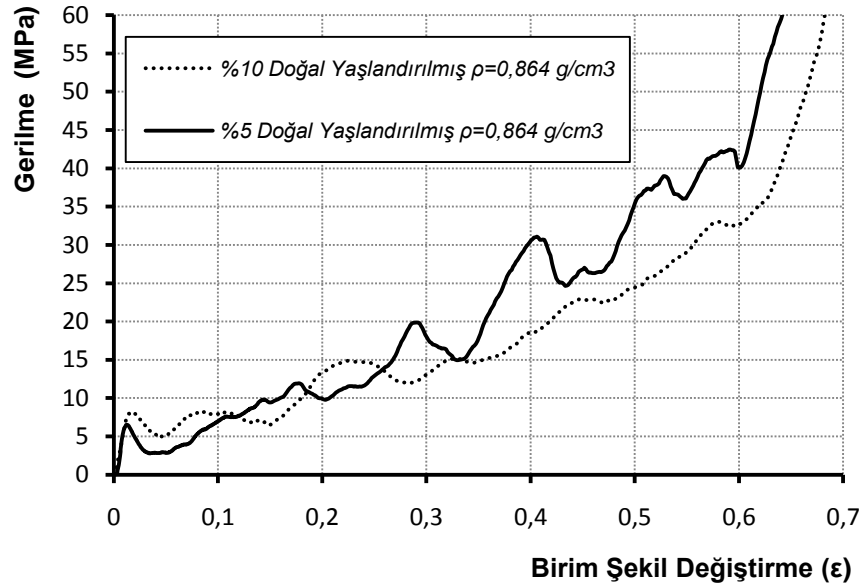
### 7.7. SiC Takviye Oranının Enerji Sönümlenme Kapiliyeti Üzerine Etkisi

Metal köpüklerin enerji sönümlenme kapasitesi, basma eğrisinin elastik bölge sınırı ile yoğunlaşma başlangıç sınırı olarak kabul edilen %50 şekil değişimi arasında kalan plato bölgesinin alanı hesaplanarak bulunmaktadır. Şekil 7.13 te farklı takviye oranına sahip ve yaklaşık aynı yoğunluklardaki doğal yaşlanmış numunelerin basma eğrilerinin karşılaştırılması görülmektedir. Takviye oranının artışı ile malzemenin akma dayanımı artmakta dolayısı ile enerji sönümlenme kapasitesi de artmaktadır.



Şekil 7.13 %20 ve %10 takviyeli metal köpüklerde enerji sönümleme kabiliyeti

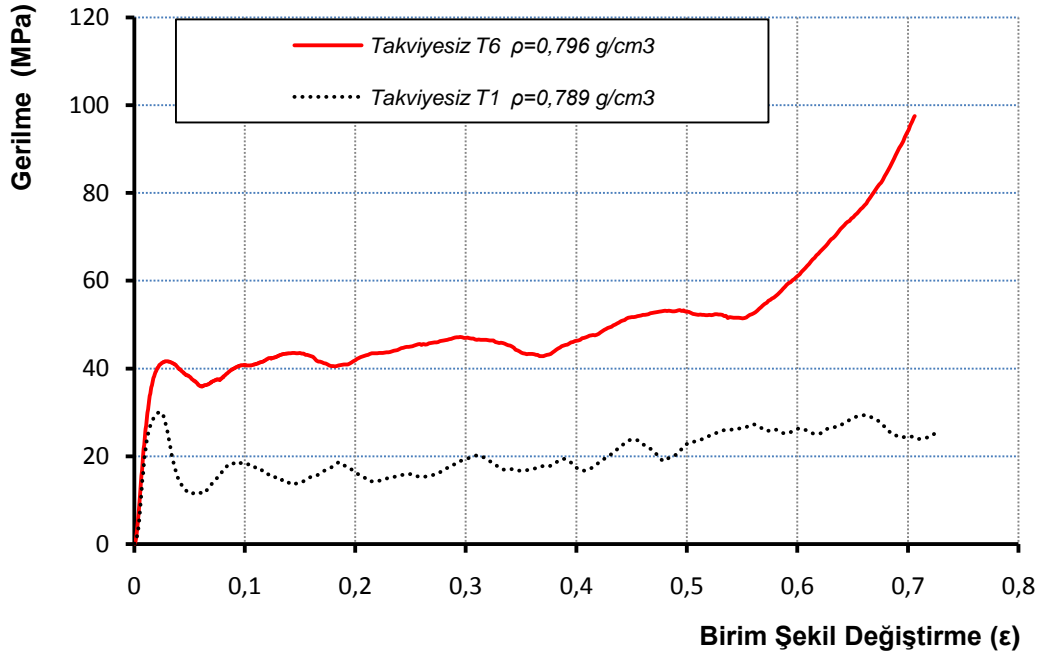
%20 SiC takviyeli numunenin %10 SiC takviyeli numuneye göre yaklaşık %45, %10 SiC takviyeli numunenin %5 SiC takviyeli numuneye göre yaklaşık %15 daha fazla enerji sönümleme kabiliyeti olduğu görülmektedir (Şekil 7.14).



