

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPAKT TOZ ERGİTME TEKNİĞİ İLE ALÜMİNYUM KÖPÜK
ÜRETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Şevki Deniz SEZER**

Anabilim Dalı : Metalurji Malzeme Mühendisliği

Programı : Malzeme Mühendisliği

EYLÜL 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPAKT TOZ ERGİTME TEKNİĞİ İLE ALÜMİNYUM KÖPÜK
ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Şevki Deniz SEZER
(506061416)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Ağustos 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Eylül 2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU (YTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Özgül KELEŞ (İTÜ)

EYLÜL 2009

ÖNSÖZ

Metal tozlarını köpük yapıcı tozlarla birlikte proses eden toz metalurjisi yöntemini (Fraunhofer metodu) kullanarak metalik köpük üretiminde proses parametrelerinin metalik köpüklerin mekanik özellikleri, mikroyapıları ve morfolojileri üzerine etkisini deneysel tasarım yöntemleri kullanarak incelenmiştir.

Tez çalışmalarım ve yüksek öğrenim hayatım boyunca kendisinden çok şey öğrendiğim değerli hocam Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK'a en derin şükranlarımı sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında, anlayışını eksik etmeyen, önerileri ve sürekli desteği ile bana yol gösteren sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Özgül KELEŞ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, Tozların kompaktlanması için kullanılan pres konusunda ki eğitim, yardımlarını esirgemeyen ve gerekli imkanları sağlayan hocam Yrd. Doç. Burak ÖZKAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezim sırasında çok önemli yardımlarını gördüğüm, arkadaşlarım Ar. Gör. Fırat EŞİT ve Sedat İHVAN' a en samimi teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tezimde önemli yardımlarını gördüğüm, Ar. Gör. A. Umut SÖYLER'e, Ar.Gör. Önder GÜNEY'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimde kullandığım ekipmanın sağlanması ve tasarlanmasında yardım ve destek gördüğüm Barış DARYAL' a içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bugünlere gelebilmem için beni yetiştiren aileme ve yıllarca benim yanımda olan bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Eylül, 2009

Şevki Deniz SEZER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. METALİK KÖPÜKLER	5
2.1 Metalik Köpüklerin Tarihçesi	5
2.2 Metal Köpüklerin Özellikleri	5
2.2.1 Açık hücre yapısına sahip metalik köpük	6
2.2.2 Kapalı hücre yapısına sahip metalik köpük	7
2.2.3 Metalik Köpüklerin Dizayn Özellikleri	8
2.3 Metalik Köpüklerin Günümüz Piyasasında Durumu	8
2.4 Metalik köpüklerin Kullanım alanları.....	9
2.5 Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri.....	12
2.5.1 Gaz enjekte ederek köpük üretimi.....	12
2.5.2 Gaz çıkarıcı medyum ile köpük üretimi.....	13
2.5.3 Katı gaz ötektik katılaşma (gasar).....	14
2.5.4 Kompakt toz ergitme tekniği.....	14
2.5.5 Polimer Köpükler ile hassas döküm.....	15
2.5.6 Latis blok malzemeleri (LBM)	16
2.5.7 Yer tutan malzemelerin etrafına döküm.....	16
2.5.8 Spray köpüklama (Osprey prosesi)	17
2.5.9 Gaz hapsetme tekniği	17
2.5.10 Metalik içi boş küre yapıları	17
3.KOMPAKT TOZ ERGİTME TEKNİĞİ	19
3.1 Kompakt Toz Ergitme Tekniğinin Özellikleri	19
3.2 Kompakt Toz Ergitme Tekniğinin İşleyişi.....	19
3.2.1 Kompakt toz ergitme tekniği ile sandviç panelleri üretimi.....	22
3.2.2 Toz ergitme tekniği ile kompozit üretimi.....	24
3.3 Kompakt Toz Ergitme Tekniğinin İncelenmesi	25
3.3.1 Deneyin yenilenebilmesi.....	26
3.3.2 Kompakt hale getirme koşullarının etkisi	26
3.3.3 Köpürtme ortamının etkileri.....	28
3.3.4 Por morfolojisinin köpürme işlemi sırasındaki değişimi	29
3.3.5 Toz işlemlerinin köpürme işlemine etkisi	29
3.3.6 Oksitlerin köpüren toz kompaktlarına etkisi	29
3.3.7 Metal köpüklerin kararlılığı	30
3.4 Kompakt Toz Ergitme Tekniğini Etkileyen Faktörler	32

4. ISIL İŞLEM	35
4.1 Isıl İşlemin Geçmişi	35
4.2 Isıl İşlem Mekanizması	35
4.3 Alüminyum Köpüklere Isıl İşlem Uygulanması	39
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	41
5.1 Deneyler ve Testler	41
5.2 Sonuçlar ve Tartışma.....	45
5.2.1 Hammaddelerin karakterizasyonu.....	45
5.2.2 Tozların kompaktlanması ve köpürtülmesi	48
5.2.3 Alüminyum Köpük Üretimi	51
5.2.4 Alüminyum köpük numunelerinin incelenmesi	55
5.2.5 Alüminyum köpük numunelerinin sertliklerinin incelenmesi.....	64
5.2.6 Basma deneyleri sonuçları	67
5.2.7 Isıl işlem görmüş numunelerin incelenmesi.....	70
6. SONUÇLAR	83
KAYNAKLAR.....	85

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : İlk aşamada yapılan deneylere ait basınç ve kompakt yoğunluk değerleri	48
Çizelge 5.2 : İlk aşama deneylerde elde edilen kompaktların köpürtülmesi sırasında ortaya çıkan hatalar ve nedenleri.....	50
Çizelge 5.3 : Üretilen tabletlerin yoğunlukları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.....	51
Çizelge 5.4 : Yoğunluk Değerleri	52
Çizelge 5.5 : Optik Spektrometrede ölçülen alaşım değerleri	57
Çizelge 5.6 : Yanıt yüzey analizine göre tasarlanmış ikinci aşama deneylerin sonuçları.....	64
Çizelge 5.7 : Ortalama sertlik değerleri üzerine regresyon analiz sonuçları ...	65
Çizelge 5.8 : ANOVA.....	65
Çizelge 5.9 : Yanıt yüzey analizine göre tasarlanmış ısıtıl işlem deneylerinin sertlik sonuçları ve karşılaştırılması.....	70
Çizelge 5.10: Regresyon analizi.....	72
Çizelge 5.11: ANOVA	72
Çizelge 5.12: Regresyon analizi.....	73
Çizelge 5.13: ANOVA.....	74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Köpük sınıflandırmaları.	6
Şekil 2.2 : Kapalı hücre bir alporas alüminyum köpük. Açık hücre bir Duocel alüminyum köpük.	7
Şekil 2.3 : Yeni kavranan bir fikrin bilimsel olarak çalışılması ve endüstriyel olarak adapte edilmesi.	9
Şekil 2.4 : Gaz enjekte ederek köpük üretimi.	13
Şekil 2.5 : Köpürtücü ajan ile köpük üretimi.	14
Şekil 2.6 : Polimer köpükler ile hassas döküm.	15
Şekil 3.1 : Köpürme ajanının bozunması ve metal matrisin genişlemesi ...	20
Şekil 3.2 : (a) tozların seçilmesi ve karıştırılması. (b) tozların ekstrüzyom ile kompaktlanması. (c) ara ürünün kapalı bir kalıp içerisine koyulması. (d) kalıp içindeki ara ürünün ısı işlem ile köpürtülmesi.	21
Şekil 3.3 : Kompakt toz ergitme tekniğinin değişik geometrik şekilli parça üretiminde uygulanan hali.	23
Şekil 3.4 : %0,6 TiH ₂ içeren 6061 sol ve AlSi7 sağ görüntüleri.	26
Şekil 3.5 : Değişik sıcaklıklarda preslenmiş alüminyum köpüklerin sabit sıcaklıktaki fırının içinde sıcaklık ve zamana bağlı olarak genleşmeleri.	27
Şekil 3.6 : Maksimum genişleme eğrisini fırın sıcaklığına bağlı eğrileri.	28
Şekil 3.7 : Alüminyum köpüklerin oksitlerler stabilizasyonunda hücre çepherleri.	30
Şekil 3.8 : Metalik köpük oluşumundaki olumsuz mekanizmaların etkileşimi.	31
Şekil 3.9 : Metalik köpük oluşumunda olumsuz mekanizmaların oluşumu etkilemesi ve sonuçları.	31
Şekil 3.10 : Alüminyum köpükleri genişlemeden sonra görülmektedir.	32
Şekil 5.1 : Çalışmanın süreç akış şeması.	41
Şekil 5.2 : Alüminyum köpük üretiminde kullanılan ısıtıcı kalıp.	42
Şekil 5.3 : a.Çelik esaslı köpükleşme prosesinde kullanılan kalıp. b.Çelik esaslı kalıbın soğutulmasında kullanılan su soğutmalı bakır plaka.	43
Şekil 5.4 : a. Alüminyum tozun TEM görüntüsü. b. Alüminyum tozun kimyasal analizi.	45
Şekil 5.5 : a. Silisyum tozun TEM görüntüsü. b. Silisyum tozun kimyasal analizi.	46
Şekil 5.6 : a. Magnezyum tozunun TEM görüntüsü. b. Magnezyum tozun kimyasal analizi.	47
Şekil 5.7 : TiH ₂ tozunun TEM görüntüsü.	48

Şekil 5.8 : Üretilen ara ürünlerin yandan ve üstten görüntüsü.....	49
Şekil 5.9 : Serbest köpükleşmiş numune görüntüsü.	49
Şekil 5.10 : Üretilen alüminyum köpüklerin genel görüntüsü.....	53
Şekil 5.11 : Üretilen alüminyum köpüklerin kesit görüntüsü.....	54
Şekil 5.12 : 8 no’lu numunenin 15 büyütmede SEM ile çekilmiş fotoğrafı.	59
Şekil 5.13 : 3 no’lu numunenin 100 büyütmede SEM ile çekilmiş fotoğrafı.	59
Şekil 5.14 : 4 no’lu numunenin 1000 büyütmede SEM ile çekilmiş kompozisyon fotoğrafı.	60
Şekil 5.15 : 4 no’lu numuneden alınan B EDS analiz grafiği.....	61
Şekil 5.16 : 4 no’lu numuneden 1000 büyütmede SEM ile alınan resif görünümlü intermetalik bağ fotoğrafı	61
Şekil 5.17 : 4 no’lu numuneden alınan resif görünümlü kısmın EDS analizi.	62
Şekil 5.18 : 11 no’lu numunenin 10 büyütme ile optik mikroskopta çekilmiş mikro yapı fotoğrafı.	62
Şekil 5.19: İkinci aşama deneylerden sertlik değerlerinin analizinden elde edilen yüzey grafikleri.....	66
Şekil 5.20 : Basma deney sonuçları. (numune no:8,9,10).	67
Şekil 5.21 : Basma deneyi sonunda numune durumları. (numune no:8,9,10).....	68
Şekil 5.22 : Isıl işlem sonrası basma mukavemeti ve ortalama sertlik değeri ilişkisi.	69
Şekil 5.23 : Isıl işlem gören numunelerde Mg,Si,TiH ₂ ’nin etkilerinin incelenmesi için oluşturulan yüzey eğrileri ve kontör çizimleri.	75
Şekil 5.24 : Isıl işlem sonrası Mg,Si,TiH ₂ ’ nin etkilerinin incelenmesi için oluşturulan kontör çizimleri.	75
Şekil 5.25 : Isıl işlem gören numunelerde Mg,Si,TiH ₂ ’nin etkilerinin incelenmesi için oluşturulan yüzey eğrileri ve kontör çizimleri.	76
Şekil 5.26 : TiH ₂ miktarının alüminyum köpüğün sertliğine etkisi.	77
Şekil 5.27 : Isıl işlem yapılmış 6 no’lu numunenin SEM ile 500 büyütmede çekilmiş kompozisyon fotoğrafı.	77
Şekil 5.28 : 6 no’lu numunede gri bölge EDS analiz grafiği.....	78
Şekil 5.29 : 6 no’lu numunede beyaz bölge EDS analiz grafiği.	78
Şekil 5.30 : Isıl işlem yapılmış 16 no’lu numunenin SEM ile 1000 büyütmede çekilmiş kompozisyon fotoğrafı.....	79
Şekil 5.31 : 16 no’lu numunede ok ile gösterilen bölge EDS analiz grafiği.....	79
Şekil 5.32 : 16 no’lu numunede ok ile gösterilmeyen bölge EDS analiz grafiği.....	80
Şekil 5.33 : Isıl işlem yapılmış 16 no’lu numunenin optik mikroskop ile 20 büyütmede çekilmiş mikro yapı fotoğrafı.	81
Şekil 5.34 : Isıl işlem yapılmış 7 no’lu numunenin optik mikroskop ile 10 büyütmede çekilmiş mikro yapı fotoğrafı.	81

KOMPAKT TOZ ERGİTME TEKNİĞİ İLE ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİ

ÖZET

Köpük malzemeler içerisinde yüksek oranda boşluk içerirler ve eğer köpüren malzeme metalik karakterde ise ve katılaştıktan sonra da boşluk içeriyorsa bu yapılar metalik köpük olarak adlandırılırlar.

Son yıllarda organik köpüklerin yanı sıra metalik köpükler üzerinde de araştırma geliştirme faaliyetleri artmış ve hatta bazı alanlarda metalik köpükler kısıtlı olsa endüstriyel olarak üretilebilir hale gelmişlerdir.

Metalik köpükler dayanım-yoğunluk oranının yüksek olması, enerji absorplama yeteneği, yüksek termal iletkenlikleri nedeniyle otomotiv, havacılık, deniz, yapı sektörünü içine alan sektörlerde uygulama alanları bulmaya başlamışlardır.

Metalin sıvı faza geçerek köpük oluşturduğu en yeni yöntem kompakt toz ergitme tekniği Alman Fraunhofer Enstitüsü tarafından geliştirilmiş olup başlangıç malzemeleri toz olduğundan toz metalürjisi tekniği olarak ta bilinir. Elementel metal veya alaşım tozları köpürtücü ajan olarak kullanılan tozlar değişik kompaktlama teknikleri (tek yönlü veya izostatik presleme, ekstrüzyon ve haddeleme vd.) ile bir araya getirildikten sonra matris malzemenin ergime sıcaklığına yakın sıcaklığına ısıtılır ve köpürtücü ajanların bozunması ile ortaya çıkan hidrojen gazı köpürmeye sebep olur. Genel olarak alüminyum, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer metal ve alaşımlarda kullanılabilen bu teknik üzerine çalışmalar saf alüminyum ve işlenebilir alüminyum alaşımları üzerine yoğunlaşmışlardır.

Bu çalışmada amaç özellikle kara ve hava taşımacılığında yaygın olarak kullanılan Al-Si-Mg tozlarından toz metalürjisi kullanılarak metal köpük üretilmesidir. Tozlardan oluşan tabletler sıcak presleme yöntemi ile şekillendirildikten sonra tabletler önce köpürtücü tozların bozunma sıcaklığına sonrada alüminyumun ergime sıcaklığına ısıtılacaktır. Elde edilen alüminyum köpükler daha sonra ısıtılma işlemine tabi tutulacak ve bu işlemin köpüklerin mekanik özelliklerine etkileri incelenecektir. Çalışmada üretilen köpüklerin mekanik ve morfolojik özelliklerine alaşım tozlarının, köpük yapıcı tozların tür, boyut, miktarlarının ve uygulanan proses parametrelerinin etkisini incelemek ve parametreleri optimize etmek hedeflenmektedir.

ALUMINUM FOAM PRODUCTION WITH COMPACT POWDER MELTING TECHNIQUE

SUMMARY

Foam materials have a high ratio of cavities and if a foaming material has metallic properties and still has cavities they are called metallic foams.

In recent years apart from organic foams research and development on metallic foams have been increasing. In some fields though limited they were produced industrially.

Having a high stiffness density ratio, energy absorption properties, high thermal conductivity metallic foams have found application fields in automotive, ship, aerospace, building industries.

The newest technique using the liquid phase to produce foams is the compact powder melting technique developed by the German Fraunhofer Institute. Having powder as a starting material it is also known as a powder metallurgical process. Elemental or alloy powders are compacted with blowing agent powders by different means of compacting (axial, isostatic pressing, extrusion etc.). After the compacting procedure the matrix is heated near the melting point. By the disintegration of the blowing agent hydrogen gas is released thus causing the foaming. Generally aluminum, zinc, brass, lead, gold and other materials and alloys can be used in this technique but the research and development activities are more focused on aluminum and aluminum alloys.

In this study by using the compact powder melting technique the effects of type of the aluminum alloys, pressing pressure, pressing temperature, pressing time, foaming temperature, cooling time on foaming speed, foam stability cell volume, homogeneity and cell wall thickness will be studied.

The aim of the study is to produce metallic foams from Al-Si-Mg powders which are widely used in air and land transportation. Tablets produced from the foams will be shaped by hot pressing. After shaping they will be heated first to the decomposition temperature of the blowing agent then to the melting point of the aluminum. Aluminum foams will also be heat treated to see the effects of heat treatment on their mechanical properties. Determining the effects of process parameters and the powder size, type, amount of alloying powders and blowing agent on the mechanical and morphological properties of the foam produced. Thus optimizing the foaming process.

1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI

Artan küresel ısınmanın getirdiği sonuçlar ve geleceğe yönelik üretilen senaryolar endişe verici düzeydedir. Küresel ısınmanın en büyük nedenlerinden olan sera etkisini tetikleyen karbondioksit emisyonunun en büyük üreticilerinden birinin ulaşım sektörü olduğu bilinmektedir. Ulaşım sektöründe kullanılan araçların ürettiği gaz emisyonunu azaltmanın yolu araçların hafifletilerek daha az yakıt kullanmalarını sağlamaktan geçmektedir. Araçları hafifletirken güvenliğin göz ardı edilmemesi gereklidir. Bu amaçla son yıllarda kara, hava ve deniz ulaşımında metalik parçaların yerini metalik köpük parçalar veya metalik köpük doldurulmuş parçalar almaya başlamıştır. Böylece parçaların ağırlıkları performanslarından ödün verilmeden azaltılmaya çalışılmaktadır.

Metalik köpük kullanımının yaygınlaşmaya başladığı diğer bir alanda implant malzeme sektörüdür [3]. Üretilen implantların hafif fakat aynı fonksiyonel gerekleri sağlayacak şekilde üretimine yönelik araştırma-geliştirme faaliyetleri son yıllarda hız kazanmıştır.

Metalik köpükler dayanım-yoğunluk oranının yüksek olması, enerji emme yeteneği, yüksek ısı iletkenlikleri nedeniyle otomotiv, havacılık, deniz sektörünü içine alan sektörlerde uygulama alanları bulmaya başlamışlardır [2, 4-8].

Özellikle alüminyum, magnezyum, bakır ve alaşımlarında yaygın olarak metalik köpükler elde edilmektedir. Metalik köpük üretimi sıvı metalden, toz ve metallerin iyon ve buharlarını kullanılarak çok değişik üretim yöntemleri ile yapılabilmektedir. Temel olarak üç fikir üzerinden metalik köpük üretim teknikleri geliştirilmiştir. İlki sıvı metal veya toz kullanılarak sürecin belli aşamasında oluşturulan gaz çıkışı ile köpük oluşturmaktır. Diğer fikir ise kopyasını çıkarmaktır. Açık gözenekli modeller kullanıp döküm veya kaplama yöntemleri ile gözenekli metalik köpükler elde etmektir. Üçüncü yaklaşım ise dolgu malzemesi olarak kullanılan bilyeler/küreler arasını döküm ile doldurmak veya dolgu malzemelerini gözenek oluşturacak şekilde sinterlemektir [1,8-9].

Her yöntemin avantaj ve dezavantajları olmakla birlikte özellikle açık gözenekli modellerin kullanılarak yapılan üretimler endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun temel sebeplerinden biri üretilen ürünün gözenek boyut ve şekillerinin kullanılan modelle aynı olmasıdır. Bu nedenle karmaşık şekilli ve değişik gözenek boyutlarına sahip ürünler üretilir. Sıvı veya toz metalde süreç sırasında gaz oluşumuna bağlı yöntemlerde gözenek boyut ve şekilleri süreç parametrelerine oldukça bağlıdır. Bu yüzden bu yöntemlerin bazıları endüstriyel uygulama alanı bulamamış olmakla birlikte yoğun araştırma geliştirme faaliyetleri sürdürülmektedir [10-13].

Metalik köpük üretiminde ortaya çıkan ürünlerin sürdürülebilir kalitede olması, üretilen metalik köpüğün değişik şekillerde elde edilebilmesi ve metalik yapıların içine dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi için Kompakt Toz Ergitme tekniği tercih edilmelidir.

Bu teknikte karmaşık parçaların içine metalik köpük dolgusu sağlamak mümkün olup sandviç yapıların üretimi oldukça kolaydır. Yöntemin üretim prensipleri oldukça basit olduğu için anlaşılması ve kontrol edilmesi oldukça kolaydır. Bu yöntemde üretilen metalik köpük çeşitleri sadece alüminyum ve alüminyum alaşımları ile sınırlı değildir. Uygun köpürtme ajanı bulunduğu takdirde kalay, pirinç, kurşun, altın ve bir takım başka metallerde metalik köpük haline getirilebilirler[1].

Kompakt toz ergitme tekniği (Fraunhofer metodu) için incelenebilecek noktalar alaşım tiplerinin köpürme performansları, deneyin yenilenebilmesi, kompakt hale getirme koşullarının etkisi, köpürtme ortamının etkileri, gözenek morfolojisinin köpürme işlemi sırasındaki değişimi, toz işlemlerinin köpürme işlemine etkisi, oksitlerin köpüren toz kompaktlarına etkisi, metal köpüklerin kararlılığı, köpürtme ajanı seçiminin etkileridir.

Görüldüğü gibi Fraunhofer metodu ile oldukça basit olan köpürtücü ajanı kullanılan metal alaşımı ile karıştırıp sıkıştırmak ve köpürtmek işlemleri içinde metot basit prensiplere sahip olduğu için her açıdan incelenebilmektedir. Ayrıca sıkıştırma işleminin sıcak olarak yapılması sebebiyle istenilen alaşım burada üretilmekte bu da değişik alaşımların köpürme özelliklerini görmek açısından hem bir esneklik sağlamakta hem de maliyetleri aşağıya çekmektedir.

Çalışmada genel olarak Fraunhofer metodu ile metalik köpük üretiminde bahsedilen değişkenlerin köpürme performansına ve üretilen köpüğün özelliklerine etkileri incelenecektir. Ayrıca üretilen alüminyum köpüklere ısıtıl işlem yapılacak bu işlemin alüminyum köpüklerin özelliklerine etkileri incelenecektir.

2. METALİK KÖPÜKLER

2.1 Metalik Köpüklerin Tarihçesi

Metalik köpüklerin tarihçesi 1940 yılına kadar uzanmakta olup; 1950lerden 1970lere kadar olan dönemde birçok patent başvurusu yapılmış ve birçok değişik köpürtme işlemleri önerilmiştir. Adı geçen patentler dışında yayın olmadığı için, bu önerilen fikirlerin gerçekte ne kadar etkili oldukları bilinmemektedir. 1980lerde ikinci bilimsel dalga ile, eski tekniklerin bir kısmı tekrar ortaya çıkarılmış ve çok daha fazla yayın yapmaya sebep olmuştur. Bu günlerde önerilen metal köpürtme süreçlerinden bir kısmının işleyişi denenmiş ve ticari üretimlere başlanmıştır. Geçmişte metalik köpükler üzerine yapılan çalışmalar; genel olarak deneysel tecrübeler üzerine kurulu olmakla birlikte, köpürme mekanizmasının altında yatan mekanizmalar hakkında yeterli bilgiye sahip olmadan yapılmıştır. Bu tip çalışmalar, metal köpürmesi gibi karmaşık konularda sınırlamalara sebep olmuş ve gerçek bir bilimsel anlayış oluşamamıştır.[14]

2.2 Metal Köpüklerin Özellikleri

Metal köpük yapısı içinde, katı metal (genellikle alüminyum) ve hacimce yüksek oranda gazla dolu gözeneklere sahiptir. Bu gözenekler, kapalı (kapalı hücre köpük) ya da bir birine ağ şeklinde bağlı olan açık (açık hücre köpük) şeklindedir. Metal köpüklerin tanımlayıcı özellikleri çok yüksek oranda gözenekleşmeye sahip olmalarıdır. Bu oran genellikle hacmen %80' in üzerindedir. [15]

Hücre yapılı metaller birçok değişik yöntemle üretilir. Bunlar arasında köpük yapma metotları özellikle ilgi çekicidir. Çünkü bu yöntemlerle, dikkat çekici mekanik özellikler ve kapalı hücre sistemine sahip metaller, nispeten daha ucuz üretim yapılmasına izin vermektedir. Köpükleştirme derken kastedilen işlem, sıvının içine verilen gazın balonlarının kaçmaması sağlanarak sıvının soğutulması ve bunun sonunda sıvı köpüğün stabil duruma gelmesidir[19].

		içinde çözünülen		
		gaz	sıvı	katı
gaz	gaz	gaz karışımı	köpük	katı köpük, hücre yapılı katı
	sıvı	sis	emülsiyon	jel
	katı	duman	süspansiyon, çamur	gömülü parçacıklar

Şekil 2.1 Köpük sınıflandırmaları [9]

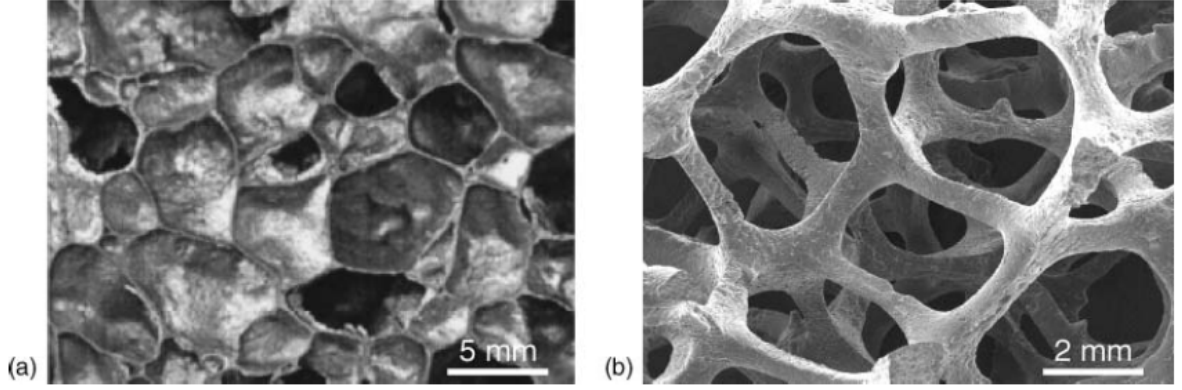
Köpüklerin ve diğer yüksek gözenekleşmeye sahip hücre yapılı malzemelerin; düşük özgül ağırlık ya da yüksek gaz geçirgenliği yanı sıra yüksek direnç gibi birçok ilginç fiziksel ve mekanik özellik birleşimlerine sahiptir. Bu nedenle doğa hücre yapılı malzemeler, yapısal işlevler için sıkça kullanılmaktadır. (örn: tahta, kemik)

Köpük terimi esas olarak gaz köpüklerinin sıvı faz içinde hapsolması anlamına gelmektedir. Bu tip köpüklerin katılaştırılmasıyla biçimlerinin korunması mümkündür ve bu şekilde katı köpük denilen yapı elde edilebilir. Metalik köpükler hakkında konuşulurken kastedilen şey de katı köpüklerdir. Sıvı metalik köpük, üretilmek istenen malzemenin üretimi sırasında oluşan bir fazdır. Katı köpükler ise, “hücre katılar” genel adıyla özeldirler. Sıvılarda olduğu gibi yüzey enerjisinin minimuma indirilmesi bir takım özel köpük biçimlenmelerine izin vermektedir. Sıvı köpüğün diğer yüzü olan katı köpükler de aynı sınırlamalara tabidir. Buna ters olarak hücre katılar, sıvı fazdan üretilmek zorunda olmadıklarından dolayı neredeyse her türlü biçimsel yapıda olabilirler. Örn: sinterlenmiş tozların tipik açık yapısı [1]

2.2.1 Açık hücre yapısına sahip metalik köpük:

Açık hücre yapısına sahip metalik köpükler poliüretan köpükler gibi açık hücre yapısına sahiptirler. Bu köpüklerin kullanım alanları da oldukça geniştir. Isı dağıtımı (kompakt elektronik soğutma, cryojen tankları, PCM ısı ileticileri), Enerji emilimi, hafif optik uygulamasında kullanılabilir. Üreticileri arasında ERG Aerospace (Duocel), Metal Köpük Korea, M-Pore, Porvair, Metaköpük ve Recemat bulunmaktadır. Üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle, genel olarak ileri teknoloji üretimi ve havacılık alanlarında kullanılır. [15]

Çok kaliteli açık hücreli metalik köpükler, gözle görülmesi mümkün olmayacak kadar küçük hücrelerle örülüdür ve kimya endüstrisinde yüksek sıcaklık filtreleri olarak kullanılır. Üretici olarak Inco Ltd.' yi söyleyebiliriz. [15]



Şekil 2.2 (a) kapalı hücre bir alporas alüminyum köpük. (b) Açık hücre bir Duocel alüminyum köpük.[17]

2.2.2 Kapalı hücre yapısına sahip metalik köpük:

Kapalı hücreli metal köpükler 1990 yılından beri geliştirilmektedir. Genel üretim yöntemleri; eriyik metalin içine gaz enjekte etme ya da bir köpürtücü ajan yardımıyla olur. Gözenek veya hücre büyüklükleri ise genellikle 1- 8mm arasındadır. [15]

Gaz parçacıkları birbirlerinden sıvı ya da katı porsiyonlar ile ayrılmış durumdadırlar. Bu sebeple hücreler katı ya da sıvı ile tamamen kaplanmış olup birbirlerine bağlı değildir. [1]

Kapalı hücre yapısına sahip köpükler, genellikle bisiklet kasklarındaki polimer köpüklere benzer şekilde darbe emici olarak kullanılırlar. Yalnız özellikleri gereği daha yüksek darbe yüklerine maruz kalırlar. Polimer köpüklerden farklı olarak metalik formlar darbe sonucunda deforme olarak kalırlar. Bu nedenle de ancak bir kez kullanılabilirler. Metalik köpükler hafif (kullanılan metalin genellikle %10 yoğunluğunda) ve dayanıklıdır. Hafif imalat malzemesi olarak sürekli önerilmelerine rağmen, günümüzde henüz yeterli ilgiyi görememektedirler. Günümüz üreticilerine örnek olarak Cymat Corporation (Kanada) ve Shinko Wire Company (Japonya) gösterilebilir. [15]

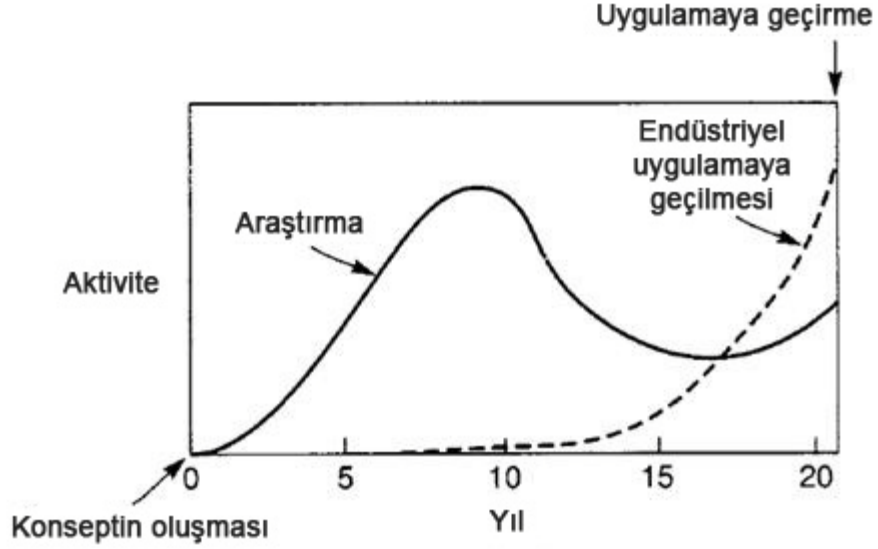
2.2.3 Metalik Köpüklerin Dizayn Özellikleri

Metalik köpükler çoğu mühendise yabancı olan yeni sınıf bir malzemedir. Üretimleri, birçoğu henüz geliştirilmekte olan yeni yöntemlerle yapılmaktadır. Metal köpükler, düşük yoğunluk, yeni fiziksel, mekanik, Isıl, elektrik ve akustik özelliklere sahip olan, ancak henüz tam olarak karakterize edilememiş sınıfta malzemelerdir. Hafif yapılar, enerji emilimi ve ısı koruma için potansiyele sahiptir ve ayrıca en azından bir kısmı ucuzdur. Şu anda ticari olarak bulunan metalik köpükler, genel olarak alüminyum ve nikel tabanlıdır. Ancak özel siparişlere göre magnezyum, kurşun, çinko, bakır, bronz, titanyum, çelik hatta altın metalik köpüklerin üretilmesi için metotlar mevcuttur. Yürütülen araştırmalar ve üretim geliştirmelerinin yoğunluğu göz önüne alındığında, önümüzdeki yıllarda ticari olarak sunulan metalik köpüklerin çeşitleri genişleyecektir. [16]

Metal köpükler hafif iddialı yapılarda; aktif enerji emilimi, ısı kontrol ve yankılanım kontrolü ve diğer konulardaki uygulamalar için ciddi başarılar sunmaktadır. Geri dönüştürülebilir olmamakla birlikte, toksik değildir.

2.3 Metalik Köpüklerin Günümüz Piyasasındaki Durumu

Metalik Köpükler bir kere anlaşıldığı zaman, yeni bir malzeme üzerindeki araştırmaların; bilimsel merak, mühendislik üzerindeki etkisi ve umutlu tahminler sayesinde hızları artar. Mühendislikte bu konunun kullanılması yavaştır. Yeterli tasarım bilgisinin olmayışı, deneyim ve güven eksikliği yüzünden yeni teknik bilgilerin değişimi yavaşlar. Hayal kırıklığı yaratan dönüşüm 5–10 yıl içinde gerçekleşir. [16]



Şekil 2.3: Yeni kavranan bir fikrin bilimsel olarak çalışılması ve endüstriyel olarak adapte edilmesi[16]

2.4 Metalik köpüklerin Kullanım alanları

Metalik köpükler, yapısal özellikleri gereği nedeniyle otomotiv endüstrisinde kullanılmaya çok elverişlidirler. Zaten ilk ortaya çıkışlarından bu yana otomotiv endüstrisi, metalik köpüklere ciddi bir ilgi duymaktadır. Ayrıca gemi yapımı, havacılık endüstrisi ve inşaat mühendisliği konularında kullanım için, metalik köpüklerin yüksek bir potansiyeli vardır. [18]

Hafif ağırlık üretimi

Mühendislik uygulamalarında alüminyum köpükler, ağırlıktan kaynaklanan eğilme direncine karşı en uygun şekle sokmada da kullanılabilirler. Düz köpük panellerin eğilme sertliği, (yaklaşık olarak) yoğunlukları ile ters orantılıdır. Hafif ağırlık üretimi yarı-elastik ve yük-deformasyon eğrisinin geri dönüşümlü kısmını kullanır. [18]

Enerji Emilimi

Yüksek orandaki gözenekleşmeden dolayı alüminyum köpükler deformasyon geçirerek, yüksek miktarlarda mekanik enerji emilimi yapabilmektedirler. Ancak, gerilim malzemenin sıkışma gücüyle limitlidir. Bu sebeplerle metalik köpükler, darbe enerjisi emicileri olarak çarpışmalarda kullanılabilirler. Bu durum yük-deformasyon tablosunun yatay, geri dönüşü olmayan deformasyon kısmını kullanır. Metalik köpüklerin polimer köpüklere göre çok daha yüksek bir çökme direnci

olduğu için, polimer köpüklerin daha önceden uygulamalara giremedikleri yerlerde metalik köpükler boy göstermektedir.

Yankılanım ve Isıl kontrol

Alüminyum köpükler titreşimleri ve ses dalgalarını, belirli koşullar altında emme özelliğine sahiptirler. Dahası ısı iletkenlikleri düşüktür ve yüksek sıcaklıklara dayanabilirler. Ne var ki, bu özellikler nefes kesici değildir; örneğin polimer köpükler çok daha iyi ses yalıtım malzemeleridir. Ancak, metalik köpükler başka özellikleri ile beraber kullanıldığı zaman tercih edilebilirler.

Metalik köpükler bir, iki hatta daha fazla özellikleri beraber kullanıldığı zaman daha yüksek bir rekabet gücüne sahip olurlar. Gerçek çoklu özellik kullanımı, hafif ağırlıklı bir yapı malzemesinin; aynı zamanda ses yalıtımı yapması ve çarpışma anında enerji emici olarak çalışması olacaktır. Basit durumlarda metalik köpükler genellikle ideal çözüm olmamaktadırlar. Direngenlik olasılıkları söz konusu olduğu zaman, sağlam yüzey plakalı sandviç paneller, düz metalik köpüklere göre ön plana çıkar. Metalik köpükler, sandviç panellerde iç bölgeye ya da içi boş sağlam yapıların boş kısımlarına dolduruldukları zaman, çok iyi performans verirler. Bu konuda metal sandviç yapılara karşı bir rekabet oluşabilir. Sandviç panel üretimi konusunda dört tane ana başlık sayılabilir. [18]

Hafif ağırlıklı alüminyum köpük sandviç paneli (AFS)

AFS teknolojisi 1994 yılında Fraunhofer-IFAM tarafından geliştirilmiştir. AFS metalik köpüklerin yoğun metal plakalarla birleşik kullanılmasına bir örnektir. Üç boyutlu parça olarak üretilebilmesi ve yüksek direngenlik – ağırlık oranı, bal peteği gibi rakip teknolojilere göre avantajlı olmasını sağlar. AFS, arabalarda kullanılan çelik parçaların yerini alarak ciddi bir ağırlık kazancı ortaya çıkarabilir. Aynı zamanda AFS, araba üretiminde kullanılan parça sayısını da azaltıp performansı arttırarak üretim maliyetlerini düşürebilir. Örneğin sandviç panellerin titreşim emme özelliği ve hafif olmaları buna bir örnektir. AFS sandviç parçaları diğer alüminyum parçalarla çeşitli kaynak teknikleri ile birleştirilip araba gövdesinde bütünleşebilirler. [18]

Köpükle dolu tüpler ve bölgeler

Alüminyum köpük uygulama alanlarına bir başka örnek de darbe emicilerdir. Sigorta şirketleri artık bir kaza durumunda yolcuları olduğu kadar, araçta oluşacak zararları

azaltacak ve onarım masraflarını düşürecek hukuksal düzenlemelere gitmektedirler. Araba üretim firmaları, çarpışma kutusu kavramını benimseyerek bu konuda önlem almışlardır. Bu kutular, darbenin geldiği yön ile arabanın ön çubuğunun arasına koyulur. Çarpışma kutusu, 15km hızda oluşan çarpmalarda oluşacak bütün darbeyi; deforme olup emerek, arabanın daha pahalı parçalarına zarar gelmesini engellemektedir. Dahası arabanın iskeleti de korunmuş olur.

Bu çarpışma kutularını üretme yöntemlerinden biri de; çarpışma kutusunun içine içi boş bir tüp koyarak, darbe anında bu tüpün plastik olarak çökmesiyle darbeyi emmesidir. Tüpün çökme mekanizması, tüp uzunluğu boyunca belirli aralıklarla katlanmasıdır. Bu bahsi geçen tüp yapısının içine alüminyum köpük enjekte edildiği takdirde, enerji emme özelliği artacaktır. Tüp yine katlanacaktır ama daha kısa aralıklarla katlandığı ve içindeki alüminyum köpüğün enerjiyi emmesi nedeniyle, boş bir tüpten çok daha fazla enerji emilmiş olacaktır.

Polimer yapılarına destek olarak Metal köpükler

Tren yollarında kullanılan araçlarda da darbe emiciler gereklidir. Özellikle yer kısıtlaması ve yüksek performans gerektiren bir mühendislik uygulaması olduğundan metalik köpük kullanımı öne çıkmıştır. Üç firma: Siemens (tren kasası üreticisi), Hübner (darbe emicisi üreticisi), Schunk Sintermetalltechnik (metal köpük üreticisi) COMBINO isimli özel bir sistem geliştirmişlerdir ve bu sistem yaygın olarak kullanılmaktadır. [18]

Döküm çekirdekleri olarak alüminyum köpükler

Alüminyum köpüğün, yoğun bir alüminyum kabuk içindeyken sahip olduğu özellikler, hem üretim sırasında hem de sonrasında var olan yararlı özelliklerini kullanan bir uygulamadır. Başlangıçta şekil verilmiş bir alüminyum köpük (metcomb ya da alulight) ile başlanır. Bu parçaların daha yoğun dış yüzeyleri vardır. Dolayısıyla düşük basınçlarda yapılan kalıp dökümlerde çekirdek(merkez) görevi görebilirler ve bu sayede; dışı döküm, içi hafif kompozit malzemeler elde edilebilir. Bu malzemeler içi boş malzemelere göre çok daha yüksek dayanıma ve yüksek titreşim emme özelliklerine sahiptirler. Ağırlık artışı da çok azdır. [18]

2.5 Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri

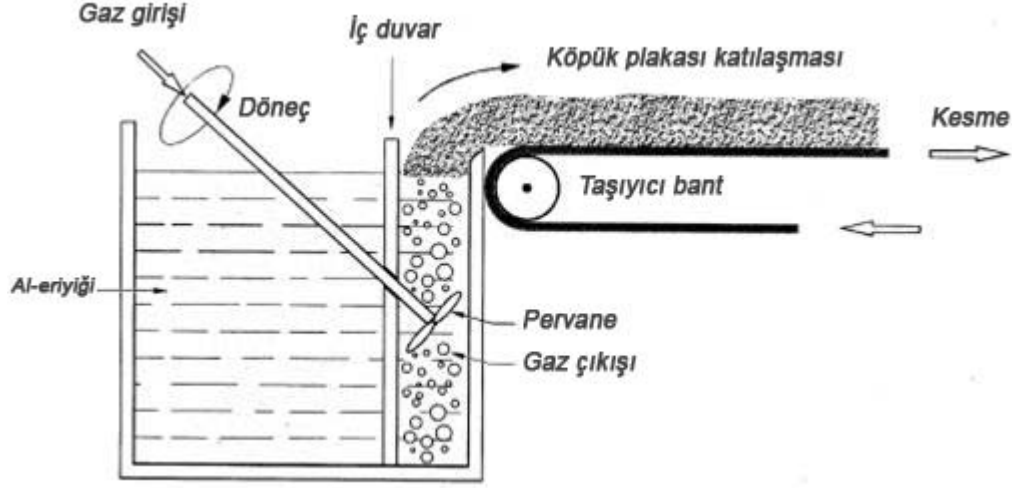
2.5.1 Gaz enjekte ederek köpük üretimi

Aşağıdaki şekilde de görüldüğü gibi, alüminyum eriyiğinin viskozitesi; silikon karbid, alüminyum oksit ya da magnezyum oksit kullanılarak arttırılır. Bu koyulan malzemelerin karışım içinde homojen dağılımını sağlamak, çözülmesi gereken bir problemdir. Malzeme ikinci bir adımda eriyiğin içinde dönen vericilerden ya da titreyen memelerden gaz enjekte ederek düzgün gaz balonları oluşturulur. Gaz balonları ve metalden oluşan viskoz karışım metal yukarıya çekildikçe kuruyup katılaşarak ürünü oluşturur.

İçinde yüksek miktarlarda seramik partiküllere sahip olduğu için, MMC köpüklerine plastik şekil verilmesi sorun yaratabilir. Sistemde kullanılan taşıyıcı bant sayesinde oluşan kayma gerilmeleri, hücrelerin çaprazlama olarak deforme olmasına sebep olur. Bu olayın mekanik özellikler üzerindeki etkisi büyüktür zira anizotropik bir yapıya sebep olur. [1]

Direkt köpük yapma sürecinin bir dezavantajı da, bir süre sonra üretilen köpüğün kesilmesi gereğidir. Bu şekilde de hücreler açılmış olur. Ayrıca hücre duvarları içinde bulunan güçlendirme partikülleri sebebiyle, MMC köpük genel olarak köpük üretme tekniğinde istenmeyen yan etkilere sahiptir. [1]

Bu teknik, gerek anizotropik özellikler gösteren bir ürün ortaya çıkarması, gerek sonuç ürünün plastik şekil vermede ve makinelerde işlenirken kırılabilirliği yüzünden sorun çıkarması nedeniyle proje için uygun değildir.



Şekil 2.4: Gaz enjekte ederek köpük üretimi[1]

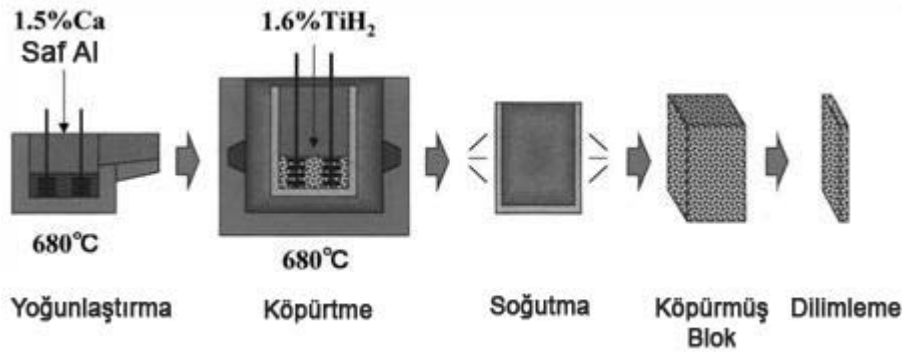
2.5.2 Köpükleştirici ajan ile köpük üretimi:

Bu teknikte karışımın içine gaz üflemek yerine karışımın içine gaz çıkışı yapacak malzemeler koyulur. Alüminyum eriyiğin içine 680 C‘de Kalsiyum metali eklenerek karıştırılır bu sayede karışım viskozitesinin beş katına kadar artırılması sağlanır. Bu işlemde ağırlıkça %1,5-3 oranında kalsiyum kullanılır. Viskozite istenen değere ulaşıncaya, karışıma titanyum hidrür(TiH₂) eklenir(ağırlıkça %1,6). Titanyum hidrür köpükleştirici ajan olarak çalışır ve karışımın içine gaz çıkışı yapar. Karışım bu sayede genişler ve içinde bulunduğu kalıbı doldurur. Bu işlem sabit basınç altında meydana gelir. Kalıbı, karışımın ergime sıcaklığının altında bir sıcaklık değerine soğuttuktan sonra köpük, katı alüminyum köpük halini alır. Daha sonraki işlemler için kalıptan çıkartılır.

Yapılan araştırmalar göstermiştir ki, süreç parametrelerinin dikkatli ayarlanması sonucunda çok homojen bir köpük yapısı elde etmek mümkündür. Hatta bu şekilde üretilen köpükler, döküm tekniklerini saymaz isek şu anda üretilen en homojen köpüklerdir.

Bu teknikle üretilen köpüklerin epoxy reçine kullanılarak sandviç yapılar oluşturulması mümkündür. Aynı zamanda bu şekilde üretilen köpükler yüzey işlemleri görerek korozyona daha dayanıklı bir hale getirilebilir. [1]

Bu teknik gerek homojen yapıli köpükler üretmesi, gerekse de oldukça basit bir süreç gerektirmesi açısından tercih edilebilecek bir yöntemdir.



Şekil 2.5: Köpükleştirici ajan ile köpük üretimi [1]

2.5.3 Katı gaz ötektik katılaşma (gasar)

Bu yöntemde, gözenek büyüklüğü aynı anda oluşan ve birleşme gösterebilen büyük ve küçük gözenekler yüzünden dengeli bir dağılım göstermemektedir. Gözeneklerin konik hatta buruşmuş şekilde olması da mümkündür. Gasar tekniğinde bu gibi sebeplerden dolayı homojenlik özelliği zayıftır, geliştirilmesi gerekmektedir. [1]

2.5.4 Kompakt toz ergitme tekniği

Bu süreç tekniği, metal tozları, elementel metal tozları, alaşım metal tozlarından bir tanesini köpükleştirici ajan ile karıştırıp karışım yoğun bir hale gelir bu yarı üründür. Kompakt hale getirme işlemi gaz çıkarıcı medyumun metal matrisi içinde gömülü kalmasını ve fazla açık gözenekleşmeye sebebiyet vermediği sürece herhangi bir teknik ile yapılabilir.