Şekil 7.14 %10 ve %5 takviyeli metal köpüklerde enerji sönümleme kabiliyeti

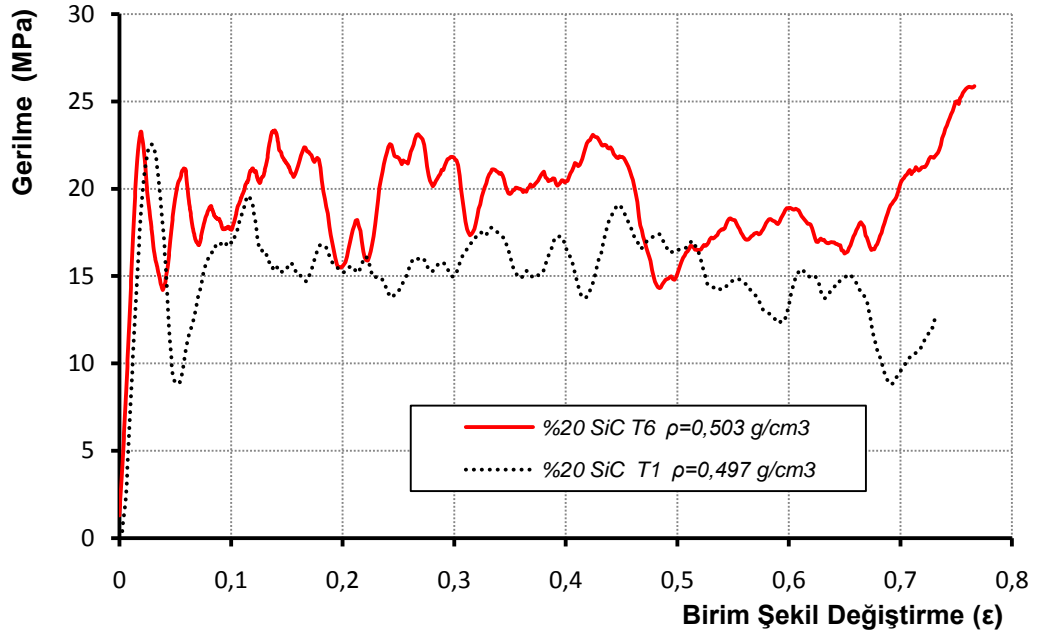
### 7.8. Isıl İşlemin Enerji Sönümlenme Kabiliyeti Üzerine Etkisi

Takviyesiz ve %20 SiC takviyeli, birbirine yakın yoğunluklara sahip ısıl işlem uygulanmış numunelerin enerji sönümlenme davranışı Şekil 7.15 ve Şekil 7.16 da gösterilmiştir. T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin enerji sönümlenme kabiliyetlerinin doğal yaşlandırma uygulanmış köpük malzemelere göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Şekil 7.15 te T6 ısıl işlemi uygulanmış takviyesiz numune ile doğal yaşlanmış takviyesiz numunenin enerji sönümlenme kabiliyeti karşılaştırılmış ve T6 ısıl işlemi görmüş numunelerin yaklaşık %55 daha fazla enerji sönümleyebildiği görülmüştür.