Isıl işlem bundan sonraki adımdır. Matrisin ergime sıcaklıklarına yakın değerlere çıkıldığı zaman, homojen bir şekilde metal matrisin içine dağılmış olan köpükleştirici ajan çözünür ve gaz çıkışı olur. Gaz çıkışı kompakt hale getirilmiş ara ürünün genişlemesine ve yüksek gözenekleşmeye sahip bir hale gelmesine sebep olur. Bu işlem için gerekli zaman kullanılan malzemelere ve ara ürünün büyüklüğüne göre değişir.

Alüminyum köpük, çelik ve titanyum yüzey plakalarıyla birleştirilebilir. Ancak alüminyum yüzey plakaları seçildiği zaman, birleştirme işleminde yüzey plakalarının erimemesi için ergime sıcaklığı farklı(yüksek) bir alaşım seçilmelidir. [1]

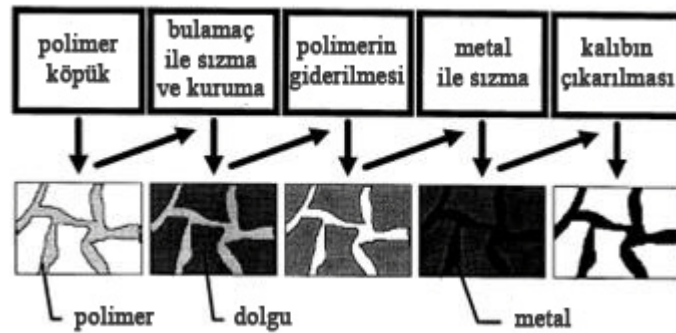
Bu teknikte gerek köpük ara ürününü şekillendirebilme avantajı gerekse de probleme göre, birçok şekilde boş tüp doldurma ve kompozit elde etme yolu olduğu için tercih edilebilecek bir yöntemdir.

2.5.5 Polimer Köpükler ile hassas döküm

Bir polimer köpük (poliüretan köpük) alınır, eğer bu polimer köpüğün kapalı gözenekleri var ise bunlar ağ bağlama işlemi ile açık gözenekli yapıya dönüştürülmelidir. Daha sonra bu polimer köpüğün açık gözenekleri ısıya karşı yeterli dayanıklılığa sahip bir çamur (fenolik reçine, kalsiyum karbonat) ile doldurulur ya da basit alçı da kullanılabilir. Bu işlem bittikten sonra polimer köpük ısıtılma işlemi ile kompozitten alınır. Polimer köpüğün uçarak geride bıraktığı boşluklara ergitilmiş metal dökülür.

Ancak, bu döküm işlemi yapılırken kalıbın ısıtılması ve basınçlı döküm yapılması gerekebilir. Hatta tercih edilmelidir çünkü, normal, yerçekimine dayanan döküm tekniği ile işlem yapıldığı takdirde boşlukların dolması bir problem teşkil etmektedir. Döküm işlemi tamamlandıktan sonra, kalıp malzemesi çıkartılır (basınçlı su ile) ve bu sayede polimerin sahip olduğu köpük yapısına aynen sahip bir metalik köpük elde edilmiş olur. [1]

Bu yöntemim problemleri arasında döküm ile bütün boşlukların doldurulması, yönlü katılaşmanın kontrol altında tutulması ve kalıp malzemesinin metalik köpüğe zarar vermeden çıkarılması gösterilebilir.



Şekil 2.6: Polimer köpükler ile hassas döküm[1]

2.5.6 Latis blok malzemeleri (LBM)

LBM' ler her biri iki düğüm barındıran, tekrarlanan düz kirişlerdir. Bu yapılar oldukça olağan olup bütün düğümler birbiriyle bağlıdır. Bu malzemeler hassas dökümle imal edilmiş polimer elementlerden oldukça basit bir şekilde üretilebilir.

Bu polimer parçalar yapıştırıcılar ile birbirlerine bağlanıp daha sonra metal hassas dökümü için bir model olarak kullanılırlar. Ortaya çıkan malzeme çok düzenli polimer modelin bir benzeridir.

Bu yöntemin en büyük özelliği, malzemenin teorik en uygun değerlere yakın mekanik özelliklere sahip olması, bu özelliklerin tahmin edilebilmesi ve tekrar üretim kolaylığıdır. [1]

Bu yöntem mekanik özellikler, üretim kolaylığı gibi sebeplerden ötürü tercih edilebilir.

2.5.7 Yer tutan malzemelerin etrafına döküm

Düşük ağırlıklı gözenekli metaller organik, inorganik granüller ya da düşük yoğunluklu içi boş kürelerin etrafına ergimiş metal döküm yapılarak veya bu malzemeleri eriyik metalin içine karıştırarak elde edilebilirler. Bu granüller işlem sonrasında ya metalik yapının içinde kalarak sintaktik köpük oluştururlar. Ya da uygun çözücüler ve asitlerle eritilerek veya ısıl işlemle girerler.

Sandviç yapıların bu yöntemle yapılması mümkündür. Bunun için dış yüzeyi oluşturacak plakaların arasına yer tutucu granüller koyularak oraya döküm yapılır. Dış yüzey plakalarının metalürjik bir bağ yapabilmeleri için yüzeylerinin erimesi gerekmektedir. Alternatif olarak içi boş yer tutucular bir kalıba koyularak hem dış yüzeyler hem de iç kısım aynı anda dökülebilir.

Bu yöntemin en büyük avantajı gözenek dağılımı üzerinde ciddi bir kontrole sahip olmasıdır. Ancak bu yöntemde üretilen köpüklerin gözenekliliği %80'nin altında kalmaktayken diğer yöntemlerle %98 gözeneklilik elde edilebilmektedir. [1]

Bu yöntem, gözenek dağılımı üzerindeki kontrol ve tek seferde döküm yaparak üretim imkânı vermesi sebebiyle tercih edilebilir.

2.5.8 Sprey köpükleme (Osprey süreci)

Bu yöntemde elde edilen metalik köpüklerin gözenekliliği %60'lara kadar çıkabilmekle beraber henüz düzenli bir morfolojiye sahip değildir. [1]

2.5.9 Gaz hapsedme tekniği

Metaller kompakt toz ergitme tekniğindeki gibi köpük haline gelirler, ancak burada metaller eritilmez ve köpükleştirici ajan kullanılmaz. Bu işlem için, önce tozlar yoğun bir ara ürün haline getirilirler, sıkıştırma sırasında tozların arasına gaz girişi olmasına izin verilir. Bu ara ürün ısıtıldığı zaman içerde hapsolmuş olan gaz genişlemek isteyecek ve ara ürünün genişlemesi sağlanacak. Bu işlem tam bir köpük yapma işlemi değil daha çok bir sürünme işlemidir.

Bu yöntem uçak üreticisi Boeing tarafından uçak gövdeleri için gözenekli titanyum üretmekte kullanılmaktadır.

Bu işlemde kalıp kullanılarak hep tozun genişmesi sınırlandırılmış olur hem de yoğun bir dış yüzey meydana getirebilirler. Bunun için ürünü sıcak işemden geçirmek yeterlidir. Bu şekilde köpük içyapıya ve yoğun dış yapıya sahip sandviçler yapmak mümkündür. [1]

Bu yöntem hem titanyum köpük üretimi yapılabilmesi hem de sandviç yapıların üretilmesine olanak tanıdığı için tercih edilebilir.

2.5.10 Metalik içi boş küre yapıları

Bu yöntemde içi boş küreler kullanılır. Metal olarak bakır, nikel, çelik, titanyum kullanmak mümkündür. İçleri boş küreler sinterleme yöntemiyle birbirleriyle bağlanırlar. Bu küreleri yapmak için birçok çeşitli yol vardır. Kapalı yapılar kürelerin etrafını metal tozları ile doldurup sinterliyerek elde edilebilir. Bu durumda ince duvarlı küreler yeterli olacaktır. Bu yöntemle sandviç yapılar oldukça düz ve kolay bir şekilde üretilmektedirler. Sandviçte kullanılacak panellerin arasına koyulan küreler ve sonraki sinterleme sayesinde plakalar ve iç köpük yapı arasında bağ sağlanmış olur. [1]

Bu yöntemin avantajlarından biri gözenek büyüklüğü ve dağılımı konusunda sahip olunan yüksek kontroldür. Bu sayede üretilen malzemenin mekanik ve fiziksel

özellikleri daha rahat tahmin edilebilir haldedir. Bir diğer avantajı ise, teoride toz metalürjisinde kullanılan bütün metallerin bu yöntemle açık olmasıdır (süper alaşımlar, titanyum alaşımları, inter metalik alaşımlar). Bu sayede bu yöntemle üretilmiş malzemeler yüksek sıcaklıklardaki uygulamalarda kullanılabilirler. Bu yöntemde sinterleme yapmak yerine döküm uygulaması da mümkündür. Ancak basınçlı hassas döküm yapılması tercih edilmelidir. [1]

Bu yöntem birçok metalin kullanılmasına izin verdiği özellikle titanyum köpük üretimine izin verdiği kolay sandviç yapı üretimi ve mekanik özelliklerin tahmini açısından avantajlı olduğu için tercih edilebilir.

3. KOMPAKT TOZ ERGİTME TEKNİĞİ

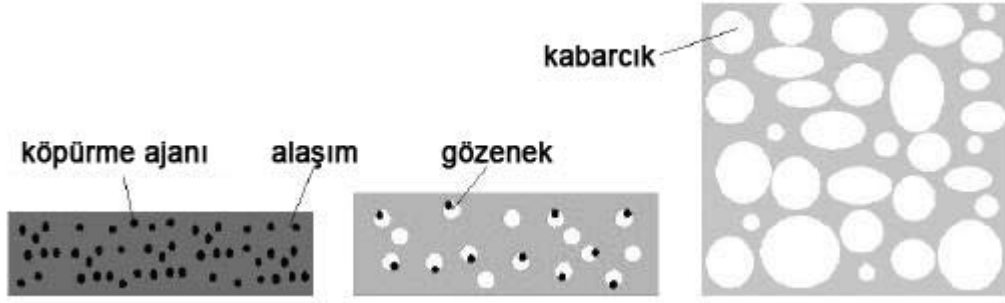
3.1 Kompakt Toz Ergitme Tekniğinin Özellikleri

Fraunhose Enstitüsü Bremen Almanya’da geliştirilen bir yöntemle köpük metaller üretilmesi mümkündür. Sürecin temel prensipleri nispeten eski olmasına karşın, sürecin gelişmiş bir hal alması ve tatmin edici kalitede köpük metallerin üretilmesi ancak son yıllarda mümkün olmuştur. Metoda başlangıç elemanları toz halinde olduğu için “toz metalürjisi” olarak geçmesine rağmen köpürme işlemi sıvı fazda meydana gelir. [1]

3.2 Kompakt Toz Ergitme Tekniğinin İşleyişi

Üretim metal tozlarının (elemental metal, alaşım metal, değişik metaller) köpürtücü ajan ile karıştırılmasıyla başlar. Bu işlemten sonra ortaya çıkan karışım yoğun yarı bitmiş bir ara ürün oluşturması için sıkıştırılır. Prensip olarak sıkıştırma işlemi, köpürtme ajanının metal matrisi içine gömülmesi ve yüzeyde gözenek kalmaması kaydıyla her türlü sıkıştırma tekniği ile yapılabilir. Buna örnek olarak sıcak tek yönlü/izostatik pres, ekstrüzyon ya da toz haddeleme gösterilebilir. Hangi yöntemin seçileceği hedeflenen ara ürünün tipine bağlı olarak değişir. Ancak ekstrüzyon şu anda en ekonomik yöntem olması sebebiyle en çok tercih edilen yöntemdir. Kare profiller kullanılarak haddeleme işlemi sonunda ince saclar elde etmek mümkündür. Ara ürünün üretimi çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır, geride kalan bir gözenekleşme ya da başka bir bozukluk daha sonraki işlemlerde kötü sonuçlara yol açacaktır.

Bir sonraki adım, metal matrisin ergime noktasının civarlarında yapılan ısıtılma işlemidir. Yoğun metalik matris içinde homojen olarak dağılmış olan köpürtme ajanı bozunur. Ortaya çıkan gaz, sıkıştırılmış ara ürünü genişlemeye zorlar ve bu şekilde yüksek gözenekleşmeye sahip bir yapı elde edilir. Tam genişlemeye ulaşılması, sıcaklık ve ara ürünün büyüklüğüne bağlı olarak bir kaç saniye ve birçok dakika arasında değişir. Bu işlem aşağıdaki grafikte de görülmektedir. [1]



Şekil 3.1: Köpürme ajanının bozunması ve metal matrisin genişlemesi[14]

Katı metal köpüğün yoğunluğu, köpürtme ajanının miktarı, sıcaklık ve ısınma hızı gibi diğer köpürtme parametrelerinin değiştirilmesiyle kontrol edilebilir. Çinko ve alüminyum alaşımları için, titanyum ya da zirkonyum hidrür (TiH_2, ZrH_2) köpürtme ajanı olarak kullanılır. Çelikler ise $SrCO_3$ gibi karbonatlar kullanılarak köpürtülebilirler. Metal hidrürlerin köpürtme ajanı olarak kullanıldığı durumlarda %1'den düşük miktarlarda köpürtme ajanı birçok durum için yeterli olacaktır.

Bu metot sadece alüminyum ve alaşımlarına özgü bir yöntem olmayıp, uygun üretim parametreleri ve köpürtücü ajanlar ile kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve bir takım başka metal ve alaşımlarının köpürtülmesi mümkündür. Ancak köpürtme için en çok kullanılan alaşımlar, saf alüminyum ve 2xxx ya da 6xxx gibi işlenmiş alaşımlarıdır. $AlSi_7Mg$ (A356) ve $AlSi_{12}$ gibi döküm alaşımları da düşük ergime noktaları ve iyi köpürme özellikleri sebebiyle sıkça kullanılmaktadırlar ancak prensip olarak üretim parametrelerinin dikkatli bir şekilde ayarlanması ile her türlü alüminyum alaşımının köpürtülmesi mümkündür. [1]

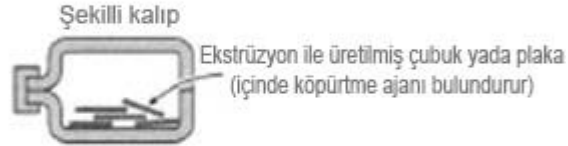
a) Malzemeler seçilir



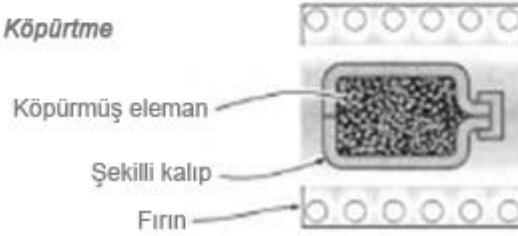
b) Birleştirme ve ekstrüzyon



c) Şekilli kalıba koyulma



d) Köpürtme



Şekil 3.2: (a) tozların seçilmesi ve karıştırılması. (b) tozların ekstrüzyon ile sıkıştırılması. (c) ara ürünün kapalı bir kalıp içerisine koyulması. (d) kalıp içindeki ara ürünün ısıtma işlemi ile köpürtülmesi [20]

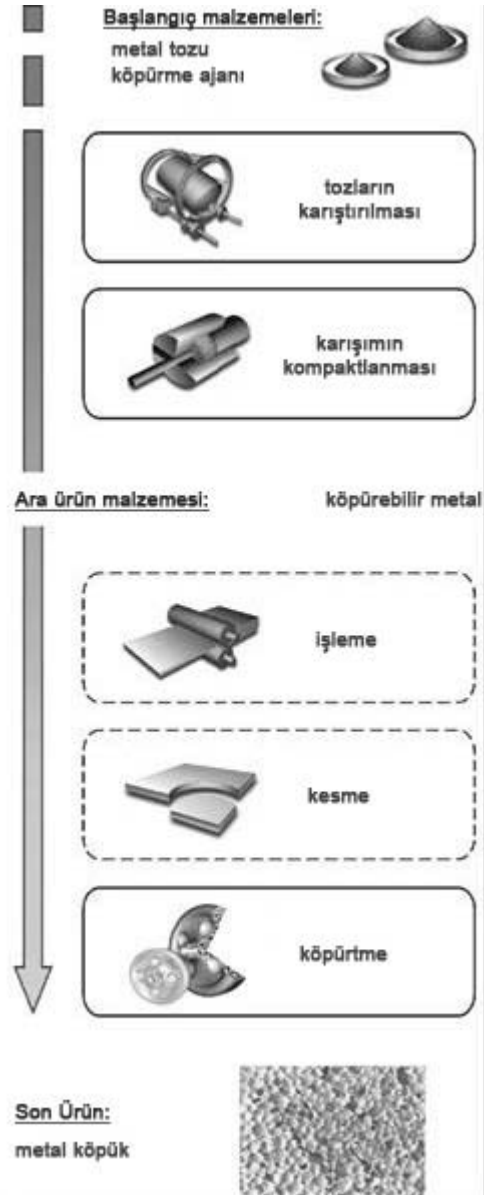
Ara ürünün fırında köpürtülmesi sırasında genişleme belirli boyutlarda sınırlanmazsa, ortaya belirli bir şekli olmayan metal bir yumru çıkacaktır. Ara ürünün sinterlenerek içi boş bir kalıbın içine girmesi sonucunda, neredeyse kesin geometrik şekilli parçalar elde edilebilmektedir. Ara ürünün, içine koyulacağı kalıp şeklinde işlenmesi köpürme sırasındaki akış özelliklerini olumlu etkileyeceği için yapılan işleme avantaj sağlayacaktır.

Köpürmekte olan metalik köpüğün uygun kalıplara enjekte edilmesiyle, oldukça karmaşık şekilli parçalar üretilebilmektedir. Buna göre köpürebilecek bir ara ürün, içine konduğu kapalı bir kalıp içerisinde ergime noktası civarına kadar ısıtılır. Köpürme başladıktan ve ara ürün yarı katı hale geldikten sonra, kütle hareketli bir piston yardımıyla kalıbın içine itilir ve burada genişlemesinin tamamlanması sağlanır. Eğer bu işlem çok dikkatli ve kontrollü bir şekilde yapılmazsa, ortaya çıkan metalik köpüğün gözenekli yapısı kusurlara sahip olabilir. Ancak üretimin bu şekilde gerçekleştirilebilmesi karmaşık şekilli parçaların ekonomik bir şekilde seri üretilmesi için önemli bir adımdır. [1]

3.2.1 Kompakt toz ergitme tekniği ile sandviç panelleri üretimi

Köpük içyapıya ve iki metal yüzölçümlü saca sahip olan sandviç panellerin üretimi de yüzey metallerini haddeleyerek köpürebilen ara ürüne bağlanarak kullanılabilir. Bu işlemten sonra istenirse ürün işlemten geçirilerek başka bir şekil verilebilir (örn: derin çekme). Son işlemde ise sadece iç köpürebilen malzeme genişler dış yüzeyler değişim geçirmez. Bu işlemlerin sonucunda sandviç yapı elde edilir[21].

Alüminyum köpük, çelik ve titanyum yüzey plakalarıyla birleştirilebilir. Ancak alüminyum yüzey plakaları seçildiği zaman, birleştirme işleminde yüzey plakalarının erimemesi için ergime sıcaklığı farklı(yüksek) bir alaşım seçilmelidir. [1]



Şekil 3.3: Kompakt toz ergitme tekniğinin değişik geometrik şekilli parça üretiminde uygulanan hali[1]

Tüp veya istenen şekildeki malzemeler, değişik şekillerde alüminyum köpük ile doldurulabilirler:

En kolay olan yöntemde içi doldurulacak olan malzeme ve içini dolduracak olan ara ürünle beraber fırının içine koyulurlar ve ara ürün köpük halini alarak içi doldurulacak malzemenin içini doldurur. Ancak bu yöntemde, sadece doldurulacak parçanın ergime sıcaklığı, dolduran köpük malzemesinin ergime sıcaklığından dikkat çekecek kadar yüksek olması gerekmektedir. (örn: çelik-alüminyum)

Alternatif olarak bu yöntemde basit bir şekil kullanmak yerine, içi doldurulmak istenen malzemenin içine içi boş (oyuk) şekilde köpük haline gelecek yarı ürün yerleştirilir. Köpük olacak yarı ürün ile doldurulacak ürün birbirine sıkıca temas etmektedir. Bu sayede köpük oluşurken sadece iç kısma doğru ilerleyebilecektir. Bu şekilde malzemeye köpük oluşumu sırasında belirli bir mekanik destek sağlanmış olur. Aynı zamanda köpük haline gelecek ara ürün ile doldurulacak parçanın temas etmesi parçanın köpük oluşumu sırasında çok ısınmasını da engelleyecektir. [1]

Üçüncül olarak iki tane konsantrasyonları belirli ve birbirleriyle metalürjik bağ yapabilecek malzemeler, beraber bir kompozit halini almaları için ekstrüzyon yapılır. Bunun bir uygulaması olarak, iç tüpe köpük halini alacak malzeme ve dışına da normal alüminyum alaşım seçilebilir. İşlem sırasında iç tüpte bulunan malzeme merkeze doğru genişleyecek ve tüpü dolduracaktır.

Bir başka kompozit yapma işlemi ise, önceden üretilmiş, şekil verilmiş alüminyum köpüğün üzerini ısıl sprey tekniği ile kaplamak ve bu sayede yoğun dış yüzeye sahip bir kompozit meydana getirmek mümkündür.

Son olarak, eğer alüminyum köpükleri konvansiyonel kum döküm sürecinde, çekirdek olarak kullanılırsa o zaman içinde alüminyum köpük gömülü döküm yapısal kompozitleri elde etmek mümkündür. [1]

3.2.2 Toz ergitme tekniği ile kompozit üretimi

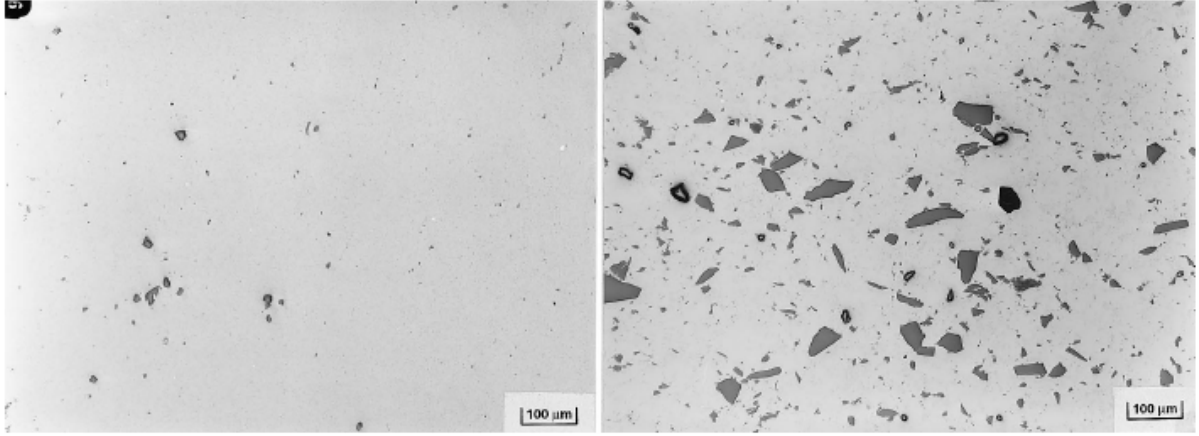
Toz ergitme tekniği ile metal köpük ve seramiklerden oluşan kompozitler de üretmek mümkündür. Alüminyum köpük (AlSi12) ile alümina plakalara 500°C de 100 KPa basınç uygulayarak difüzyon bağı yaptırılabilir. Bunun dışında da 6061 kodlu alüminyum alaşımı da iki seramik arasına belirli bir mesafe tutularak genişletildiği zaman alümina plakalar ile bağ yapar. [1]

3.3 Kompakt Toz Ergitme Tekniğinin İncelenmesi

Deneyde kullanılabilecek iki farklı sıkıştırma yöntemi daha önceden denenmiştir. Ekstrüzyon için, önce köpürtücü ajan tozları ve toz metal karışımı, silindirik kalıplarda çok gerekli olmasa da tozları korumak ve işlemi kolaylaştırmak için soğuk izostatik presleme ile sıkıştırılıp, daha sonra kalıplar 360 °ye ön ısıtılmış ve dikdörtgen barlar olarak ekstrüzyon işleminden çıkmışlardır. Bu barlar ikinci bir ekstrüzyon işlemine tabi tutularak daha küçük parçalar üretilmiştir.

Sıcak presleme toz karışımının eksensel olarak yoğunlaştırılması şeklinde silindirik bir kalıpta iki adımda yapılmıştır. Önce tozlar kalıbın içine, daha önceden presleme ısısına çıkarılmış fırının içine koyulup, sabit basınç altında belirli bir süre preslenmişlerdir. Bu süre içinde tozların sıcaklığı fırının sıcaklığına ulaşmıştır. Belirlenen zaman sonunda basınç arttırılmış ve yine sabit basınç altında esas sıcak presleme işlemi yapılmıştır. İlk ısıtma işlemi tozların sıcak pres sıcaklığına ısıtılmaları sırasında kontrolsüz oksitlenmelerinin engellenmesidir. İki işlem sonunda da prensip, makinede işlem görebilecek boyutlarda ara ürün üretmektir.

Aşağıdaki şekilde iki farklı köpükleşebilen ara ürünün, preslenme sonrası mikro yapısı görülmektedir. Mikro yapıların ikisi de gözeneklidir. TiH_2 parçacıkları açık gri olarak iki mikro yapıda da gözükmemektedir. Daha koyu açılı silikon parçaları sadece $AlSi_7$ yapısında gözükmemektedirler[19].



Şekil 3.4: %0,6 TiH₂ içeren 6061 sol ve AlSi₇ sağ görüntüleri[19]

İki farklı köpürtme işlemini ele alırsak, birinci yöntemde fırın içinde köpürme tüpü olmadan istenilen sıcaklığa ısıtılıp içine köpürme tüpü sonradan alınır. Numune etrafında ani sıcaklık artışı meydana gelir. Bu yöntem ile mümkün olabilecek en hızlı sıcaklık artışı elde edilir.

Buna alternatif olarak, soğuk fırın önce içine cam tüp içindeki numuneyi alıp oda sıcaklığından istenilen sıcaklığa ısıtılmıştır. Bu sayede düşük ısıtma oranları elde edilebilmektedir[19].

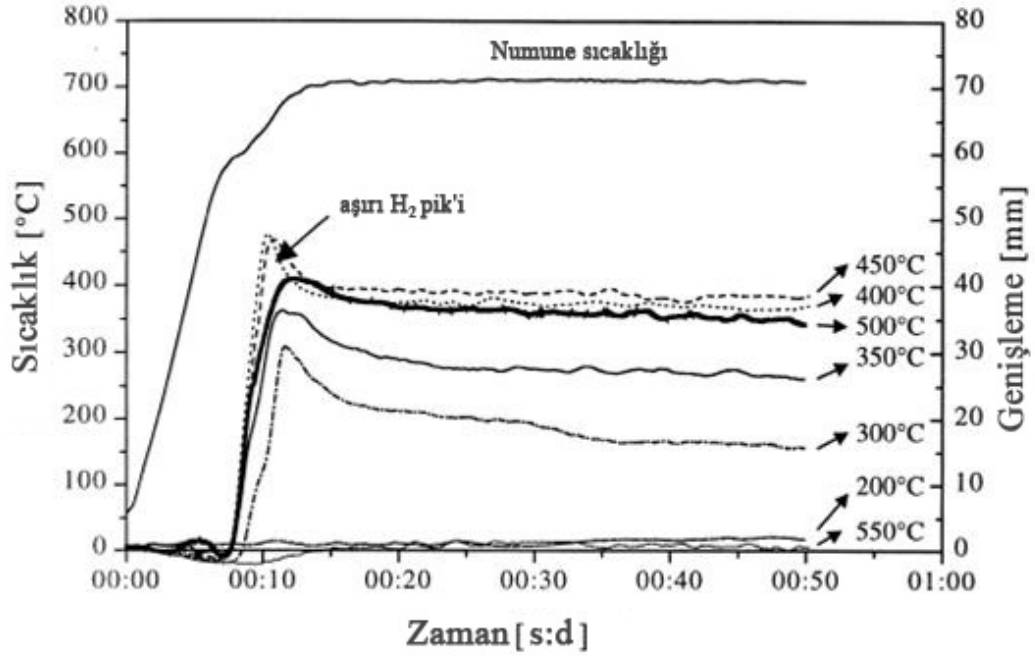
3.3.1 Deneyin yenilenebilmesi

Yapılan deneyler sonucunda köpürtme testlerinin yenilenebilir şekilde yapılabileceği kararına varılmıştır. Ancak köpük yüksekliğindeki 5mm den az farklar göz önüne alınmamıştır[19].

3.3.2 Kompakt hale getirme koşullarının etkisi

Sıcak presleme sıcaklığının kritik bir parametre olduğu açıktır ve aşağıdaki şekilde görülmektedir. En fazla genişleme 400 – 450°C arasında sıcak preslenmiş numunelerde görülür. Bu aralığın daha üstünde ve altındaki sıcaklıklarda maksimum genişleme daha düşüktür ve 200°C, 500°C’ler için geçerli olan, aşırı durumda hemen hemen hiç bir köpükleşme görülmemektedir. Bu olayın sebebi düşük kompres sıcaklıklarında düşük yoğunluklu ve oldukça fazla açık gözenekleşmeye sahip bir ara ürün elde edilir, bu boşluklardan da hidrojen gazı rahatlıkla kaçabilir.

Bu sebepten de balon oluşmaz ve genişleme olmaz. Yüksek sıcaklık değerlerinde yapılan kompreslerde hidrojen presleme sırasında kaybolur. 550°C'de yapılan preslemede hidrojen tamamen kaybolur[19].



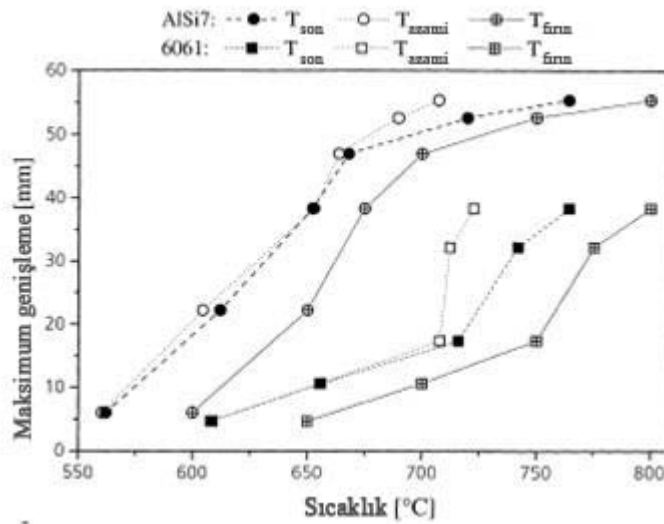
Şekil 3.5: Değişik sıcaklıklarda preslenmiş alüminyum köpüklerin sabit sıcaklıktaki fırının içinde sıcaklık ve zamana bağlı olarak genişlemeleri[19]

Optimum sıcak presleme sıcaklığı 400-450°C arasında olup bu sıcaklık serbest TiH₂ tozu için ayrışmaya başlama sıcaklığıdır. Ancak gaz geçirmez köpürebilen öncü metal matrisi içindeki TiH₂'ye hiç bir zarar gelmez[19]. Sıcaklığa bağlı genişleme grafiğinde görülen pikin sebebi, öncü malzemenin içinde bulunan fazla ve iyi bağlanmamış hidrojenin köpürmenin ilk etaplarında dışarı çıkması ile görülür.

Bu fazla hidrojen çıkışı çok hızlı bir köpürmeye ve ince duvarlı yapıların çökmesine sebep olabilir. 500°C'de preslenmiş numunede bu durum görülmemekte ve belirli bir pik yapmadan stabil konuma gelmektedir. Bu anlaşılabilir bir durumdur çünkü, 500°C'de presleme işlemi ara ürünün içindeki fazla hidrojeni dışarı çıkarmak için tam yeterli sıcaklıktır. Ancak bu sıcaklık henüz bütün gazı dışarı atamayacak kadar düşüktür. Bu olay 550°C'de gerçekleşir. Bu sonuçlardan çıkarılabilecek sonuç ağırlıkça %0,6 oranında kullanılan köpürtücü ajanın gereksiz derecede fazla olduğu ve biraz daha az kullanılabileceğidir. Titanyum hidrat oldukça pahalı bir malzeme olduğu için bu işlem maliyeti düşürür[19].

3.3.3 Köpürtme ortamının etkileri

Köpürtme işleminin seçilen köpürtme sıcaklığına duyarlı olduğu bariz bir gerçektir. Eğer malzemenin son sıcaklığı solidüs eğrisinin altında ise, çok hafif bir genişleme dışında pek bir etki görülememektedir. Eğer son sıcaklık malzemenin solidüs ve likidüs eğrileri arasında bir yerde ise köpürme işlemi gözlenebilir. Ancak 6061 alüminyum için bu aralıktan daha yüksek değerler daha iyi köpürme sonuçları verecektir. Bunun sebebi malzemenin viskozitesinin hala yüksek olması ve oksidasyonun balon hareketine direnç koymasındır. Sıcaklık yükseldikçe viskozite düşecek ve gaz çıkışı desteklenecektir, bu sayede daha iyi sonuçlar alınabilir. AlSi7 için ise 750°C’ de hacim genişlemesi nerdeyse durma noktasına gelmektedir.



Şekil 3.6: Maksimum genişleme eğrisinin fırın sıcaklığına bağlı eğrileri[19]

Buradaki şekilde maksimum genişleme eğrisini fırın sıcaklığının bir fonksiyonu olarak görüyoruz. Numunedeki son sıcaklık T_{final} ve maksimum genişleme sırasında numunenin sıcaklığı $T_{max. exp.}$. Burada fırının sıcaklığı yerine numunenin sıcaklığının alınmasının sebebi, fırının sıcaklık değerleri ile numunenin sıcaklık değerleri arasında en uzun süreli deneylerde bile 35-50°C’lik bir fark olmasıdır. Bu fark fırındaki ısı kayıplarıdır[19].

T_{final} , $T_{max. exp.}$ arasındaki fark incelendiğinde görülür ki, bu değerler düşük fırın sıcaklığı için neredeyse aynı değerlere sahiptirler. Ancak yüksek fırın sıcaklıklarında numunenin sıcaklığı maksimum genişlemeye ulaştıktan sonra artmaya devam etmektedir. Bu sebeple $T_{final} > T_{max. exp.}$ burada görülen iki durumdan ikincisi yüksek genişleme oranları yakalamak için bir ön koşul gibi gözükmektedir.

Numunede hızlı sıcaklık artışı elde etmek için yüksek ısı transferine, dolayısıyla yeteri kadar yüksek ısıda bir fırına ihtiyaç vardır[19].

3.3.4 Gözenek morfolojisinin köpürme işlemi sırasındaki değişimi

6061 alüminyum ve AlSi₇ alüminyumun çökme davranışları oldukça farklıdır. AlSi₇ köpük maksimum genişlemeye ulaştığı zaman şeklini 6061 alüminyum kadar çok kaybetmez. 6061 köpükte aşağıda kalın bir metal tabakası oluşur. Ayrıca 6061 yapılarında bozulma görülür ve kubbeli yapı kaybolur. AlSi₇ köpük örnekleri kubbeli yapılarını ve normal hücre yapılarını bütün test boyunca korumuşlardır[19].

3.3.5 Toz işlemlerinin köpürme işlemine etkisi

Köpük bütünlüğünü etkileyen bir başka faktörde tozların işlemde geçirilirken ne kadar temiz tutulduklarıdır. Saf olmayan tozlar ya da emilmiş su, kir ya da öncü ara ürün içinde sıkışmış gazların köpürtme işlemi sırasında kötü etkileri olduğu düşünülmektedir, çünkü bu saflığı bozan köpürtme ajanından ilk gaz çıkışları sırasında büyük boşluklar için çekirdek görevi görebilirler ve bu boşluklar ilerde büyük gözeneklere dönüşecekleri düşünülmektedir[22].

3.3.6 Oksitlerin köpüren toz kompaktlarına etkisi

Körner, oksitlerin alüminyum köpüklerin kararlı hale getirilmesindeki etkilerini birçok deneyle araştırmıştır. Aşağıdaki varsayımlara göre bir model oluşturmuştur;

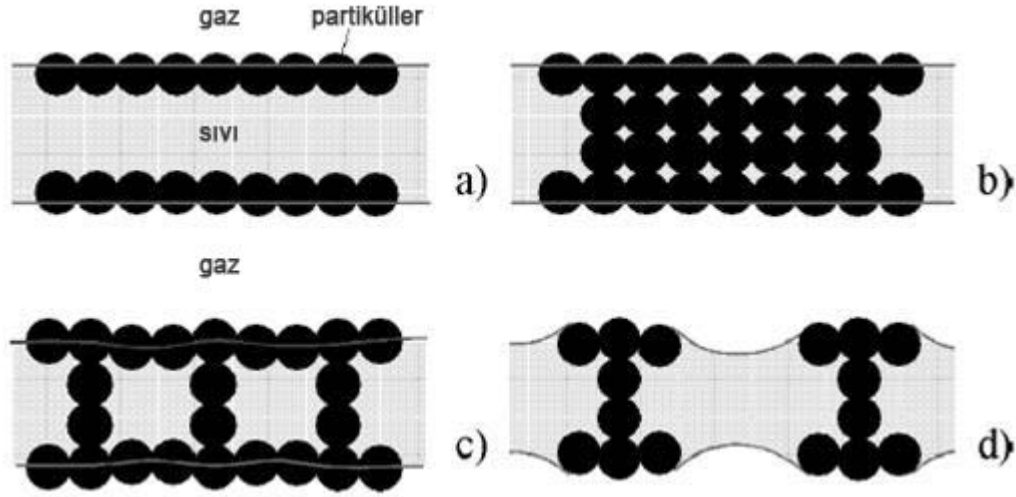
Preslenmiş tozdaki oksit ağı köpürme işlemi sırasında parçalanmıştır. Parçalar bir araya gelerek eriyik içinde serbestçe yüzen ağ parçaları oluştururlar.

Bu ağ parçalarının içine sıvı sızmış olup mekanik yüke dayanabilirler.

Ağ parçacıkları eriyik tarafından tamamen ıslatılmışlardır bu sebeple her filmin iki yüzeyi arasında kalmışlardır.

Bu bir arada hapis olma olayı, ağ parçalarının mekanik kararlılığı sayesinde itici bir güç oluşturur ve bu filmleri incelemekten korur.

Bu model deneysel çalışmalar ile desteklenmiş olup hücrelerin kalın kısımlarında oksit toplaşmaları bulunmuş, ince kısımlarında ise hiç okside rastlanmamıştır. Bu modeli en iyi betimleyen şekil aşağıdaki şeklin d) şikkıdır[14].



Şekil 3.7: Alüminyum köpüklerin oksitlerle stabilizasyonunda hücre çeperleri[14]

3.3.7 Metal köpüklerin kararlılığı

Sıvı metalik köpükler ömürleri boyunca sürekli geçici durumlarda bulunan ve morfolojileri sürekli değişen sistemlerdir. Neredeyse asla kararlı değildir, en iyi şekilde yarı kararlıdır. Bazı değişimler sürecin gereği olmakla birlikte geriye kalanlar zarar vericidir ve metal köpük teknolojisinin uygulama alanını kısıtlar.

Bir köpük eğer köpürme ve katılaşma arasında geçen zamanda fark edilir derecede değişmiyorsa kinetik olarak kararlı denebilir[14].

Köpük üzerine etkiyen faktörler şunlardır:

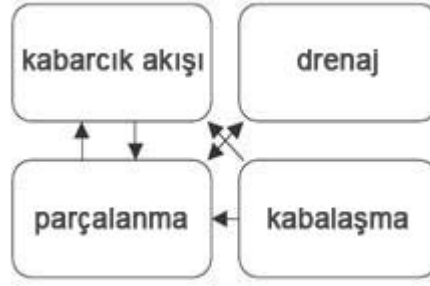
Yer çekimi

Dışarıdan atmosfer basıncı ve içerden gaz basıncı

Mekanik kuvvetler

Metalik fazın içinden etkiyen kuvvetler (yüzey gerilimi, kapılar etki vs.)

Bu etkenlerden herhangi birindeki dengesizlik köpüğün hareket etmesine sebep olacaktır.



Şekil 3.8: Metalik köpük oluşumundaki olumsuz mekanizmaların etkileşimi[14]

Yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi köpük morfolojisi sınıflandırılabilir.

Kabarcık akışı: balonların birbirleri ile yer değiştirmeleri ve hareket etmeleri. Bu olay ya dış etkenler ya da iç basınç değişiklikleri sebebiyle olur (örn: köpürme işlemi).

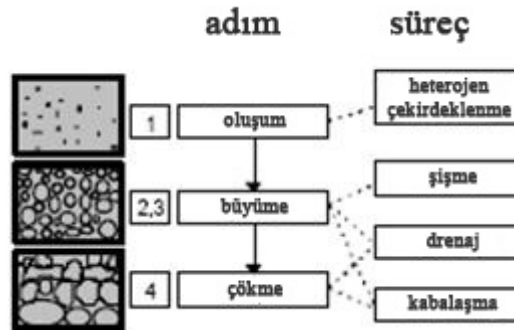
Drenaj: sıvı metalin plato sınırlarından (üç adet köpük filminin kesişme noktası) akması. Bu olaya yer çekimi ve kapılar etki sebep olur.

Parçalanma: bir filmde ani kararsızlık ve arkasından yok olması.

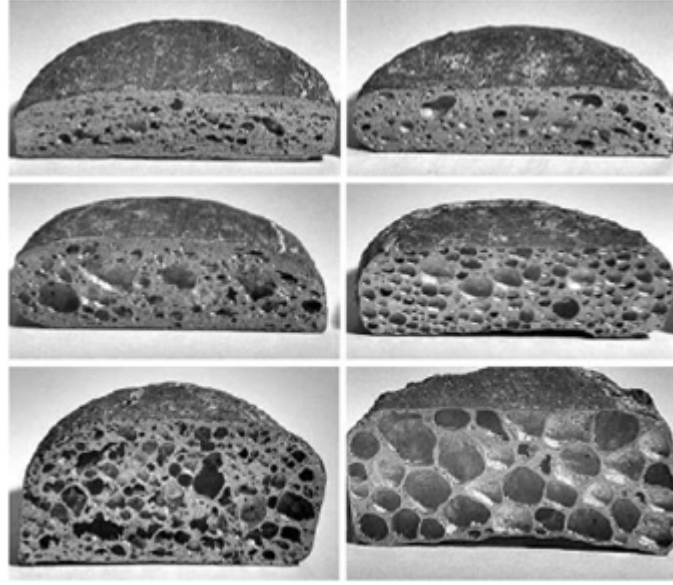
Kabalaşma: küçük balonlardan büyük balonlara yavaş gaz akışına denir. Basınç farkı yüzünden oluşur .

Aşağıdaki grafikte görüldüğü gibi etkiler bağımsız değildir. Örneğin boşaltma, filmlerin incelmesine ve parçalanmasına yol açabilir.

Bu olaylar sıvı formdaki köpükler konusunda iyi araştırılmış konulardır. Ancak metal köpükler hakkında geçirgen olmamaları, yüksek işlem ısıları ve sıvı metallerin kimyasal reaktivlikleri sebebiyle araştırma yapmak daha zordur[14].



Şekil: 3.9: Metalik köpük oluşumunda olumsuz mekanizmaların oluşumu etkilemesi ve sonuçları[9]



Şekil 3.10: Alüminyum köpükleri genişlemeden sonra görülmektedir. Yükseklikleri orijinal yarı ürüne göre 2, 2.5, 4 kat daha fazladır Sol kolon işlem görmemiş TiH_2 ile köpürtülmüş, sağ kolon ise 180dk. $520^\circ C$ ' de işlem görmüş TiH_2 ile köpürtülmüştür.[23]

3.4 Kompakt Toz Ergitme Tekniğini Etkileyen Faktörler

Katı bir öncü ara ürün, ergime sıcaklığının üzerine ısıtılarak ve orda tutularak köpürtülür. Bu işlemde köpürtme işlemlerinde değişebilen birçok parametre vardır;

Alaşımanın birleşimi

Öncü ara ürünün oksit içeriği

Ayrıca var olan seramik parçaların tipi ve içeriği

Gaz medyumunun tipi, gördüğü ön işlem ve içeriği

Öncü ara ürünün üretim parametreleri (örn: işlem sıcaklığı, pres süresi, basınç değeri)

Köpürtme sırasında sıcaklık değerleri, buna sıcaklığın değişme hızı ve köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi dâhildir.

Köpürtme sırasındaki basınç değerleri

Yer çekimi oranı

Kompakt toz ergitme tekniği ile üretilen alüminyum alaşım köpüklerin köpürme kinetikleri, köpürme sırasında oluşan birçok mekanizmanın karmaşık etkileşimleri sonucunda belirlenir.

Köpürtme kuvvetli bir şekilde sıcaklık etkileri tarafından yönetilir; genişleme eğrisi köpürtülebilecek ara ürün elde edilmesi ve ısıtma parametreleri konularından sıcak pres sıcaklığına bağlıdır. 400-450°C’ de tozlara sıcak pres yapmak ve alaşımın likidüs sıcaklığının üstüne önceden ısıtılmış bir fırın kullanmak en iyi sonuçları vermiştir.

Element tozlardan alaşım toz üretmek en azından AlSi alaşımı için problemsizdir. Alaşımlama işlemleri köpürme sırasında hızlı bir şekilde meydana gelir ve kısa süre içinde homojen bir mikro yapı elde edilir. Bu fiyat-verim konusu için önemli bir durumdur[19].

Sonuç olarak iyi bir köpürtme işlemleri için (örn: yüksek köpürme oranı, uniform hücre dağılımı ve düzgün konveks yapılu hücreler) gerekenler:

Düşük ergime sıcaklığına sahip alüminyum alaşım kullanmak

TiH₂ köpürtücü ajan kullanmak ve ön işlemleri bunu alaşımın içine ilave etmek

Tozları temiz ve tekrarlanabilir şartlarda işleme almak

Toz sıkıştırma sırasında aşırı ısınmadan kaçınmak

Köpürtme işleminde kullanılacak sıcaklık özelliklerini dikkatli ve malzemeye uygun seçmek[22]

4. ISIL İŞLEM

4.1 Isıl İşlemin Geçmişi

Saf alüminyumun sanayide kullanımı düşük dayanımı yüzünden limitlidir. Saf bir metalin dayanımının arttırılması için bu metale katı çözelti yapılması için alaşım katılabilir ve bunun arkasından uygun bir ısıtım işlemi ile aşırı doymuş hale getirilebilir. Bunu sonucu olarak aşırı doymuş çözeltilerin ikincil faz olarak çökmesi sağlanır. Alüminyum alaşımları çökeltme sertleştirmesine verdikleri tepkilere göre ısıtım işlemi görmeye uygundur veya değil diye sınıflandırılır. Isıtım işlemi görebilen alaşımlarda çözeltiyle alma, soğutma ve yaşlandırma sonrası oluşan çökeltilerin homojen dağılımı görülmektedir. Önemli alaşım elementlerinin hepsi yüksek sıcaklıklarda alüminyum içerisinde yüksek çözünürlüğe sahiptirler.[24]

Çökeltme ile sertleştirme mekanizmasının bulunması hafif alaşımlı metaller kullanılan havacılık ve inşaat başta olmak üzere bütün endüstri alanlarında yankı yarattı. Günümüzde kullanılan alüminyum alaşımlarının sertleşmesi için genellikle iki yada daha fazla etken gerekmektedir. Örn: Mg+Si. Alüminyum 6xxx serisinde sadece ağırlık olarak %1 katılan Mg ve Si alaşımının gücünde ciddi artışlara sebep olmaktadır. [25]

Alüminyum alaşımları ısıtım işlemi görebilen 2xxx, 6xxx, 7xxx ve ısıtım işlemi göremeyen 1xxx, 3xxx, 4xxx, 6xxx olmak üzere ikiye ayrılır. Isıtım işlemi göremeyen alaşımların dayanımları gerinim sertleştirmesi ile arttırılır ve katı hal ve dispersiyon sertleştirilmesi ile de bir adım ileri gidilebilir. [26]

4.2 Isıtım İşlem Mekanizması

Bir alüminyum alaşımının yaşlandırmaya uygun olması için ana gereklilik alaşım elementlerinden bir yada daha fazlasının düşen sıcaklıkla beraber ve yüksek sıcaklıklarda çözünürlüğünün denge noktasının üzerinde konsantrasyonlarda çözünürlüğünün düşmesi gerekmektedir [24]

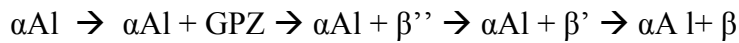
Isıl işlem aşağıdaki üç adımda gerçekleşir;

Nispeten yüksek sıcaklıklara çıkılarak tek fazlı bir bölgenin içine girilir ve alaşım elementlerinin eritilerek çözeltiye alma ısıl işlemi yapılır.