Şekil 7.15 Takviyesiz metal köpük malzemelerde ısıl işlemin enerji sönümlenme kabiliyetine etkisi

Şekil 7.16 da T6 ısıtılma işlemi uygulanmış %20 SiC takviyeli numune ile doğal yaşlanmış %20 SiC takviyeli numunenin enerji sönümlenme kabiliyeti karşılaştırılmış ve T6 ısıtılma işlemi görmüş numunelerin yaklaşık %20 daha fazla enerji sönümleyebildiği görülmüştür.



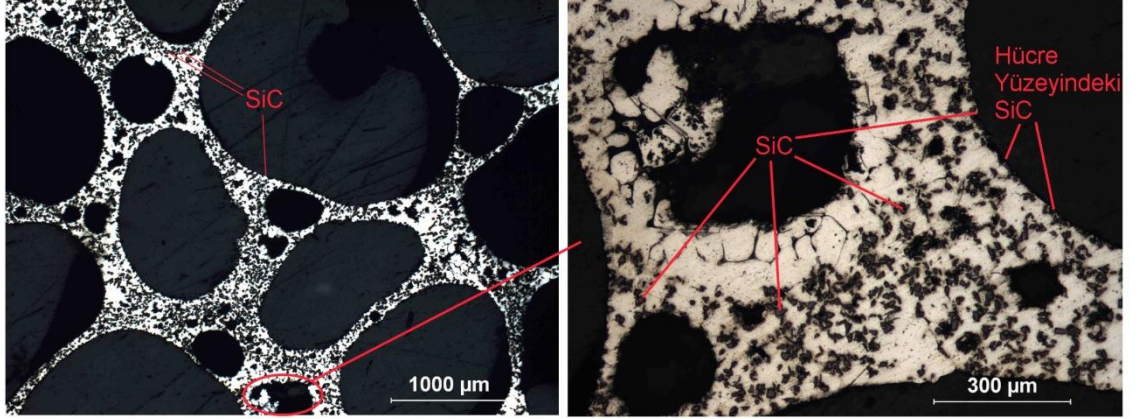
Şekil 7.16 %20 SiC takviyeli metal köpük malzemelerde ısıtılma işleminin enerji sönümlenme kabiliyetine etkisi

## 7.9. Metalografik İnceleme Sonuçları

### 7.9.1. Takviye Oranının Köpük Yapısına Etkisi

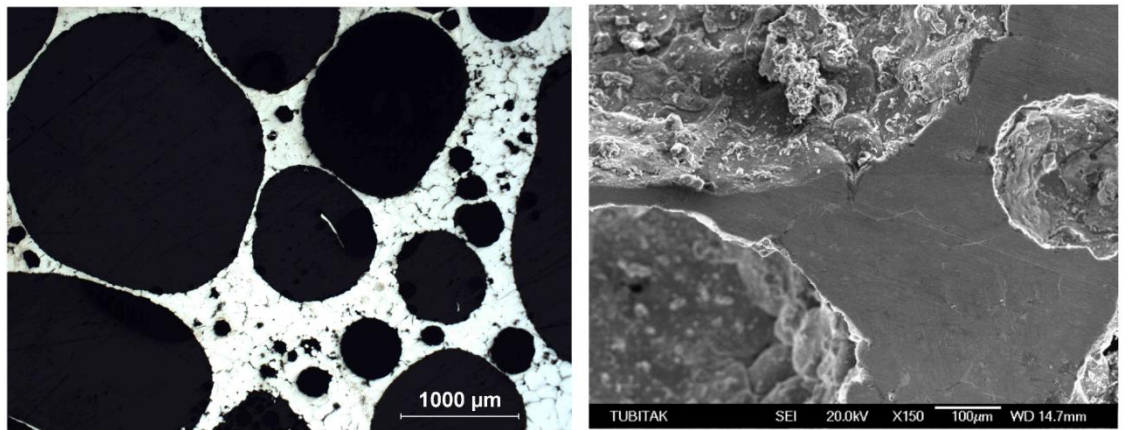
Matris malzemesi içine katılan SiC parçacıkların gözenek oluşumu sırasında hücre duvarlarına homojen bir şekilde yerleştiği ve hücre duvarının dayanımını artırdığı, hücre birleşmesine ve dolayısı ile hücre büyümelerine engel olduğu görülmüştür. Gözenek oluşumu sırasında, hücre duvarının zayıf olduğu bölgelere doğru genişleme olmasına rağmen takviye parçacıklarının hücrelerin birleşmesini engellediği