Hızlı soğutma ile oda sıcaklığına inilerek aşırı doymuş bir katı çözelti meydana getirilir. Bu sayede çözelti halindeki elementlerin ikincil faz olarak çökmesi engellenmiş olur.

Aşırı doymuş katı çözeltinin kontrollü bir şekilde bozunması ve düzgün dağılmış bir fazın ortaya çıkarılması

Son adım solvus sıcaklığının altında ve GP bölgesi solvusunun da altında bir noktada yapılmaktadır. Oda sıcaklığında yeterli hızla çökme reaksiyonu olmayan alüminyum alaşımları ısıl işlem yapılarak istenilen güce getirilmektedir. Çökme kinetiklerine bağlı olarak bazı alaşımlar oda sıcaklığında da yaşlandırılabilirler. [24]



Çökelmelerin sırasıyla GP zone oluşmakta malzeme ısıtılmaya devam ettiği takdirde GP bölgeleri kalınlaraşak çubuk şeklinde^{β'} halini almakta ve^{β'}leme devam edildiği takdirde plak şeklinde ki^{β'} ortaya çıkmaktadır. Son olarak ortaya çıkar^{β'} nın bileşimi Mg₂Si' nin stokiyometrik oranı 2:1 dir. Ancak daha önce ortaya çıkan oluşumların oranları değişiklik göstermektedir. [25]

Alaşımın içinde bulunan Si kümeleri daha kaba partiküller haline gelirken içlerine giderek artan oranda Mg almaktadırlar ve bunun sonucunda da β ' nın denge durumu olan Mg₂Si oluşmaktadır. [25]

Hareket eden dislokasyonların GP bölgesi solvus sıcaklığının altında oluşan çökeltiler ile etkileşime gitmesi ile ısıl işlem görmüş alaşımların dayanımlarının artması açıklanmaktadır. [24]

Aşırı doymuş katı çözeltilerin bozunması genellikle aşağıdaki şekilde meydana gelir;

Aşırı doymuş katı çözelti → çözünmüş element öbekleri → ara çökelti → denge çökeltileri[25]

Katı çözeltili sertleştirmesine bir alaşım elementinin katkısını aşağıda ki parametreler belirler;

Çözücü elementin latis yapısı

Çözeltinin konsantrasyonu

Çözeltinin tipi

Çözeltide elde edilen düzenin derecesi

Kısa menzilli veya uzun menzilli düzenlerin ortaya çıkması ile katı çözeltili sertleştirilmesi yüksek çözeltili konsantrasyonlarında daha fazla önem kazanmaktadır. [24]

Katı hal çözeltilisinde atomlar yeniden organize olup çözünen yoğun öbekleşmeler ortaya çıktığında latis aralıkları veya FCC yapılı alüminyum matrisi ile atomik çap farklılıkları gösteren çözünen yoğun bölgeler arasında gerilimler oluşmaktadır. Bu öbekleşmelere Guinier–Preston bölgesi yada GP bölgesi denir. [24]

Temperleme Çeşitleri

Temperleme şekilleri aşağıda verilmiştir;

T : T notasyonu, ısıtma işlemi yapılarak elde edilen temperleri ifade eder. Isıtma işlemlerinin

değişik türleri, aşağıdaki harf ve rakam göstergeleriyle ifade edilmektedir.

T1 : Sıcak işlemden sonra soğutulur ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir.

T2 : Sıcak işlemden sonra soğutulur, soğuk işlemden geçirilir ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir.

T3 : Solüsyona alma ısıtma işlemi uygulanır, soğuk işlemden geçirilir, ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir

T4: Solüsyona alma ısıtma işleminden geçirilir, doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir.

T5: Sıcak işlemden sonra soğutulur ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir (Termik ısıtma işlemi)

T6: Solüsyona alma ısıtma işleminden geçirilir ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir (Termik ısıtma işlemi)

T7: Solüsyona alma ısıtma işleminden geçirilir ve yapay aşırı yaşlanma yapılır.(Termik ısıtma işlemi)

T8: Solüsyona alma ısıtma işleminden geçirilir, soğuk işlemden geçirilir, ve yapay yaşlanma yapılır (Termik ısıtma işlemi)

T9: Solüsyona alma ısıtma işleminden geçirilir, yapay yaşlanma yapılır (termik ısıtma işlemi) ve soğuk işlemden geçirilir.

T10: Sıcak işlemden soğutulur, soğuk işlemden geçirilir ve yapay olarak yaşlandırılır (Termik ısıtma işlemi).[26]

4.3 Alüminyum Köpüklere Isıl İşlem Uygulanması

Kompakt ergitme tekniği ile üretilen köpüklerin içinde katılaşma ve soğuma sırasında hücre duvarlarında çatlaklar meydana gelebilmektedir ve bu köpüklere ısıtma işlem uygulanması bu çatlakların büyümesi ve yeni çatlaklar oluşturmaları ihtimali göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

Isıtma işlem sırasında su ile soğutma yapılması hücre duvarlarına negatif etki yaptığı için daha sonraki adımlarda su kullanılmadan soğutma yapılması da denenebilir.[21]

Alüminyum köpük üretiminde köpürtmenin arkasından yapılan soğutmayla aşırı doyum elde edildiği bilinmektedir. Ancak bu soğutma tam bir aşırı doyum oluşturmamakta ve ısıtma işlem sonrası yapılan hızlı soğutma ile daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.

Alüminyum köpüklerin ısıtma işlem sonunda soğutulmasında su kullanılması istenilen aşırı doyuma ulaşılması için en uygun yöntem olarak gözlenmiştir.

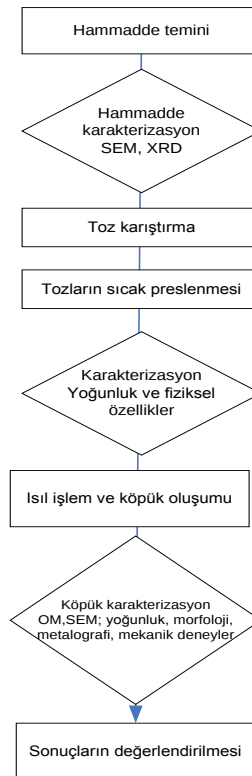
Alüminyum köpükler üretildikten sonra aynı bileşime sahip olan alüminyum alaşımlarından daha yüksek sertlik değerlerine sahiplerdir. [21,28]

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Deneyler ve Testler

Deneyler iki adım olarak yapılmıştır. Birinci adımda değişik basınçlarda kompaktlama yapılmış ve presleme performansı gözlenmiştir. Daha sonra üretilmiş ara ürünler serbest ve kalıp içerisinde köpürtülmüş ve kalıp içi köpürtmenin en iyi şekilde gerçekleşmesi için gerekli olan fırın sıcaklığı, soğutma hızı, kalıp geometrisinin bulunması üzerinde çalışılmıştır.

Deneyler yanıt yüzey analizi kullanılarak tasarlanmıştır. Alüminyum köpüklerin özelliklerini etkileyen üç parametre ve her parametre için üç seviye seçilmiştir. Seçilen parametreler; köpükleştirici ajan yüzdesi (%TiH₂), magnezyum ve silisyum yüzdelерidir. Tasarlanan 16 deney en az iki tekrarlı olarak yapılmış ve sonunda numunelerin sertlik, köpükleşme performansları, makro ve mikro yapıları incelenmiştir.



Şekil 5.1. Çalışmanın süreç akış şeması.

Deneylerde kullanılan alüminyum (Al) tozu, alaşım elementleri olarak kullanılan magnezyum (Mg) ve silisyum (Si) tozları ve, köpürme ajanı olarak TiH_2 kullanılmıştır.

Tozlar turbula toz karıştırıcı kullanılarak hazırlanmış ve yaklaşık 27.3g olarak Precisa marka XB 220A model hassas terazide tartılmıştır ve turbula tipi karıştırıcıda 30dak. süreyle karıştırılmıştır. Tozlar, 33 mm çaplı dairesel kesitli ısıtıcılı kalıbın monte edildiği 110 tonluk hidrolik çift etkili preste kompaktlanmıştır. (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Alüminyum köpük üretiminde kullanılan ısıtıcılı kalıp.

Preslenen tozların kompakt yoğunlukları Precisa marka XB 220A model hassas terazide gerekli aparatlar kullanılarak Arşimet prensibine göre ölçülmüş ve kompaktların teorik yoğunluğa ne kadar yaklaştığı bulunmuştur.

Hazırlanan toz kompaktlarının köpürtme deneyleri Nabertherm marka iki kademeli fırın kullanılarak yapılmıştır. Kompaktlar Şekil 5.3a’da görülen çelik esaslı üstü kapanabilen kalıba, kalıp fırında önceden ısıtıldıktan sonra 12 dakika boyunca tutulmuş ve su soğutmalı bakır plakada katılaştırılmıştır (Şekil 5.3).



a



b

Şekil 5.3 a.Çelik esaslı köpükleşme prosesinde kullanılan kalıp. **b.**Çelik esaslı kalıbın soğutulmasında kullanılan su soğutmalı bakır plaka.

Numunelerin sertlikleri boyuna kesilmiş ve parlatıp, dağlanmış yüzeylerden Leica marka mikro sertlik ölçüm cihazı ile 200 gf yük 12 s süre ile yapılmıştır. Ölçümler köpüklenmenin olduğu bölgelerde hücre duvarlarından ve köpükleşmenin gözlenmediği bölgelerden alınarak yapılmıştır.

Üretilen köpüklerden test cihazının emniyet sınırları içindeki basınçlara dayanabilen köpük numunelerinden bazılarının basma testleri Instron1195 marka test cihazında 5mm/dk çene hızı ile gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin optik mikroskop görüntülerini almak üzere her deneyden 1 adet alüminyum köpük numunesi ATM Brilliant 221 hassas kesme cihazı ile 2000 dev/dk disk hızı ve 2mm/dk ilerleme hızı ile boydan ikiye ayrılmış ve sırasıyla 240, 320, 600, 800,1200, 2500 numaralı SiC zımparalarda zımparalanıp parlatmaya hazırlanmıştır. Ardından numuneler sırasıyla 3(HACONOR -W),1 μm (HACONOR-W) ve 0,25 μm 'luk (HACOTEX-W) çuhalarda ve bu çuhalara uygun 3 μm , 1 μm ve 0,25 μm 'luk MetPrep marka elmas ~~parlat~~ ve uygun yağlayıcı sıvılarıyla Struers marka parlatma cihazında 300 dev/dk dönme hızı ile parlatılmıştır. Daha sonra optik mikroskopta polarize mikro yapı görüntüsü almak üzere numuneler ATM Kristall 620 marka elektro dağlama cihazında Barker çözeltisi ile 30V'luk gerilimde ve her bir numune için 2 dk süreyle dağlamıştır. Son olarak numunelerden Leica marka optik mikroskopta polarize mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir.

Bu yapılan işlemlerin yanı sıra üretilen alüminyum köpüklerin mikro yapı ve diğer incelemelerde kullanılmayan kısımları Nabertherm marka iki kademeli fırın kullanılmış, daha önceden 540 C' ye çıkarılmış fırının içinde 40 dakika boyunca ısıtılıp daha sonra oda sıcaklığında ki su ile hızlıca soğutularak ısıl işlem yapılmış ve katı hal çözeltisine alınmıştır. Alüminyum köpük ısıl işlemi sırasında soğutma adımına geçildiği zaman prematüre çökeltilerin oluşumunu etkilemek için soğutma adımının 400 C – 290 C aralığında mümkün olan en hızlı şekilde yapılması gerekmektedir.[21] bu sebeple oda sıcaklığında su kullanılmıştır.

Alüminyum köpük numuneleri 1 hafta boyunca oda sıcaklığında yaşlandırılmıştır.

Isıl işlem ve yaşlandırmanın alüminyum köpük üzerinde ki etkilerinin incelenmesi için numuneler 240, 320, 600, 800,1200, 2500 numaralı SiC zımparalarda zımparalanıp parlatmaya hazırlanmıştır. Ardından numuneler sırasıyla λ 3 (HACONOR-W), 1 μ m (HACONOR-W) ve 0,25 μ m'luk (HACOTEX-W) çuhalarda ve bu çuhalara uygun 3 μ m, 1 μ m ve 0,25 μ m'luk MetPrep marka elmas parlatıcılar ve uygun yağlayıcı sıvılarıyla Struers marka parlatma cihazında 300 dev/dk dönme hızı ile parlatılmıştır. Son olarak numunelerden Leica marka optik mikroskopta polarize mikro yapı görüntüleri elde edilmiştir.

Isıl işlemin sertlik üzerindeki etkisinin incelenmesi için numunelerin sertlikleri parlatıp, dağlanmış yüzeylerden Leica marka mikro sertlik ölçüm cihazı ile 200 gf yük 12 s süre ile yapılmıştır. Ölçümler köpüklenmenin olduğu bölgelerde hücre duvarlarından ve köpükleşmenin gözlenmediği bölgelerden alınarak yapılmıştır.

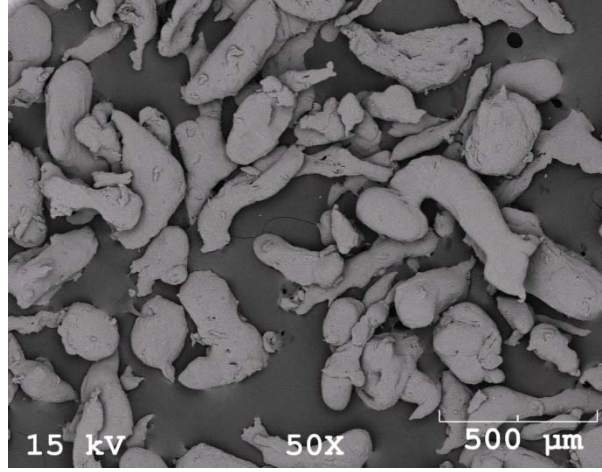
Ayrıca numunelerin içinde oluşan faz değişikliklerini görebilmek amacıyla numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır.

Kullanılan toz ve köpük kesitine ait SEM görüntüleri ve köpük numunelerin JEOL JSM 7000F marka taramalı elektron mikroskobu ile geri saçılan elektronların görüntüsünden (Backscattered Image) elde edilmiştir.

5.2 Sonuçlar ve Tartışma

5.2.1 Hammaddelerin karakterizasyonu

Alüminyum köpük üretiminde kullanılan Al, Mg, Si ve TiH₂ tozları taramalı elektron mikroskopunda incelenmiş ve enerji dağılım spektroskopisi kullanılarak kimyasal analizleri yapılmıştır. Şekil 5.4 a ve 5.4 b de alüminyum tozuna ait TEM görüntüsü ve kimyasal analiz sonucu verilmiştir.



a

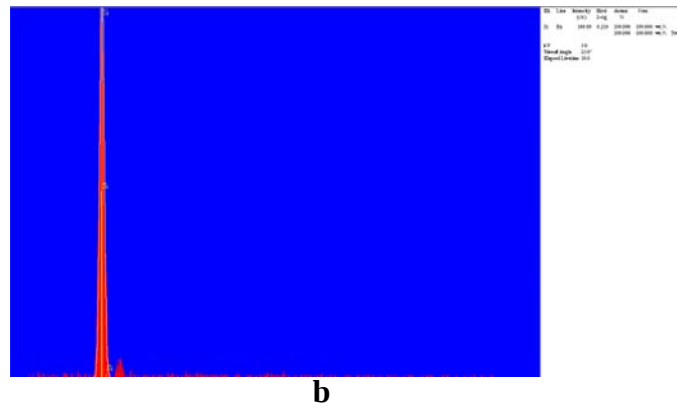
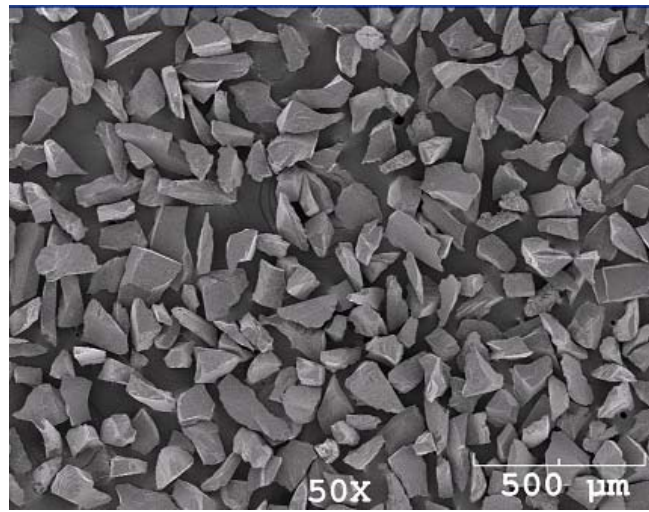


b

Şekil 5.4 a. Alüminyum tozun TEM görüntüsü. **b.** Alüminyum tozun kimyasal analizi.

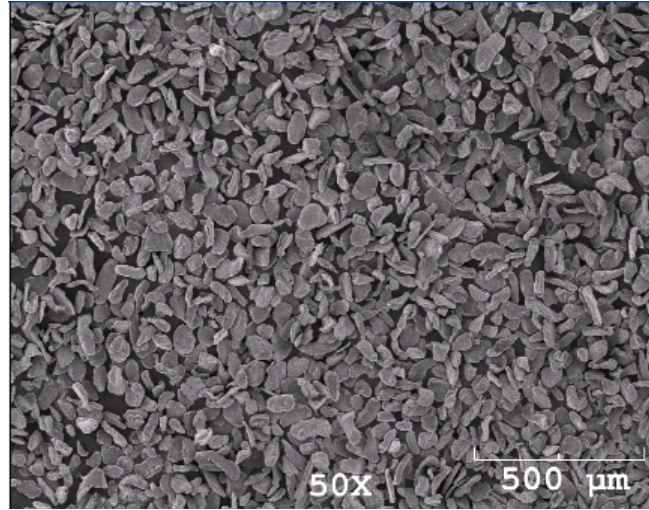
Şekil 5.4'te görüldüğü üzere alüminyum tozun partikül boyutu 300-450µm arasında değişmekte ve alüminyumdan farklı bir elementte içerisinde bulunmamaktadır.

Şekil 5.5 da ise Si tozunun görüntüsü ve kimyasal analizi verilmiştir. Toz boyutları 150-300 µm arasında ve kimyasal olarak saf olduğu tespit edilmiştir.



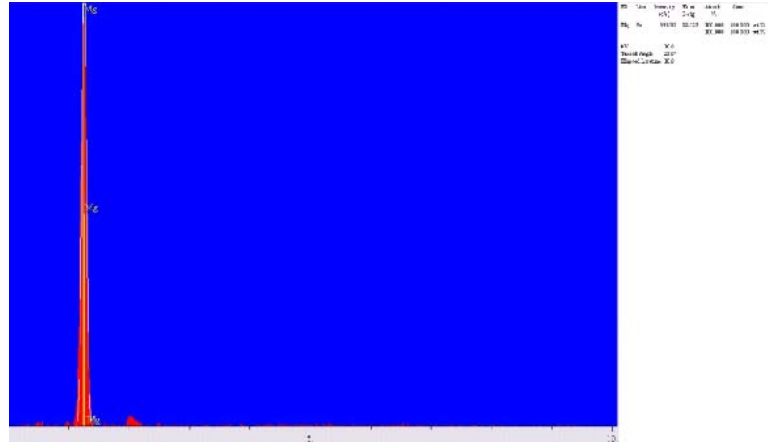
Şekil 5.5. a. Silisyum tozun TEM görüntüsü. **b.** Silisyum tozun kimyasal analizi.

Şekil 5.6 de ise Mg tozunun görüntüsü ve kimyasal analizi verilmiştir. Toz boyutları 150-300 μm arasında ve kimyasal olarak saf olduğu tespit edilmiştir.



a

Şekil 5.6. a. Magnezyum tozunun TEM görüntüsü. **b.** Magnezyum tozun kimyasal analizi.

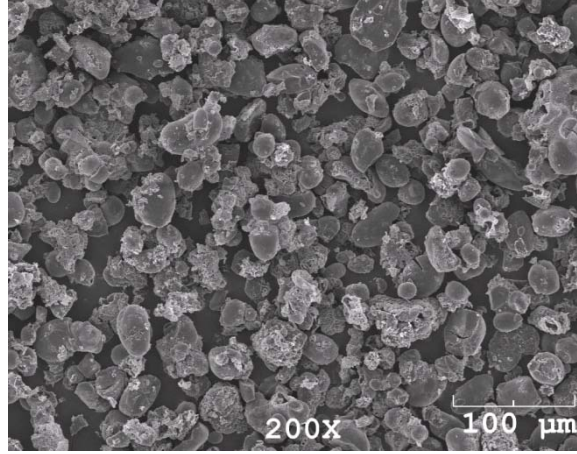


b

Şekil 5.6 b. Magnezyum tozunun TEM görüntüsü. **b.** Magnezyum tozun kimyasal analizi.

Magnezyum tozunun 100-250μm aralığında ve saf olduğu tespit edilmiştir.

TiH₂ tozuna ait TEM görüntüsü de Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7. TiH₂ tozunun TEM görüntüsü.

Şekil 5.7’de görüntülenmiş olan TiH₂ tozunun tane boyutu 45-65μm arasında değişmektedir.

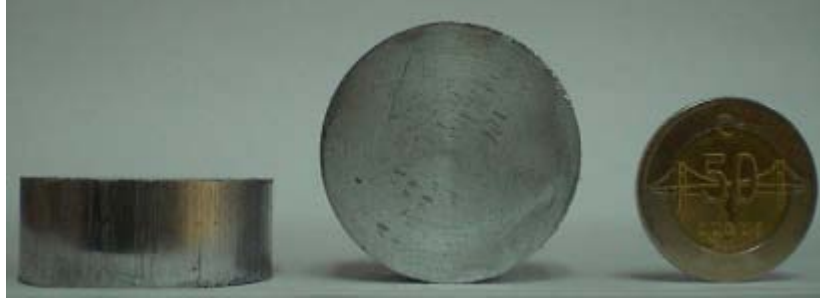
5.2.2 Tozların kompaktlanması ve köpürtülmesi

İlk aşamada alaşım elementleri kullanılmaksızın alüminyum tozu %0,4 TiH₂ ile karıştırılarak 27,3g olarak kademeli olarak artan basınç değerlerinde kompaktlanmışlardır. Sıkıştırma esnasında basınç ile beraber kalıp ısıtıcısı devreye sokularak sıcaklık 450°C ye çıkarılmış ve bu sıcaklıkta 30 dk bekletildikten sonra kompaktlar kalıptan çıkarılmışlardır. Çizelge 4.1’de bu basınç değerleri ve bulunan ölçülen (Archimedes, Aşimed metodu) /hesaplanan yoğunluk arasındaki oran verilmiştir.

Çizelge 5.1 İlk aşamada yapılan deneylere ait basınç ve kompakt yoğunluk değerleri

Numune no	1. kademe basınç (MPa)	2. kademe basınç (MPa)	Hesaplanan Yoğunluk (g/cm ³)	Arşimed yoğunluk (g/cm ³)	Oran
1	5	7,5	2,67	2,675	0,998
2	7	10,5	2,667	2,683	0,994
3	10,5		2,64	2,68	0,988

Çizelge 5.1’de görüldüğü üzere beklenen kompakt yoğunlukları iki tip sıkıştırma yönteminde de elde edilmiştir. Şekil 5.8’da kompaktlanan numunelere ait bir resim verilmiştir. Kompaktların çapı $\phi 33\text{mm}$ ve yüksekliği 12mm dir.



Şekil 5.8. Üretilen araürünlerin yandan ve üstten görüntüsü.