görülmüştür. Şekil 7.17 de %20 takviyeli köpük numunenin mikroskobik yapısı incelendiğinde ince hücre duvarlarında bile SiC takviye parçacıklarının yerleştiği görülmektedir.



Şekil 7.17 %20 takviyeli köpük numunenin mikroskobik yapısı

Şekil 7.18 de takviyesiz köpük numunelerin mikroskobik yapısı incelendiğinde hücrelerin küresel bir yapıya sahip olduğu, düşük mukavemetli hücre duvarlarının gerekli dayanımı sağlayamayarak diğer hücreler ile birleştiği görülmektedir.

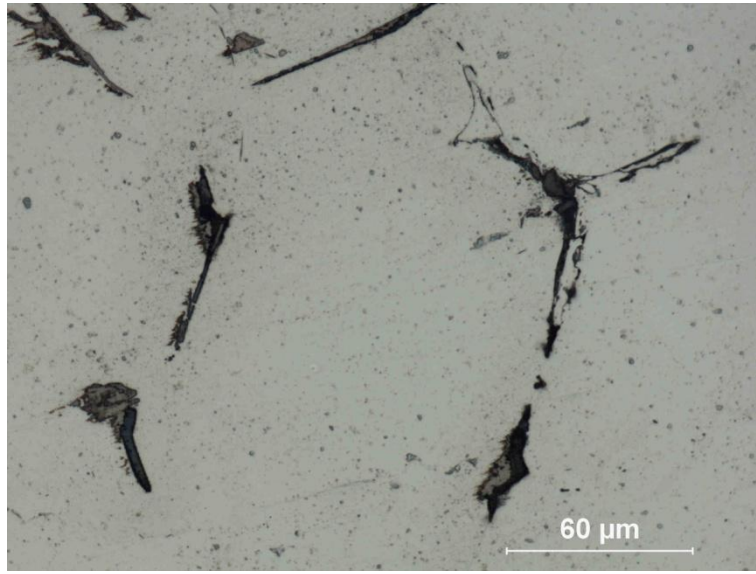


Şekil 7.18 Takviyesiz köpük numunenin mikroskobik yapısı



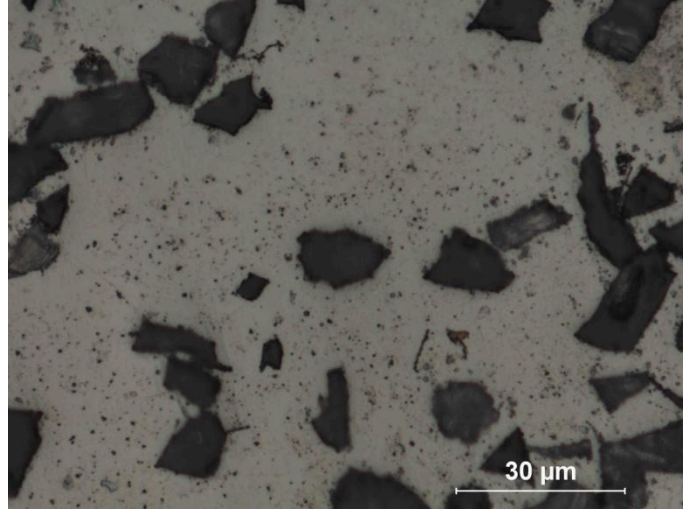
### 7.9.2. Isıl İşlemin Köpük Yapısına Etkisi

Takviyeli ve takviyesiz metal köpük numuneler T6 ve doğal yaşlandırma işlemlerinden geçtikten sonra mikroskopik yapıları karşılaştırılmıştır. Takviyesiz köpük numunelerde T6 ısıl işleminin etkisi ile çökelmelerin tane içlerinde homojen olarak dağıldığı ikincil fazların tane sınırlarında olduğu gözlenmiştir (Şekil 7.19).

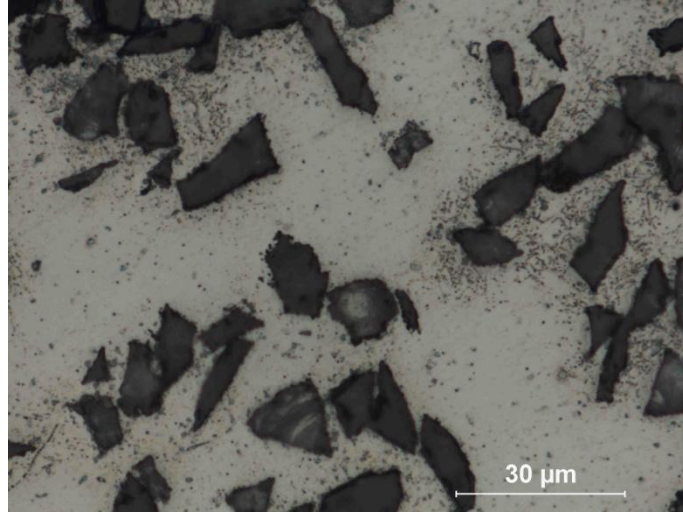


Şekil 7.19 Tane içinde oluşan çökelmeler

T6 ısıl işlemi görmüş kompozit köpük numunelerin mikroskopik incelemeleri sonucunda çökelmelerin homojen olarak bütün yapıya dağıldığı gözlenmiştir (Şekil 7.20). Doğal yaşlanmış kompozit köpüklerde SiC tanelerin etrafında difüzyon yoluyla oluşmuş silis bileşikleri ve tane içlerinde de az sayıda çökelme gözlenmiştir (Şekil 7.21).