İlk aşamada üretilen bu kompaktlarda köpürtme parametrelerinin belirlenmesine yönelik ilk köpürtme deneyleri yapılmıştır. İlk denemelerde kalıp kullanılmaksızın kompaktların serbest köpüklenmesi sağlanılmıştır. Şekil 5.9’da serbest olarak köpüklenmenin olduğu gözlemlendikten sonra kalıp içerisinde köpüklenme deneyleri yapılmıştır. Kompaktlar %0,4 TiH₂ içeren kompaktlardan oluşup 800°C’ye ısıtılan fırında kalıbın şeklini alacak ve minimum drenajın ve en başarılı köpüklenme performansının sağlanacağı süre ve soğutma ortamı aranarak köpürtülmüştür.



Şekil 5.9. Serbest köpüklenmiş numune görüntüsü.

Köpürtmeler sırasında aşağıdaki hatalar gözlemlenmiştir. Çizelge 5.2’de verilen hatalar incelendiğinde köpürme sırasında köpüren malzemenin istenilen şeklini soğutma aşamasının önemli olduğu görülmüştür. Özellikle köpürme süresinin çok dikkatle belirlenmesi gerektiği ve köpürme sonrasında kalıbın sarsılmadan fırından alınarak homojen soğutulmasının gerekliliği gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.2 İlk aşama deneylerde elde edilen kompaktların köpürtülmesi sırasında ortaya çıkan hatalar ve nedenleri

Numune	Hata adı	Olası hata sebebi
	Taşma	Köpükleşen numunenin kalıptan taşması.
	Erken Katılaşma	Numunenin fırında gerekenden daha az bekletilmesi ve köpüğün kalıbı dolduramaması.
	Erken Çökme	Numunenin fırından alınırken veya soğutulurken titreşim ve sarsıntıya maruz kalması ve köpüğün daha erken çökmeye başlaması, dolayısıyla köpük yapısının homojenliğinin bozulması.
	Çökme	Katılaşmanın zamanında gerçekleşmemesi ve köpüğün çökme aşamasına geçmesi.
	Şekil Bozukluğu	Homojen olmayan köpükleşme.

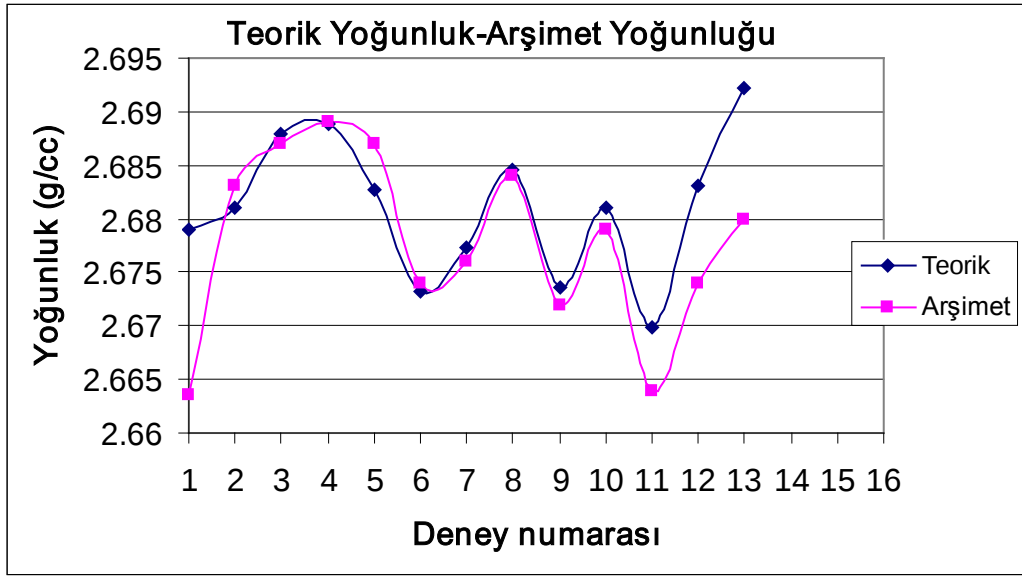
5.2.3 Alüminyum Köpük Üretimi

Deneysel tasarım ile planlanmış 16 adet numune önce tablet olarak daha sonra köpük haline getirildikten sonrada köpük olarak incelenmişlerdir.

Çizelge 5.3 Üretilen tabletlerin yoğunlukları

deney no.	teorik yoğ.	arşimet ort	%kompaktlama
1	2,678901	2,663500	99,42512
2	2,680995	2,683000	100,0748
3	2,687908	2,687000	99,96623
4	2,688808	2,689000	100,0072
5	2,682644	2,687000	100,1624
6	2,673227	2,674000	100,0289
7	2,6774	2,676000	99,9477
8	2,684599	2,684000	99,97771
9	2,673672	2,672000	99,93747
10	2,680995	2,679000	99,9256
11	2,669954	2,664000	99,77701
12	2,683092	2,674000	99,66114
13	2,692127	2,680000	99,54953

Çizelge 5.4 Yoğunluk Değerleri



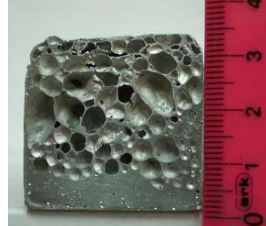
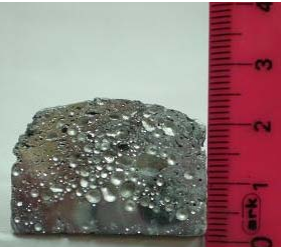
Deneyssel planlama ile üretilen numunelerden önce yapılan serbest denemelerde görülmüştür ki elde edilen tabletlerin yoğunlukları köpürme performanslarını etkilemektedir. Tabletlerin yoğunlukları teorik yoğunluğa yaklaştıkça köpürme performansının arttığı gözlenmiştir. Özellikle iyi sıkıştırılmayan tabletler fırına koyulduktan sonra köpürmeye başlamadıkları, ancak tabletin kenarında çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir.

Bunun sebebi olarak TiH_2 'den ayrılan Hidrojen gazının henüz tam olarak akışkanlık kazanmamış olan alüminyumun içinde gaz kabarcıkları oluşturmak yerine yeteri kadar sıkı olmayan yapıda ısınmayla ortaya çıkan çatlaklardan kaçmasıdır.

Tozların sıkıştırılması ile elde edilen tabletlerin yoğunluk değerleri teorik ve Arşimet olarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlardan preslenme yapılan tabletlerin yoğunluklarının yeterli düzeyde olduğu görülmüştür. Teorik yoğunluğu $2,7\text{gr/cm}^3$ olan alüminyum' un teorik yoğunluğunun en az %98,5'ine ulaşılmıştır.



Şekil 5.10 Üretilen alüminyum köpüklerin genel görüntüsü

 D1(0,6TiH₂, 1Mg, 1,5Si)	 D2(0,6TiH₂, 1Mg, 1,5Si)	 D3 (0,8TiH₂, 0,5Mg, 1,5Si)	 D4 (0,4TiH₂, 0,5Mg, 0,5Si)
 D5 (0,8TiH₂, 1Mg, 1,5Si)	 D6 (0,8TiH₂, 1,5Mg, 1,5Si)	 D7 (0,8TiH₂, 1,5Mg, 0,5Si)	 D8 (0,4TiH₂, 0,5Mg, 1,5Si)
 D9 (0,6TiH₂, 1,5Mg, 1Si)	 D10 (0,6TiH₂, 1Mg, 1Si)	 D11 (0,4TiH₂, 1,5Mg, 1,5Si)	 D12 (0,6TiH₂, 1Mg, 0,5Si)
 D13 (0,8TiH₂, 0,5Mg, 0,5Si)	 D14 (0,6TiH₂, 0,5Mg, 1Si)	 D15 (0,4TiH₂, 1,5Mg, 0,5Si)	 D16 (0,4TiH₂, 1,5Mg, 0,5Si)

Şekil 5.11 Üretilen alüminyum köpüklerin kesit görüntüsü

5.2.4 Alüminyum köpük numunelerinin incelenmesi

Burada elde edilen alüminyum köpükleri n durumunu değerlendirmek gerekirse;

10,11,16 no'lu alüminyum köpüklerin hepsinin tepesinde dengesiz bir çökme, katlanma mevcut. Gözenek büyüklükleri dengesiz. Ortalamanın çok üstünde büyüklükte gözenekler mevcut. Hücreler arası çökme cidar bozuklukları mevcut. Ayrıca 10 ve 11 no'lu numunelerde yanlardan katlanma ve çökme mevcut.

1 no'lu numune üstten dengesiz çökmeye sahip olmasına karşın gözenek morfolojisi oldukça homojen bir dağılım göstermektedir.

15 no'lu numunenin gözenek boyutları bir birine yakın ve dağılımları oldukça homojendir. Çeper kalınlıkları ince üst kısımlarında çökme ve alt kısımlarında birikme mevcuttur.

5 no'lu numunenin alt kısımlarında birikme mevcuttur. Ortalamanın çok üzerinde boyutta gözenekler mevcuttur. Üst ve yan kısımlardan çökme mevcuttur.

3,6,7 no'lu numunelerin hepsinde dış kısımdan fark edilir şekilde boyun bulunmaktadır. Bütün numunelerde altta birikme, yüksek gözenek büyüklükleri, ince çeper kalınlığı görülmektedir. Ayrıca altta ki birikme kısmında çekirdeklenmeler gözlenmiştir.

2,8,9 no'lu numuneler bütün numuneler arasında en iyi köpürme performansını gösteren numunelerdir. Hem hacimsel hem de gözenek morfolojisi olarak oldukça iyi sonuçlar vermişlerdir.

Özellikle %0,6 TiH₂ kullanılan 2 ve 9 no'lu numuneler altta birikme yapmamışlardır. %0,4 TiH₂ kullanılan 8 no'lu numunede altta birikme gözlenmektedir ancak bu numunede de daha önce bahsedildiği gibi alttaki birikme tabakasında çekirdeklenmeler bulunmaktadır. Bütün numunelerin çeper kalınlıkları oldukça iyidir. 9 no'lu numunede gözenek şekillerinde bir bozukluk göze çarpmaktadır bunun köpürtme sürecinde oluşan bir sorundan mı kaynaklandığı ya da numunenin üretim formülü ile mi alakalı olduğunu anlamak için daha fazla deney yapılmalıdır.

12 no'lu numunenin gözenek şekilleri deforme olmakla beraber gözenek dağılımı oldukça homojendir ve boyutları küçüktür.

13 no'lu numunede boyunda çatlama, gözenek dağılımının heterojen olması ve alt kısmında birikme gözükmemektedir.

14 no'lu numunede küçük boyutlu deforme gözenekler görülmektedir.

4 no'lu numunede 1 adet büyük gözenek dışında gözenek morfolojisi düzgün. Alt kısmında birikme mevcut.

TiH₂ % si farklı numunelerde altta birikme oluşması bu olayın TiH₂ miktarına bağlı olmadığına işaret etmektedir. Ayrıca alt kısmında bulunan birikmelerin içinde gözlenen gözenek çekirdeklenmeleri burada ki birikimin soğuma sırasında aşağıya doğru oluşan bir akmadan dolayı değil köpürme işleminin tam olarak gerçekleşmemesinden kaynaklandığına işaret etmektedir.

Yüksek yüzdeli TiH₂ içeriğine sahip numunelerin genel olarak gözenek morfolojilerinin bozuk olduğu içlerinde ortalamalarına göre çok büyük gözenekler bulundurdıkları gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak TiH₂ miktarının fazla gelmiş olmasından veya TiH₂ tozunun iyi karıştırılamamadan dolayı bir yerde toplanmasından kaynaklanan büyük gaz öbekleri oluşmuş olabilir.

Yüksekliği kalıp yüksekliğine ulaşan hemen her numunenin üst kısmında çökme olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple özellikle yüksek TiH₂ bulunduran numuneler için bu kalıpla beraber köpürtülmeleri doğru olmayacaktır. Ancak diğer numunelerinde üst kısımlarında çökmeler gözlenmiştir bu sebeple köpürtme esnasında belirlenmiş olan sürenin gözden geçirilmesi düşünülebilir.

Üretilen alüminyum köpüklerde yukarıda belirtilen çökme, altta birikme, aşırı büyük gözeneklerin görülmeleri ve bu konuda bir çalışma yapılmamış olmasının sebebi burada yapılan çalışmanın amacı alüminyum köpüğün içine koyulan alaşım elementlerinin etkilerini incelemektir. Bu sebeple alüminyum köpük üretiminde kullanılan kalıp, süre, sıcaklık, soğutma şartları literatür incelenerek belirlenmiş ve sabit tutulmuşlardır.

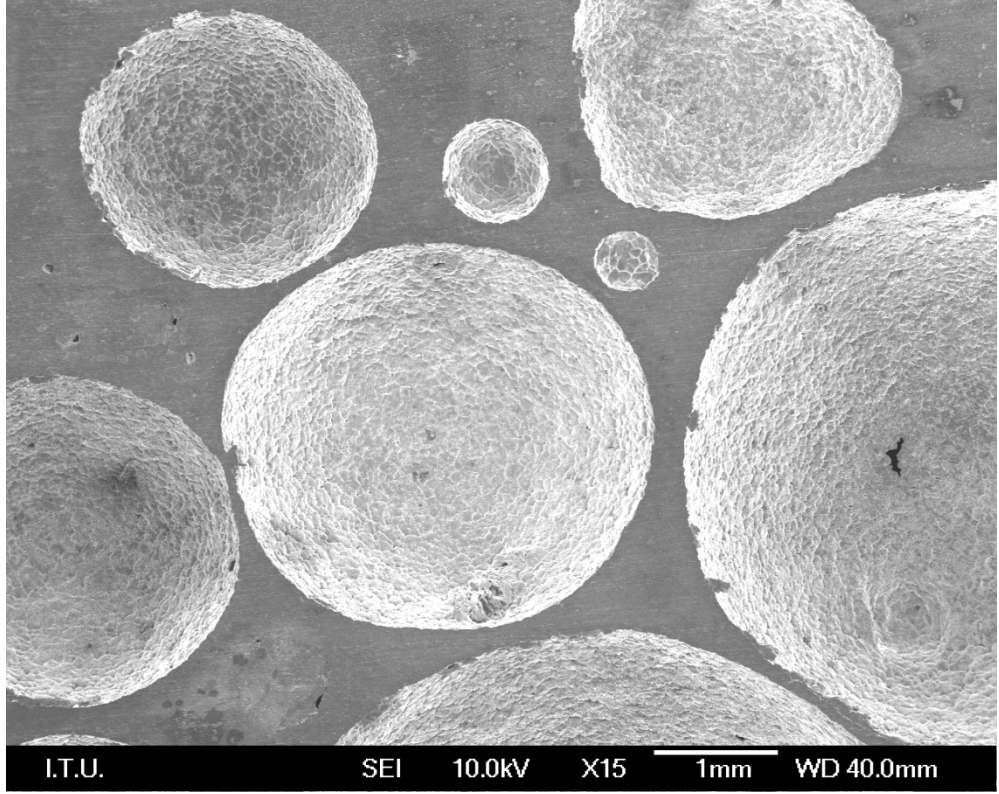
Çizelge 5.5 Optik Spektrometrede ölçülen alaşım değerleri

Nunume	Mgd	Mg	Fark Mg	Si d	Si	Fark si	Ti	Fe
8	0,5	0,89	0,39	1,5	4,92	3,42	0,50	0,35
15-1	1	1,06	0,06	1	2,23	1,23	0,19	0,34
16	1,5	1,07	-0,43	0,5	0,88	0,38	0,31	0,33
9	1,5	1,63	0,13	1	4,09	3,09	~0,54127	0,34
6-2	1,5	0,62	-0,88	1,5	2,22	0,72	0,23	0,30
13	0,5	0,39	-0,11	0,5	1,08	0,58	>0,63600	0,36
14-1	0,5	0,71	0,21	1	3,95	2,95	~0,58982	0,33
7-3	1,5	1,23	-0,27	0,5	0,88	0,38	0,27	0,31
4-3	0,5	0,88	0,38	0,5	1,16	0,66	0,24	0,36
5-3	1	0,58	-0,42	1	3,47	2,47	0,35	0,52
11-2	1,5	1,34	-0,16	1,5	2,59	1,09	0,21	0,41
12-1	1	0,73	-0,27	0,5	2,39	1,89	0,49	0,24
3-3	0,5	0,44	-0,06	1,5	4,00	2,50	0,44	0,28
1-3	1	0,68	-0,32	1,5	2,93	1,43	0,21	0,29
10-3	1,5	0,54	-0,96	1	2,17	1,17	0,22	0,27
2	1	0,91	-0,09	1	2,13	1,13	0,39	0,40

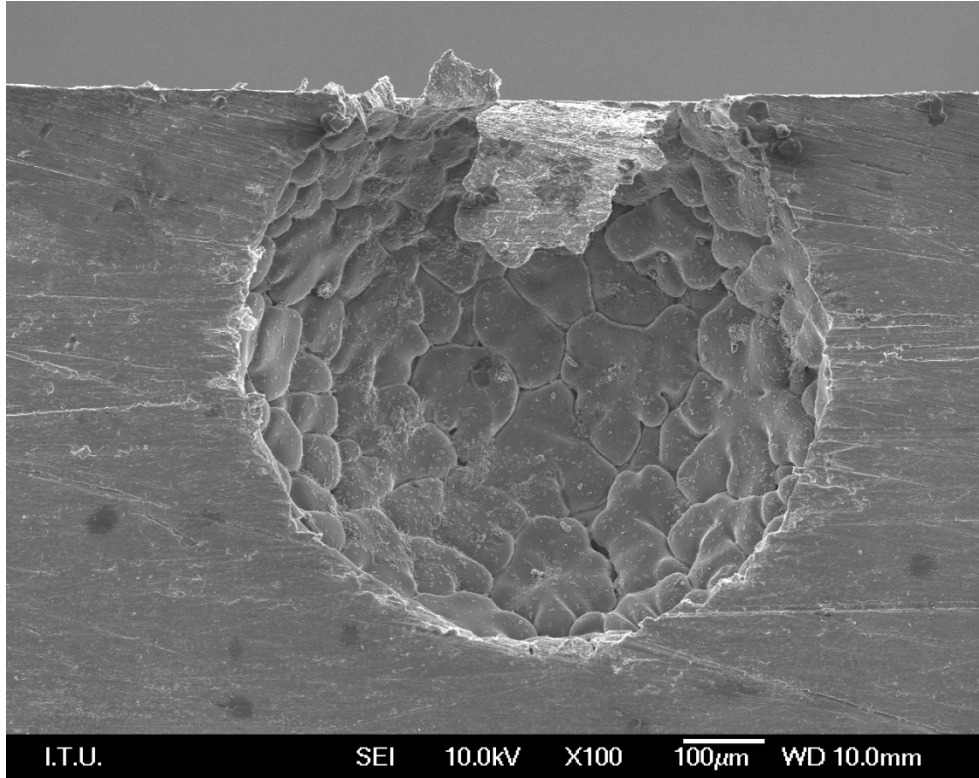
Tabletler köpürtüldükten sonra optik spektrometrede alaşım değerleri köpüğün değişik noktalarından ölçüldü ve elde edilen ortalama değerlerle bir tablo hazırlandı. Tabloda görülen değerler değerlendirilmeye alınırken alüminyum köpüklerin yapısı sebebiyle optik spektrometre de alınan ölçümlerin çoğunluğunun taban ve altta oluşan tabakanın kesitinden olduğu göz önüne alınmalıdır.

Bu şartlar göz önünde bulundurulunca ortaya çıkan tabloya göre Mg' un kağıt üzerindeki değeri ile ölçümler arasında oluşan ortalama fark -0,18'dir. Si' un aynı değeri ise 1,57'dir. Buradan görülmektedir ki karışımın içine koyulan Si köpürme işlemi sırasında akışkan alüminyumun içinde hareket ederek alt kısımda birikme yapmaktadır. Bu olay alüminyum döküm işleminde de oldukça sık görülen bir toplanma olayıdır. Bu tip toplanma olayları birden fazla sebepten dolayı meydana gelebilirler, bunlardan bir tanesi atomik ağırlık farkıdır, bir diğeri ise alüminyum köpüğün yapısı nedeniyle soğuma heterojen bir şekilde gerçekleşmektedir ki soğuma sırasında kalıbın bakır bir tepsi üzerine de su yardımıyla soğutulduğu göz önüne alındığında soğumanın dengesiz olduğu anlaşılır. Dengesiz soğumanın sonucunda köpüğün belirli yerleri katılaşmış belirli yerleri hala ergimiş durumda bulunabilir. Silisyumun katı ve sıvı alüminyum içinde çözünme farklılıkları bulunduğundan(silisyumun 377 C ta alüminyum içinde çözünürlüğü sadece ağırlıkça %0,25'tir.) denge konumuna gelmek için soğuma sırasında hareket ederek toplanma yapmış olabilir[29-30]. Mg ise bu şekilde bir hareketlenme içinde olmayıp hücre çeperlerinin içinde kalmıştır.

Üretilen alüminyum köpükler mikro yapıları ve olası oluşmuş bileşiklerin gözlemlenmesi için SEM ve Optik mikroskopta resimleri çekildi.

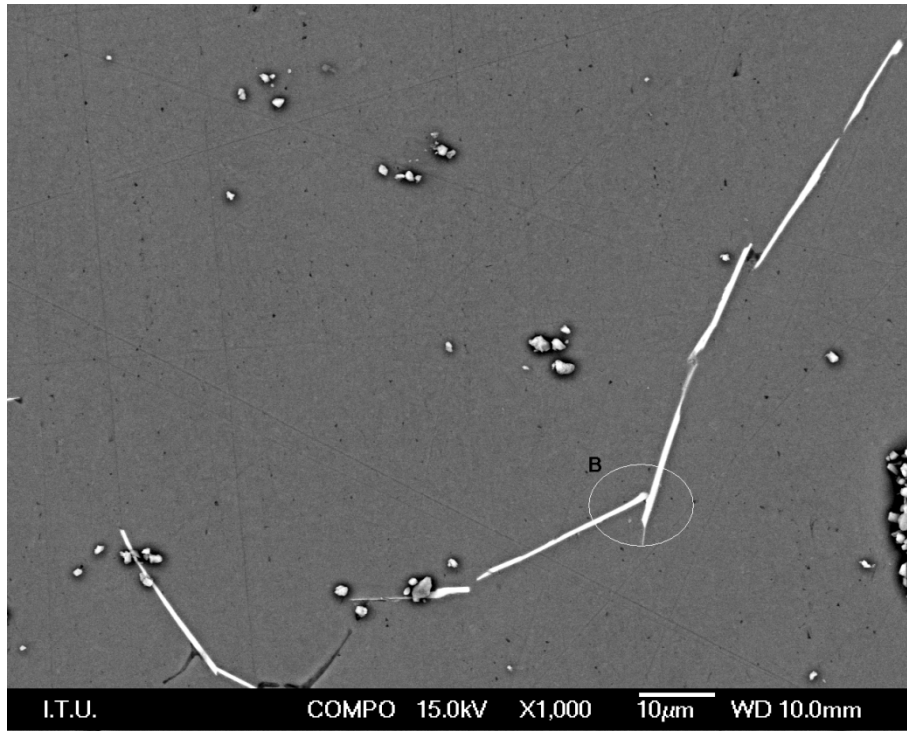


Şekil 5.12 8 no'lu numunenin 15 büyütmede SEM ile çekilmiş fotoğrafı

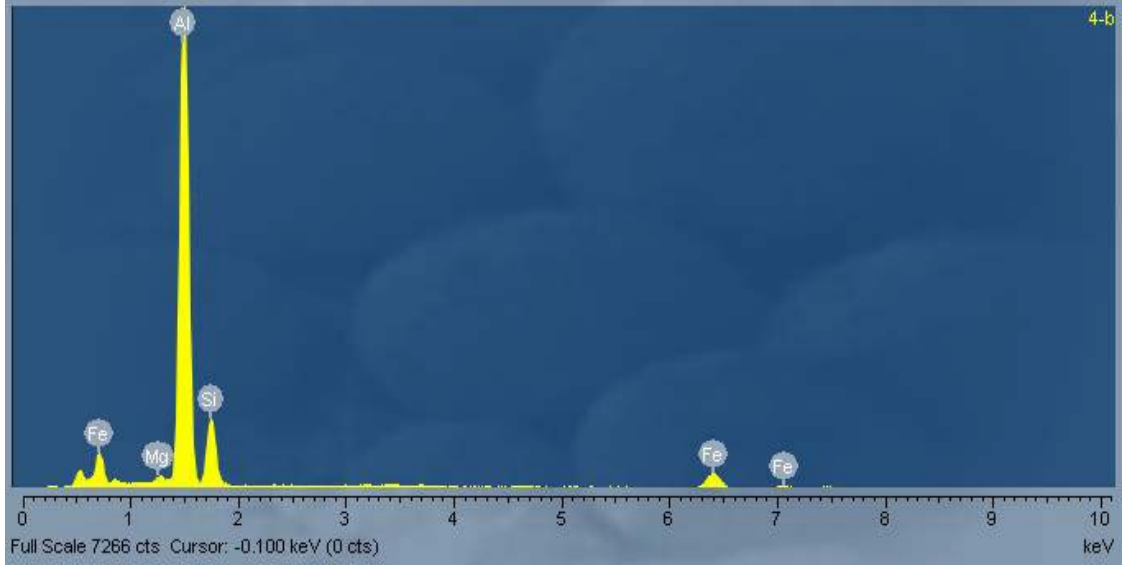


Şekil 5.13 3 no'lu numunenin 100 büyütmede SEM ile çekilmiş fotoğrafı

Yukarıdaki resimlerde gözenek duvarlarında görülen iç içe geçmiş yapılar başlangıçta beklendiği gibi birbirlerinden ayrık küçük toz partiküllerinin teması olarak değil küçük partiküllerin birleşmesi ile ortaya çıkan değişik şekilli daha büyük parçaların oluşturduğu bir yapıdır. Bu yapı izostatik sıcak presleme ile elde edilen içyapıyla aynıdır[31]. Ancak alüminyum köpük üretiminde köpürtme sırasında alüminyumun ergime sıcaklığının üzerine çıkılmakta ve uygulanan işlem ergitip katılaştırmaya daha yakındır. Bu durumun sonucu olarak gözenek içinde ki görüntünün de alüminyum köpüğün genel yapısına benzer olması beklenirken köpük oluşumu sırasında gözenegin içinde hapsolan gazın ısı iletkenlik konusunda yapıya etki ettiği ve bu sebeple ısınma-soğuma hızlarının etkilendiği dolayısıyla bu şekilde bir yapı ortaya çıktığı düşünölmektedir.

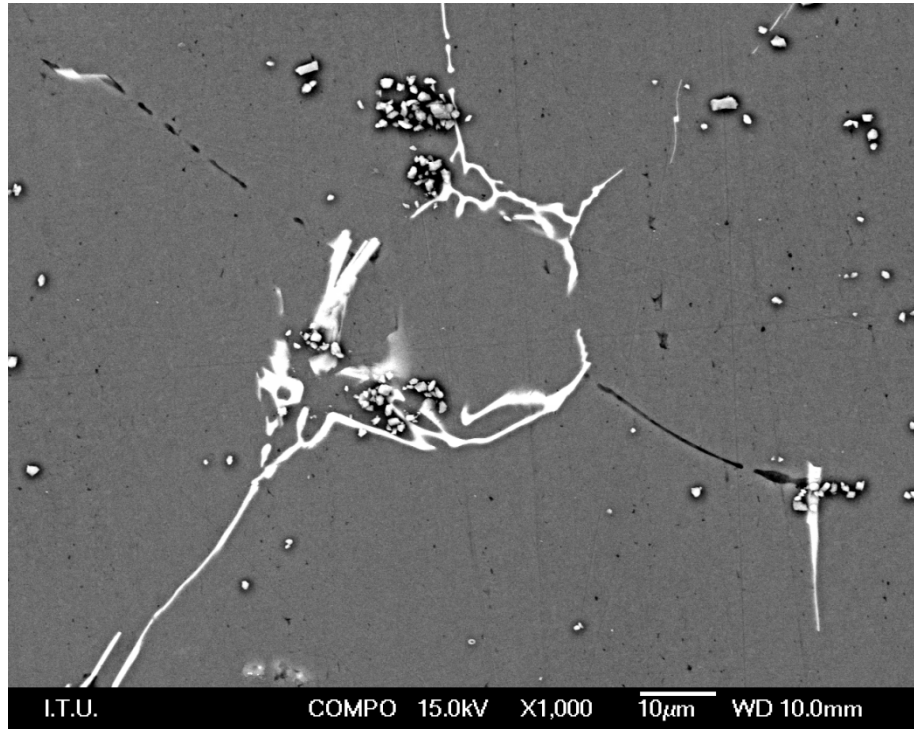


Şekil 5.14 4 no'lu numunenin 1000 büyötmeye SEM ile çekilmiş kompozisyon fotoğrafı

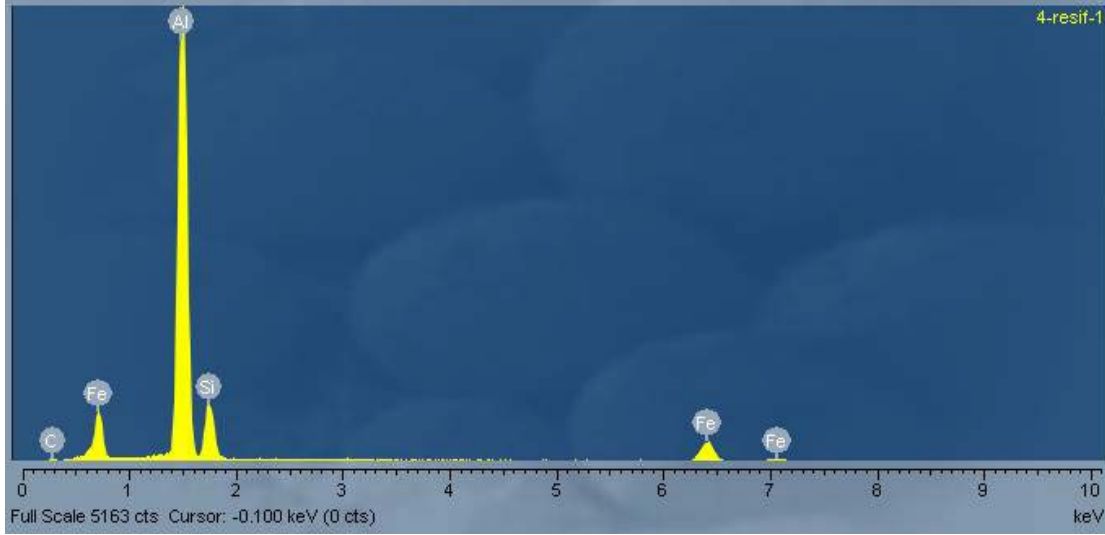


Şekil 5.15 4 B EDS analiz grafiği

EDS analizlerinden de anlaşıldığı gibi 4 no'lu numuneden alınan bu resimde görülen beyaz iğne şekilli oluşum Al-Fe-Si intermetalik bağıdır. Bu bağın oluşması uygulanan işlemler sonrasında beklenmektedir.

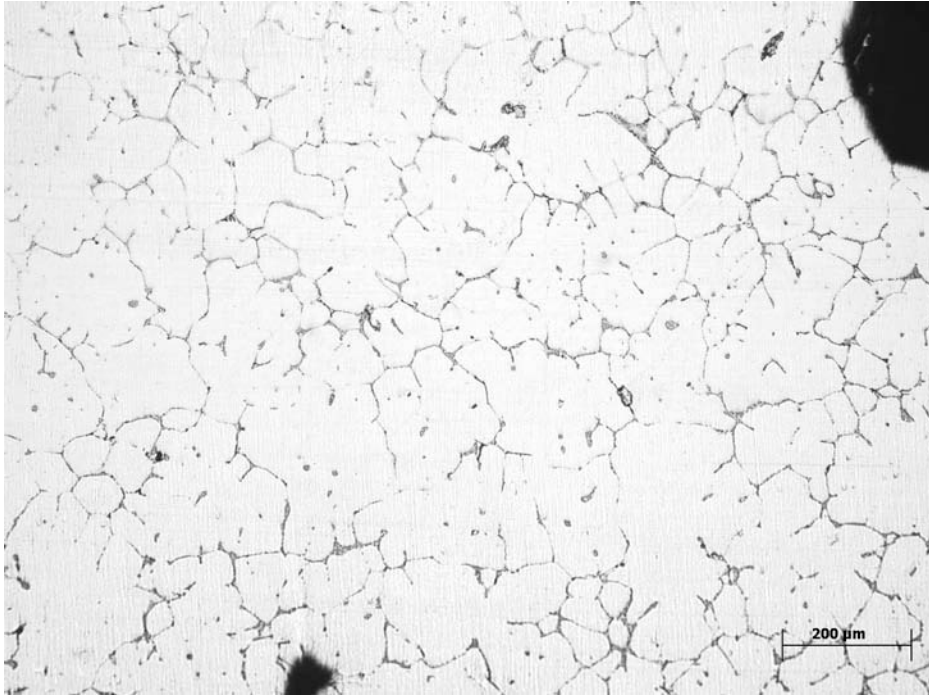


Şekil 5.16 4 no'lu numuneden 1000 büyütmede SEM ile alınan resif görünümlü intermetalik bağ fotoğrafı



Şekil 5.17 4 no'lu numuneden alınan resif görünümlü kısmın EDS analizi

4 no'lu numuneden kompozisyon fotoğrafları alınırken dikkati çeken ve denizlerde ki resiflere benzeyen bu oluşum AL-Fe-Si intermetalik bağı olup bu tip oluşumlar diğer numunelerde de gözlenmiştir. Ayrıca bu resimde görülen AlFeSi intermetalik fazı β fazdır. Aynı zamanda α fazında bulunabilen AlFeSi intermetalik fazını β halinde olması malzemenin üretim ve şekillendirilme özelliklerini negatif etkilemektedir [32]. β fazını α fazından ayırt etmek için en-boy oranının 1/3 ten fazla olup olmamasına bakılır. [32]



Şekil 5.18 11 no'lu numunenin 10 büyütme ile optik mikroskopta çekilmiş mikro yapı fotoğrafı

Numunelerin mikro yapıları incelendiği vakit yukarıda bahsi geçen intermetalik ve diğer bağların optik mikroskop ile incelendiğinde de görüldüğü gözlemlenmektedir. Ayrıca üretilmiş numunelerin yapılarının yayılmış bir düzen içinde olduğu ve aynı zamanda da hücresel bir yapıya sahip olduğu görülmektedir[31]

Alüminyum köpük üretiminde köpürtmeden sonra yapılan soğutma işlemi kendi içinde bir aşırı doyma kaynağı olup tane sınırlarında çökeltiler oluşmasını sağlamaktadır. Bu sebeple ısıtıl işlem görmemiş numunelerin tane sınırlarında da rahatlıkla bu çökeltileri görmekteyiz. [28]

5.2.5 Alüminyum köpük numunelerinin sertliklerinin incelenmesi

Çizelge 5.6 Yanıt yüzey analizine göre tasarlanmış ikinci aşama deneylerin sonuçları

Deney no	TiH2 (%ağ.)	Mg (%ağ.)	Si (%ağ.)	Sertlik (Hv) Alt Kısım	Sertlik (Hv) Köpükleşen Kısım	Sertlik (Hv) Ortalama
1	0,6	1	1,5	69,5	49,5	60
2	0,6	1	1	51,6	66,6	59
3	0,8	0,5	1,5	50,6	52,3	51
4	0,4	0,5	0,5	43,3	37,8	41
5	0,8	1	1	64,8	52,5	62
6	0,8	1,5	1,5	64,9	53,3	63
7	0,8	1,5	0,5	61,9	62,7	62
8	0,4	0,5	1,5	65,3	39,8	53
9	0,6	1,5	1	69,5	67,9	69
10	0,6	1	1	58,4	65,4	60
11	0,4	1,5	1,5	75,5	63,6	70
12	0,6	1	0,5	60,9	48,3	55
13	0,8	0,5	0,5	48,6	50,1	49
14	0,6	0,5	1	55,7	48,4	54
15	0,4	1	1	65,5	61,8	65
16	0,4	1,5	0,5	59,3	54,3	58

Ortalama sertlik değerleri üzerinden alınan sonuçlar ANOVA (Analysis of Variance) ve regresyon analizleri ile değerlendirilmiştir. İlk analizde TiH₂‘ nin sertlik üzerinde etkisi görölmemiştir. Analizden TiH₂ parametresi çıkarıldığında ise oldukça uygun bir model bulunmuş ve model R² ve R²_{ayarlanmış} değerleri sırasıyla %89 ve 86,3 olarak hesaplanmıştır. aşağıda regresyon ve ANOVA analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.7 Ortalama sertlik değerleri üzerine regresyon analiz sonuçları

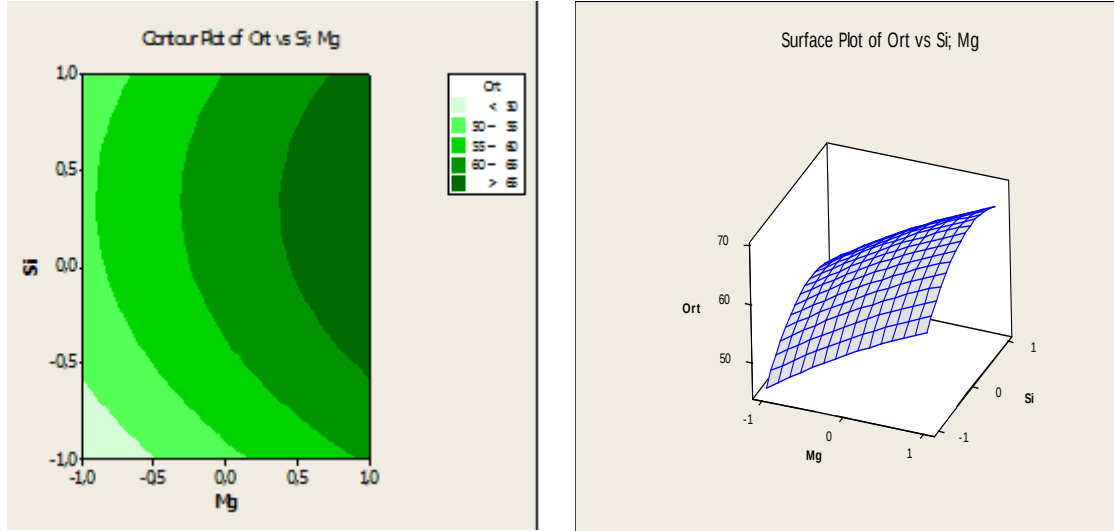
Parametreler	Katsayılar	SE Katsayısı	T	p
Sabit	61,5	1,13	54,08	0,0
B	7,4	0,88	8,4	0,0
C	3,2	0,88	3,63	0,003
CxC	-5,3	1,43	-3,68	0,003

$$S = 2.785 \quad R\text{-Sq} = 89,0\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 86,3\%$$

Çizelge 5.8 ANOVA

	Serbestlik derecesi	SS	MS	F
Regresyon	3	755,33	251,77	32,45
Lineer	2	650	325	41,89
İkinci derece	1	105,33	105,33	13,58
Hata	12	93	7,75	0,09
Modele uyum	5	5,6	1,12	
Saf hata	7	87,5	12,5	
Toplam	15	848,43		

Sertlik ortalamasının B ve C ye göre değişimi yüzey grafiği olarak Şekil a ‘da verilmiştir. Şekil a ve b’ de görüldüğü gibi magnezyum yüzdesi arttıkça sertlik değerlerinin lineer olarak arttığı ve silisyum yüzdesinin artışına bağlı olarak değiştiiği görülmektedir. Şekil b’ de verilen kontur grafiğine göre yüksek sertlik değerleri %1,5 Mg ve %1 Si durumunda geręekleştiiğini göstermektedir.



Şekil 5.19 İkinci aşama deneylerden sertlik değerlerinin analizinden elde edilen yüzey grafikleri.

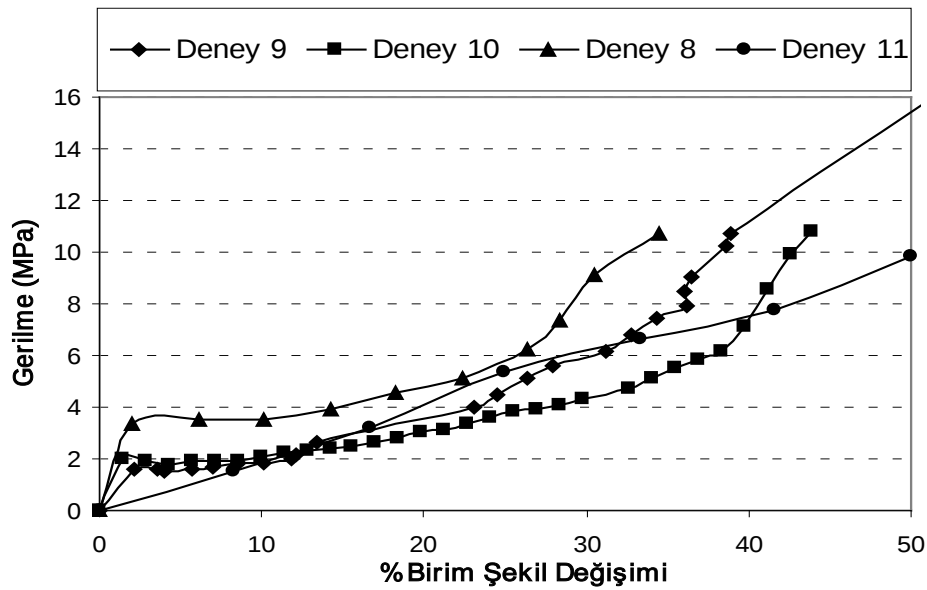
Yukarıda bulunan sertlik tablosu, yüzey eğrisi ve kontör çizimi incelendiğinde görülmüştür ki, en yüksek sertlik değerleri alaşımda %1,5 Mg ve %1 Si olduğu durumlarda elde edilirken en düşük sertlik değerleri alaşımın %0,5 Mg ve %0,5 Si içerdiiği durumlarda elde edilmektedir.

Tabloda gözüktüğü gibi Mg, Si, TiH₂ yüzdelерinin değiştirildiği 16 deneyde elde edilen mikro sertlik değerleri 41-70M HV arasındadır. Elde edilen en düşük değer olan 41 HV TiH₂‘nin %0,4 Mg ve Si yüzdesinin 0,5 olduğu köpükten alınmıştır. TiH₂‘nin %0,4, Mg ve Si yüzdesinin %1,5 olduğu köpükten alınan sertlik ise en yüksek değer olan 70 HV’dir. 6xxx serisi alaşımlarda alaşımın mukavemetini Mg:Si oranı belirlemektedir. Isıl işlem ile sertleşen bu alaşımlarda MgSi₂ fazının oluşması için gerekli oran 1.73:1 dir. Bu faz alaşımın mukavemetini artırır [21].

Lehmhus ve Banhart [26, 27] tarafından ön alaşımlanmış tozlar kullanılarak toz metalürjisi tekniği ile üretilmiş Mg, Si ve Cr içeren 6061 serisi ısıtılmış işlem görmemiş köpüklerde yapılan mikro sertlik incelemeleri sonucunda da benzer değerler elde edilmiştir.

5.2.6 Basma deneyleri sonuçları

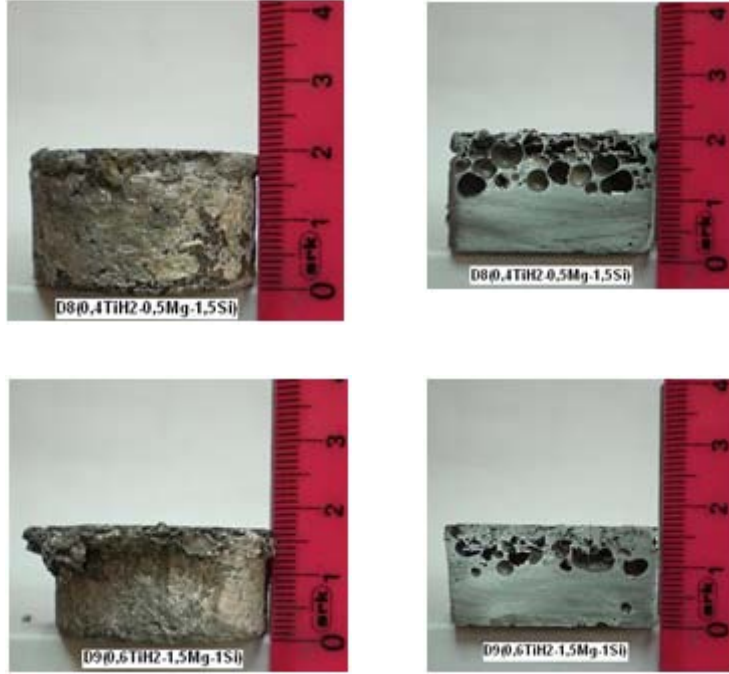
Üretilen numunelerden yeterli köpürme yüksekliğini sağlamış olan numunelere basma deneyi yapılmıştır. Diğer numunelerde yeterli köpürme sağlanmadığından sağlıklı sonuç alınamamış test cihazının limitlerini aşmıştır. Çizelgede numune numaralarına göre alınmış gerilim-gerinim diyagramı çizilmiştir. Köpüklerde mekanik mukavemetlerinin köpürme yönü ve yoğunluğun etkili olduğu bilinmektedir. Yoğunluğu yüksek olan köpüklerin daha mukavemetli oldukları bilinmektedir [28]



Şekil 5.20 Basma deney sonuçları. (numune no:8,9,10)

Gerilme-Birim şekil değişimi diyagramı köpüklerde 3 bölgeye ayrılır[34]: tepe noktasında en büyük basma akma dayanımının gözlemlendiği elastik bölge (1), hücrelerin eğilme ve burkulmaya dayalı deformasyon sergilediği plato bölgesi (2) ve yapının bulk malzeme davranışı sergilemeye başladığı bölge (3). Basma grafiğinin altında kalan alana bağlı olup plato bölgesinin uzunluğu ve plato gerilmesi ne kadar büyükse malzeme o kadar büyük bir enerji emer. Çizelgede bahsedilen üç bölgeyi birden barındıran Deney no 8, 9 ve 10'a ait basma çizimleri görülmektedir.

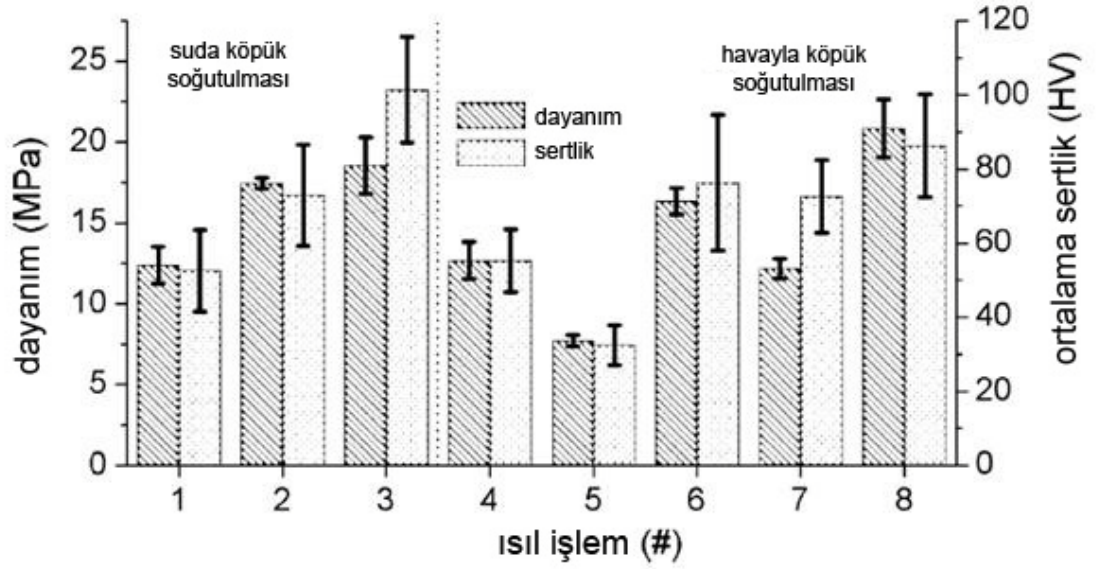
Elastik bölgeden hemen sonra mukavemette bir düşüş görülmektedir. Bu düşüş elastik bölgeden hemen sonraki en zayıf gözenek tabakasının deformasyona uğradığının göstergesidir [33].