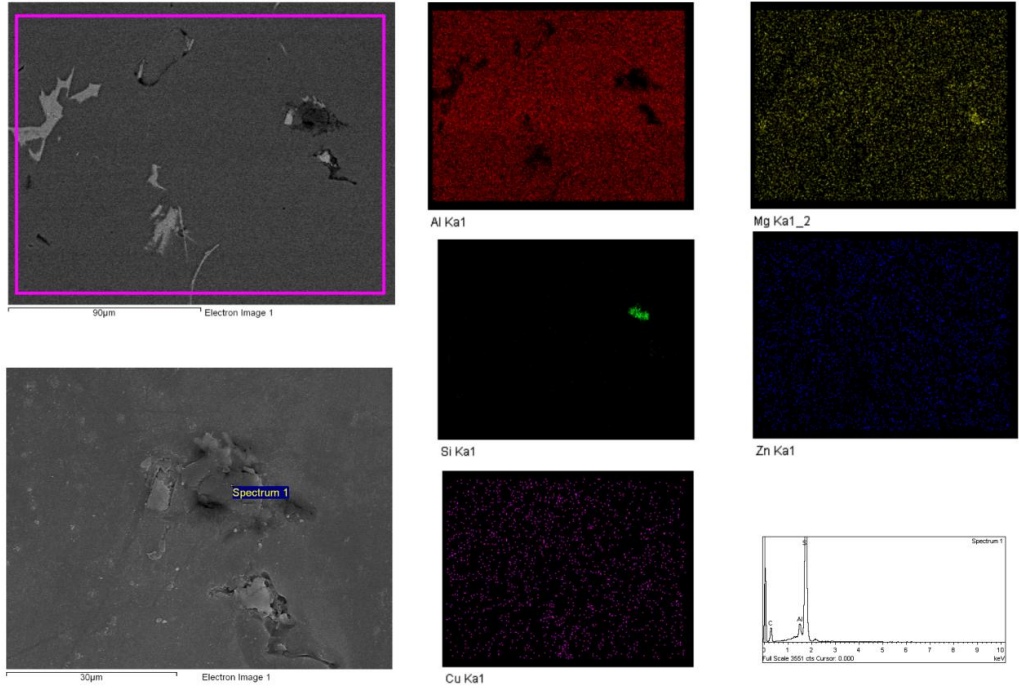


**Şekil 7.20 T6 ısıt işlemleri görmüş %20 SiC takviyeli köpük malzemenin hücre duvarı kesitinin mikroskopik yapısı**

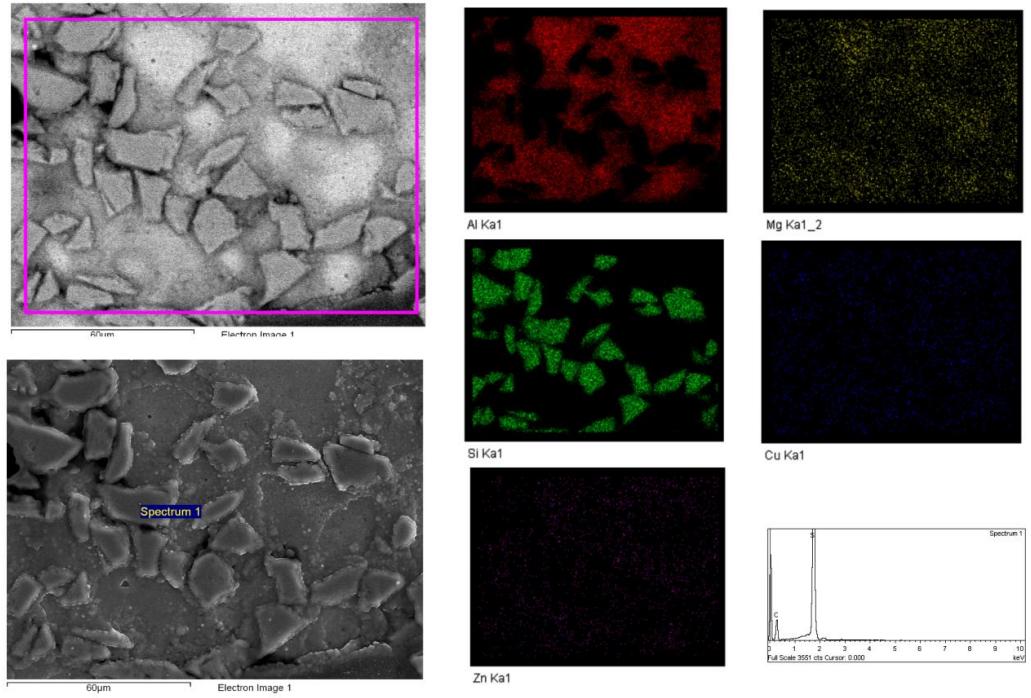


**Şekil 7.21 Doğal yaşlandırılmış %20 SiC takviyeli köpük malzemenin hücre duvarı kesitinin mikroskopik yapısı**

Şekil 7.22 ve Şekil 7.23 te takviyesiz doğal yaşlandırılmış ve %20 SiC takviye oranına sahip T6 ısıt işlemleri görmüş kompozit metal köpük numunelerin SEM analizi görüntüleri ve spektrometre sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 7.22 Takviyesiz doğal yaşlandırılmış numunenin SEM analizi görüntüleri



Şekil 7.23 %20 SiC takviyeli T6 ısıtılmış numunenin SEM analizi görüntüleri

## 8. SONUÇLAR

1. 7075 Al ve 7075Al/SiC metal köpükler doğrudan yarı- katı köpürtme yöntemi ile başarılı bir şekilde üretilmiştir.
2. SiC takviyesi ile Al köpüklerin lineer genişmesi artmakta, drenaj oluşumu engellenmekte ve daha homojen gözenek dağılımı sağlanmaktadır. SiC takviye oranı artıkça birbirine yakın boyutlarda gözenekler oluşmaktadır.
3. Takviye malzemesi olarak kullanılan parçacıklar köpük hücre duvarlarının dayanımını artırarak gözeneklerin birbirleri ile birleşmesini ve çökmelerini engellemektedir.
4. Metal köpük üretimi sırasında malzeme içine katılan SiC takviye parçacıkları lineer genişmeyi artırdığı için düşük yoğunluklu metal köpük elde edilebilmektedir.
5. Takviye malzemenin kullanılması, metal köpüklerin akma dayanımını yükseltmiş fakat bununla beraber köpük malzemenin kırılma dayanımının artmasına neden olmuştur. Köpük malzemelerin yoğunluklarının artması ile akma gerilme değerlerinin de arttığı görülmüştür.
6. 7075Al ve 7075Al/SiC malzemedan üretilmiş metal köpüklere T6 ve doğal yaşlandırma ısıl işlemleri başarılı bir şekilde uygulanabilmiş, bunun sonucunda köpük malzemelerin akma gerilmesi ve plato gerilmesi değerlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca T6 ısıl işleminin uygulanması ile köpük malzemenin enerji sönümleme kapasitesinin arttığı görülmüştür.
7. T6 ısıl işleminin uygulanması sonucunda köpük malzemelerin mikro sertlik değerlerinde artış olduğu görülmüştür.

**TEŐEKKÖR**

Bu yűksek lisans tez alıŐması TÖBİTAK tarafından desteklenen 108M325 numaralı 1001 projesi kapsamında gerçekleŐtirilmiŐtir.

**KAYNAKLAR**

- Aly, M.S., 2007, “ Behavior of Closed Cell Aluminium Foams Upon Compressive Testing at Elevated Temperature: Experimental Results” *Materials*, 61 3138-3141
- Askeland, D. R. , “1990, *The Science and Engineering of Materials*”, 2. Edition, İstanbul, Chapman&Hall s.423.
- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson ,J.W. and H.N.G. Wadley. 2000, “*Metal Foams a Desing Guide*”, by Butterworth-Heinemann,Wiley-VCH
- Babcsan, N., Leitlmeier, D., Degischer, H.P., 2003, “Foamability of Particle Reinforced Aluminum Melt” *Matt.-wiss. u. Werkstofftech*, 34 22–29
- Banhart, J., Baumeister,J. 1998, “Deformation Characteristics of Metal Foams” *Journal of Materials Science*, 33:1431-1440
- Banhart, J., 2001, “Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams” *Progress in Materials Science*, 46:559–632
- Banhart, J., (2003), “Aluminium Foams for Lighter Vehicles”, *International Journal of Vehicle Design*, 1-19.
- Banhart, J., (2004), “Industrialisation of Aluminium Foam Technology”, 9<sup>th</sup> *International Conference on Aluminium Alloys*, 764-770.
- Baron, J., (2000), “Aluminium FoamTechnology Applied to Automotive Design”, *CYMAT*.
- Campana, F., Pilone, D., 2009, “Effect of Heat Treatments on The Mechanical Behaviour of Aluminium Alloy Foams” *Scripta Materialia*, 60 :679-689
- Degischer, H.-P. ve Kriszt, B., 2002, “*Handbook of Cellular Metals,Production, Processing and Applications*”, Wiley-VCH, ISBN 3-527-29320-5,
- Erdoğan, M. 2001, “Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri” Nobel Yayın Dağıtım, Cilt 2, 344
- Elbir,S., Yılmaz,S., Toksoy, A.K., Güden,M., 2003, “SiC-particulate Aluminum Composite Foams Produced by Powder Compacts: Foaming and Compression Behavior” *Journal of Materials Science*, 38:4745 – 4755
- Esmaelzadeh S., Simchi, A., 2008, “ Foamability and Compressive Properties of AlSi7–3 vol.% SiC–0.5 wt.% TiH<sub>2</sub> Powder Compact” *Materials Letters* , 62:1561–1564

Gibson, L. J. ve Ashby, M.F., 1997 “Cellular Solids”, Second Edition, Cambridge Solid State Science Series”, ISBN 0-521-49560-1,.

Geçkinli, L. F. 2002. “Aluminyum ve Alaşımlarının Isıl İşlemi”, 2.ısıtım işlem sempozyumu, İstanbul, TÜRKİYE, Şubat 07 – 08

Gergely, V., ve Clyne, T. W. 2004, “Drainage in Standing Liquid Metal Foams:Modelling and Experimental Observations” Acta Materialia,

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

Kennedy, A. R., (2002), “The Effect of TiH<sub>2</sub> Heat Treatment on Gas Release and Foaming Al- TiH<sub>2</sub> Preforms”, Scripta Materialia (47):763-767.

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

Lopatnikov, S.L., Gama, B.A., Haque, Md.J, Krauthauser, C., Gillespie, J.W.Jr., Guden, M., Hall, I.W.,2003 ,“Dynamics of Metal Foam Deformation During Taylor Cylinder-Hopkinson Bar Impact Experiment”, Composite Structures, 61:61–71

Lehmhus, D., Banhart,J. and Rodriguez-Perez ,M. A.,2002” Adaptation of Aluminium Foam Properties by Means of Precipitation Hardening” Materials Science and Technology, 18

Lehmhus, D., Banhart,J., 2003, “Properties of Heat-Trated Aluminum Foams” Materials Science and Engineering A349 98-110

Liu J., Yu, S., Zhu, X., Wei, M., Luo Y., Liu, Y., 2008,” The Compressive Properties Of Closed-Cell Zn-22Al Foams” Materials Letters ,62: 683–685

Luo,Y.,Yu,S., Lic,W., Liu,W., and Wei, M., 2007,” Compressive Behavior of SiC<sub>p</sub>/AlSi<sub>9</sub>Mg Composite Foams” Journal of Alloys and Compounds, basımda,

Mondal, D.P.,Goel, M.D., 2009, Das, S., “ Compressive Deformation and Energy Absortion Characteristics of Closed Cell Aluminum-fly Ash Particle Composite Foam” materials Science and Engineering, A507 102-109

Wang, Z., Li, Z., Ning, J., Zhao, L., 2009, “Effect of Heat Treatments on The Crushing Behaviour and Energy Absorbing Performance of Aluminium Alloy Foams” Materials and Desing, 30 977-982

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

Yu, H., Guo, Z., Li, B., Yao, G., Luo, H., Liu, Y., 2007, "Research into the Effect of Cell Diameter of Aluminum Foam on Its Compressive and Energy Absorption Properties" *Materials Science and Engineering, A* 454-455 542-546

Yu, S., Luo, Y., Liu, J., 2008, "Effects of Strain Rate and SiC Particle on The Compressive Property of SiC<sub>p</sub>/ AlSi<sub>9</sub>Mg Composite Foams" *Materials Science and Engineering, A* 487 394-399



**ÖZ GEÇMİŞ**

|                      |                           |   |
|----------------------|---------------------------|---|
| <b>Doğum tarihi</b>  | 15.06.1985                |   |
| <b>Doğum yeri</b>    | BULGARİSTAN<br>(Eskicuma) |   |
| <b>Lise</b>          | 1999-2003                 | Babaeski Anadolu Lisesi   |
| <b>Lisans</b>        | 2003-2007                 | Süleyman Demirel Üniversitesi<br>Mühendislik Mimarlık Fakültesi<br>Makine Mühendisliği Bölümü |
| <b>Yüksek Lisans</b> | 2008-2011                 | Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri<br>Enstitüsü Makine Mühendisliği<br>Anabilim Dalı           |