Şekil 5.21 Basma deneyi sonunda numune durumları. (numune no:8,9,10)

Şekil 5.20 'den da kesit görüntülerinde basma deneyinin beklendiği gibi numunenin kitle olarak kalmış alt kısmına gelmeye yakın mesafelerde çöktüğü gözlenmiştir. Basma sonuçlarında numunenin mukavemeti gözenek boyutlarına ve gözenekler arası duvar kalınlıklarına bağlı olarak değişmektedir.

Lehmhus ve arkadaşlarının [21] yaptıkları çalışmada köpüklerin basma mukavemetleri ölçülmüş ve değişik ısıl işlem uygulamaları sonrasındaki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. 6061 ve 6082 alaşımlı köpükler üzerinde yapılan çalışmalarda 6061 alaşımında köpürtüldüğü gibi yapılan deneylerde basma mukavemeti 11, 72MPa, 6082 de ise 9MPa civarında bulunmuştur. Her iki alaşımda da Mg ve Si alaşım elementlerinin yanı sıra diğer alaşım elementleri de mevcuttur. Şekil 5.20 ve çizelge 5.9 'da verilen basma değerleri ve görüntüleri ise sadece Mg ve Si içeren alaşımlandırılmış köpüklerde bulunmuş ve erişilen değerler 4MPa ya kadar ulaşmış olup diğer alaşım elementleri ile artırılabilir ölçüdedir.



Şekil 5.22 Isıl işlem sonrası basma mukavemeti ve ortalama sertlik değeri ilişkisi[28]

Alüminyum köpükler sıkıştırıldıklarında yapılarından dolayı yoğunlaşırlar. Bu sebeple çentik açılarak güç uygulanan bir köpükte çentiğin altındaki yapısal hataların dağılımı değişir ve yoğun bir metal gibi çentik altında kısıtlayıcı plastik stresler oluşmayacaktır. Bunun sonucu olarak düşük yoğunluklu bir köpüğün çentikli sertlik ölçümünden alınan değer basma dayanımıyla yaklaşık olarak aynı değere sahiptir. [35]

Yukarıda ki şekilde de değişik ısıtım işlemleri uygulanmış alüminyum köpük numunelerinin sertlik-basma dayanımı değerleri grafik olarak verilmiştir. Burada da görülen değerler bu durumu teyit etmektedir.

5.2.7 Isıl işlem görmüş numunelerin incelenmesi

Çizelge 5.9 Yanıt yüzey analizine göre tasarlanmış ısıtıl işlem deneylerinin sertlik sonuçları ve karşılaştırılması

Deney no	TiH2 (%ağ.)	Mg (%ağ.)	Si (%ağ.)	Sertlik (Hv) Ortalama	Sertlik (ısıtıl işlem) Ortalama
1	0,6	1	1,5	60	87
2	0,6	1	1	59	76
3	0,8	0,5	1,5	51	69
4	0,4	0,5	0,5	41	58
5	0,8	1	1	62	81
6	0,8	1,5	1,5	63	81
7	0,8	1,5	0,5	62	63
8	0,4	0,5	1,5	53	73
9	0,6	1,5	1	69	73
10	0,6	1	1	60	81
11	0,4	1,5	1,5	70	88
12	0,6	1	0,5	55	70
13	0,8	0,5	0,5	49	55
14	0,6	0,5	1	54	57
15	0,4	1	1	65	73
16	0,4	1,5	0,5	58	64

Düşük sıcaklıklarda yaşlandırma yapılırken ortam sıcaklığının 50 C den aşağıda olmasının malzemenin mekanik özelliklerinde fark edilir bir değişme oluşturmadiğı için alüminyum köpüklerin ısıt işlem sonrasında sertliklerinin ölçülmesinde zaman bir faktör değildir.[36] Bu sebeple numunelerin ısıt işlem sonrası sertliklerinde yaşlanmaya bağılı bir değişim meydana gelmesi söz konusu değildir.

Alüminyum köpüklerin bölgesel sertlik davranışlarına bakarak alüminyum köpüklerin basma davranışları hakkında yorum yapmak pek yerinde olmayacaktır[21]. Bunun sebebi olarak basma ve çekme çalışmalarında alüminyum köpüğün bir bütün olarak test edilmesi öte yandan sertlik değerlerinin ise yapısal olarak heterojen olan köpüklerin değişik bölgelerinden alınması gösterilebilir. [28] Dolayısıyla alınan sertlik değerleri üzerinden numunelerin basma dayanımlarının ne olabileceklerine dair bir çalışma yapılmamıştır.

Alüminyum köpükler heterojen yapılar oldukları için ısıt işlem sırasında ısınma ve soğuma davranışlarında uniform bir değişim beklemek doğru olmaz [28]. Bu sebeple alınan sonuçlar değişik ısınma ve soğuma durumları göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir.

Buna rağmen sertlik değerleri alüminyum köpüklerde bölgeye göre değişiklik göstermemektedir. Dolayısıyla alüminyum köpükler her ne kadar ısıt iletkenlikte heterojen bir profil çizse de ısıt işlem yapıldıktan sonra her bölge benzer ısıt işlem etkisini altında olduğı gözlemlenmektedir. [28]

Numunelere ısıt işlem yapıldıktan sonra alınan sertlik değerlerinden ortaya çıkan ortalamalar üzerinden alınan sonuçlar ANOVA (Analysis of Variance) ve regresyon analizleri ile değerlendirilmiştir. TiH₂' nin etki değeri düşük çıktığı için TiH₂ modelden çıkartılıp hatalara katılmıştır ve sadece Mg ile Si nin etkileri incelenmiştir. Ortaya çıkan model TiH₂' li model den daha iyi sonuçlar vermiş olup R² ve R²_{ayarılanmış} değerleri bir birlerine yaklaşılarak daha tutarlı bir model oluşturmuşlardır. R² ve R²_{ayarılanmış} değerleri %93,49 ve %90,24 çıkmıştır. Aşağıda regresyon ve ANOVA analiz sonuçları görülmektedir.

Çizelge 5.10 Regresyon analizi

Parametreler	Katsayılar	SE Katsayısı	T	P
Sabit	77,182	1,464	52,715	0,000
Mg	5,7000	1,024	5,568	0,000
Si	8,8000	1,024	8,596	0,000
Mg*Mg	-11,045	1,890	-5,844	0,000
Si*Si	2,455	1,890	1,299	0,223
Mg*Si	1,6250	1,145	1,420	0,186

S=3,92152 R-Sq=93,49% R-Sq(Adj)=90,24%

Çizelge 5.11 ANOVA

	Serbestlik derecesi	SS	MS	F
Regresyon	5	1505,64	301,127	28,73
Lineer	2	1099,30	549,650	52,45
İkinci derece	2	385,21	192,605	18,38
İlişki	1	21,12	21,125	2,02
Hata	10	104,80	10,480	
Modele uyum	3	20,55	6,851	0,653
Saf hata	7	84,25	12,036	
Toplam	15	1610,44		

Isıl işlem görmüş numunelerin ısıt işlem görmemiş normal üretilmiş alüminyum köpüklerle beraber yapılan analizlerinde eklenen Blok sütunu ısıt işlem görmüş ve görmemiş olarak köpükleri ikiye ayırmaktadır. Yapılan regresyon analizi köpüklerin ısıt işlem görmesi sertlikleri üzerinde aktif bir etkiye sahip olduğu teyit etmiştir.

Isıl işlem görmüş ve görmemiş numunelerin sertliklerine göre yapılan regresyon ve ANOVA analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

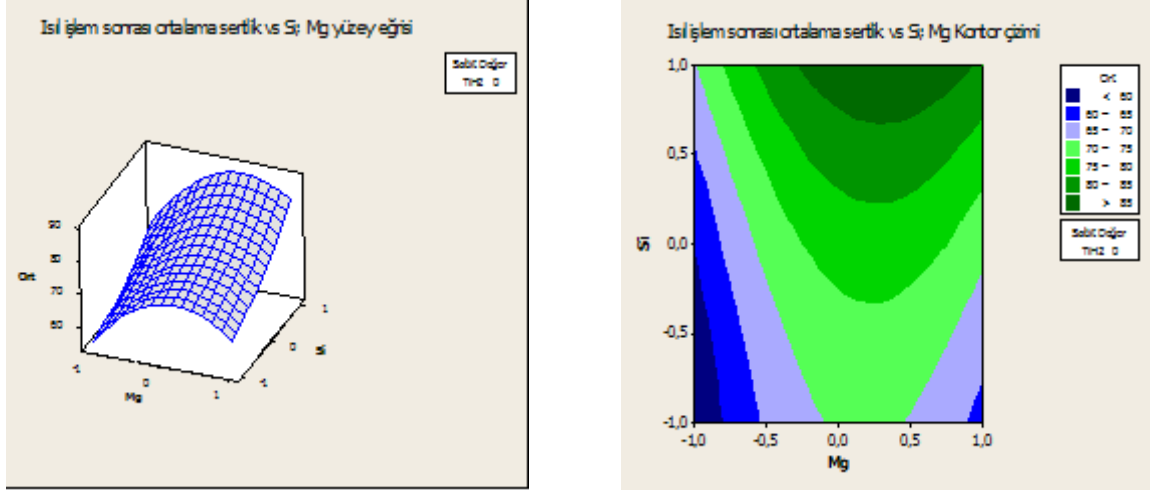
Çizelge 5.12 Regresyon analizi

Parametreler	Katsayılar	SE Katsayısı	T	P
Sabit	69,3103	1,6039	43,212	0,000
Blok	-6,8125	0,8470	-8,043	0,000
TiH2	-0,3500	1,0714	-0,327	0,747
Mg	6,5500	1,0714	6,114	0,000
Si	6,0000	1,0714	5,600	0,000
TiH2*TiH2	0,7845	2,0866	0,376	0,711
Mg*Mg	-62155	2,0866	-2,979	0,007
Si*Si	-1,4655	2,0866	-0,702	0,490
TiH2*Mg	-0,6250	1,1978	-0,522	0,607
TiH2*Si	-1,7500	1,1978	-1,461	0,159
Mg*Si	0,7500	1,1978	0,626	0,538

S=4,79123 R-Sq=87,78% R-Sq(Adj)=81,96%

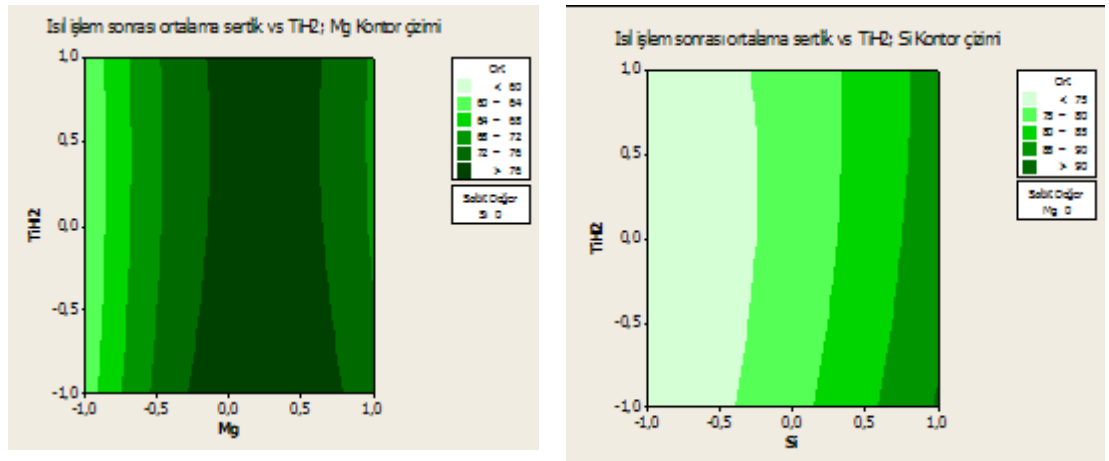
Çizelge 5.13 ANOVA

	Serbestlik derecesi	SS	MS	F
Bloklar	1	1485,12	1485,12	64,69
Regresyon	9	1976,80	219,64	9,57
Lineer	3	1580,50	526,83	22,95
İkinci derece	3	332,05	110,68	4,82
İlişki	3	64,25	21,42	0,93
Hata	21	482,07	22,96	
Modele uyum	19	469,07	24,69	3,80
Saf hata	2	13,00	6,50	
Total	31	3944,00		



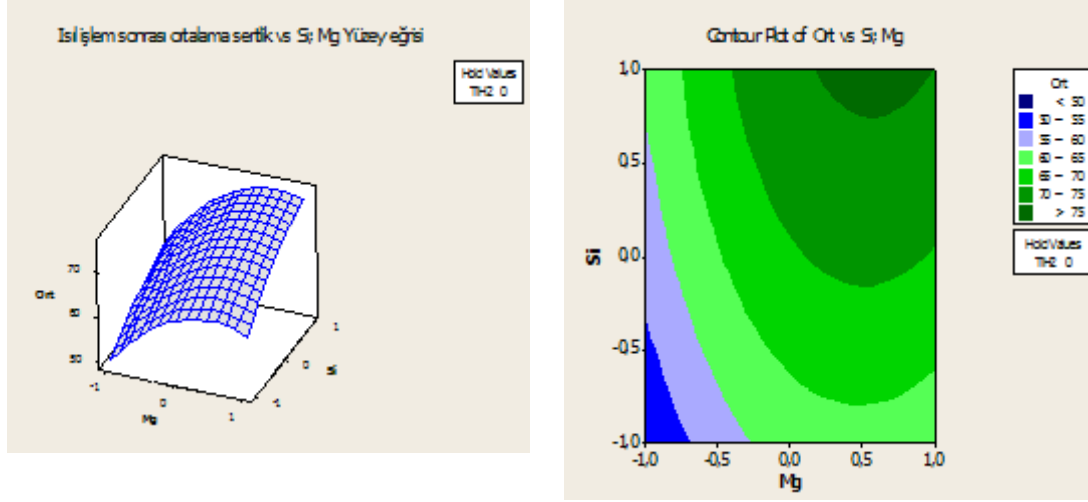
Şekil 5.23 Isıl işlem gören numunelerde Mg,Si,TiH₂'nin etkilerinin incelenmesi için oluşturulan yüzey eğrileri ve kontör çizimleri

Yukarıda ki şekillerde ısıl işlem yapılmış olan alüminyum köpüklerde Mg un ve Si 'un etkileri görülmektedir. Şekil a da ısıl işlem yapılmış olan alüminyum köpük için yüzey eğrisi görülmektedir. Bu eğriden anlaşılabileceği gibi magnezyum sertliğe olan etkisi parabolik olup maksimum katkıyı en yüksek değerinde değil aşağıda ki kontör çiziminden de görülebileceği gibi %1-%0,75 aralığında göstermektedir. Silisyum ise lineer bir etkileşim göstermekte ve kullanılan maksimum değeri olan %1,5 oranında maksimum sertlik değerine ulaşmıştır.



Şekil 5.24 Isıl işlem sonrası Mg,Si,TiH₂'nin etkilerinin incelenmesi için oluşturulan kontör çizimleri

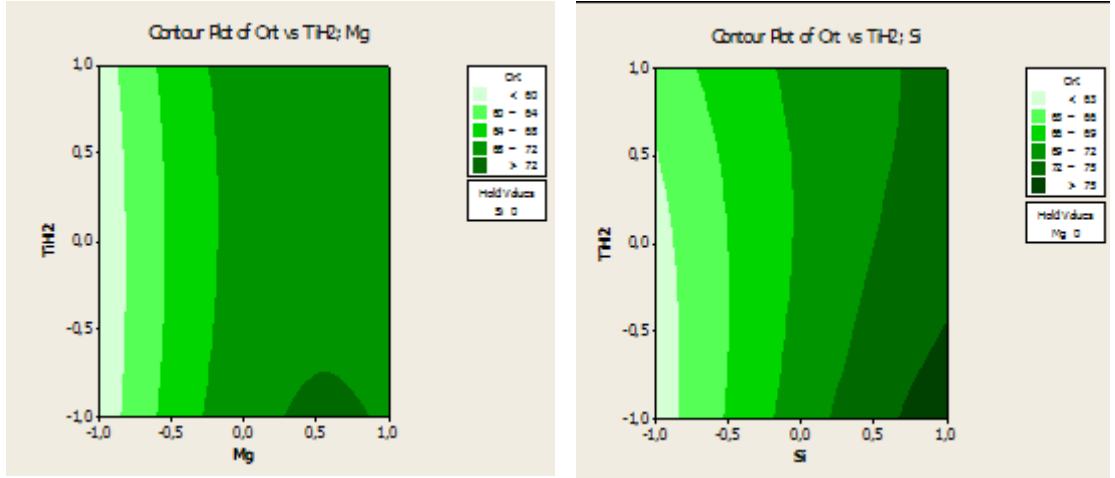
Isıl işlem görmüş numunelerin görmemiş numuneler ile beraber analiz edilmesi ile Mg, Si,TiH₂'nin alüminyum köpükler üzerindeki genel etkileri görülmesi için hazırlanmış olan yüzey eğri ve kontör çizimleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.25 Isıl işlem gören numunelerde Mg,Si,TiH₂'nin etkilerinin incelenmesi için oluşturulan yüzey eğrileri ve kontör çizimleri

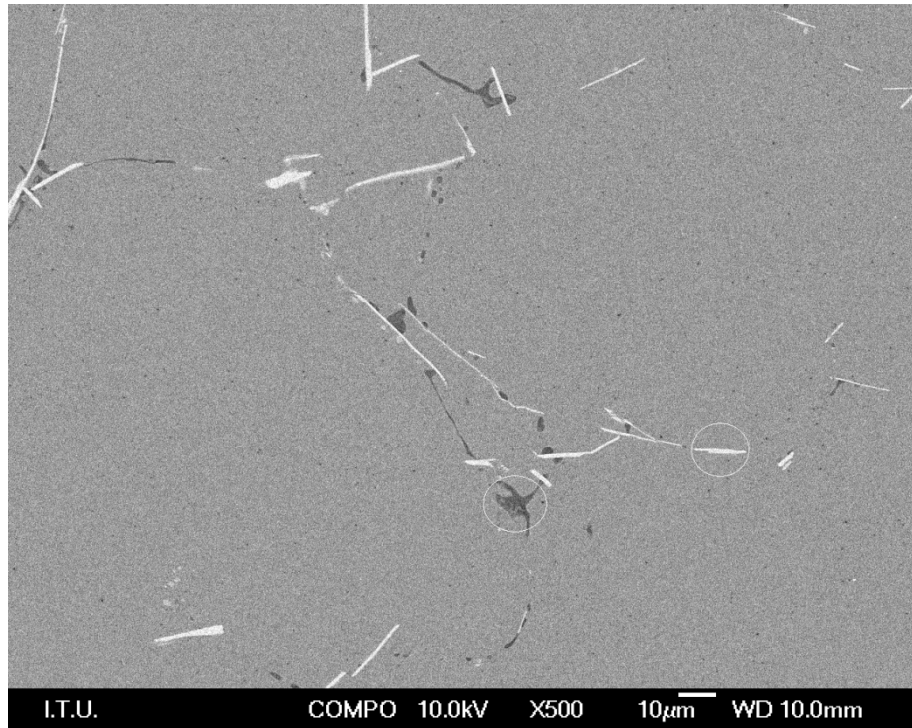
Şekil (a)da ısıt işlem sonrası M,Si'nin TiH₂ sabit iken ortalama sertliği nasıl etkilediği görülmektedir. (b) de ise aynı özelliklerin kontör çizimi görülmektedir. Şekillerde Mg'un ısıt işlem görmüş ve görmemiş numunelerin beraber değerlendirilmesinde sertlik zerinde doğrudan etkisi görülmektedir. Si'un da aynı şekilde bütün numuneler göz önüne alınarak değerlendirme yapıldığında sertlik üzerinde doğrudan etkisi görülmektedir.

Ancak iki elementin sertlik üzerinde ki etkileri beraber incelendiği zaman sertliğin en yüksek olduğu aralığın Si için %1,5 Mg için %1,0-%1,5 olduğu görülmektedir. Ancak Mg' un miktarı %1,5 çıktığı zaman maksimum sertliğe ulaşamamaktadır.

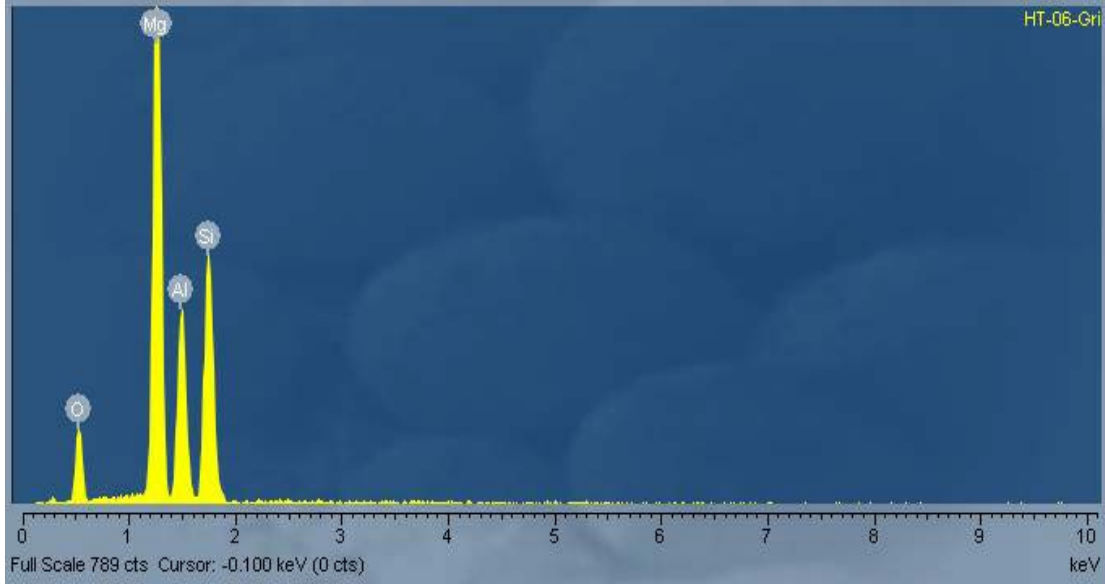


Şekil 5.26 TiH₂ miktarının alüminyum köpüğün sertliğine etkisi

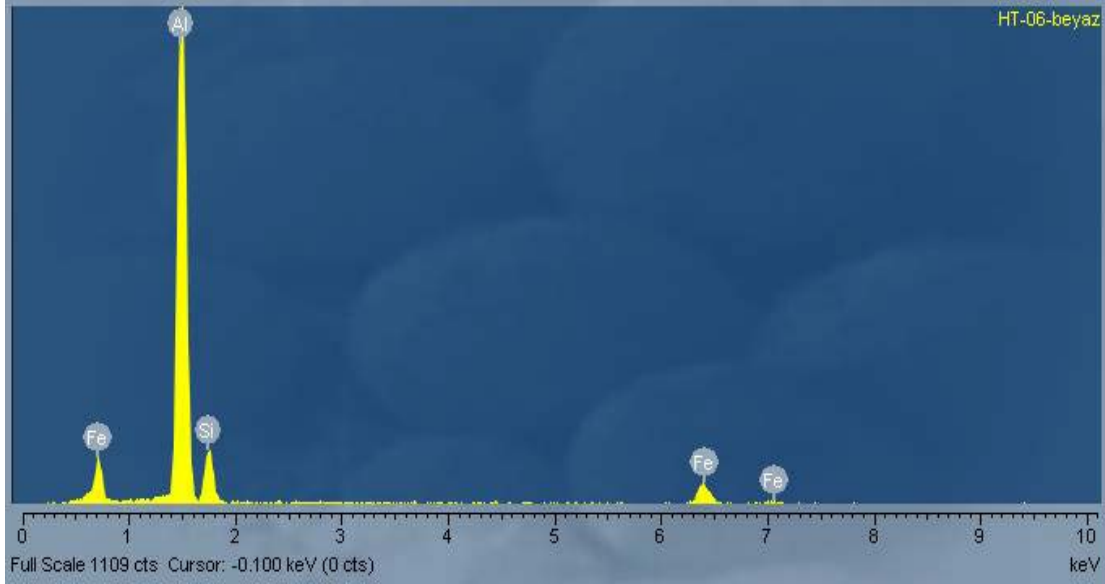
Yukarıda ki şekillerde TiH₂ miktarının alüminyum köpüğün sertliğinde çok minimal bir etkisi olduğu görülmüştür.



Şekil 5.27 Isıl işlem yapılmış 6 no'lu numunenin SEM ile 500 büyütmede çekilmiş kompozisyon fotoğrafı

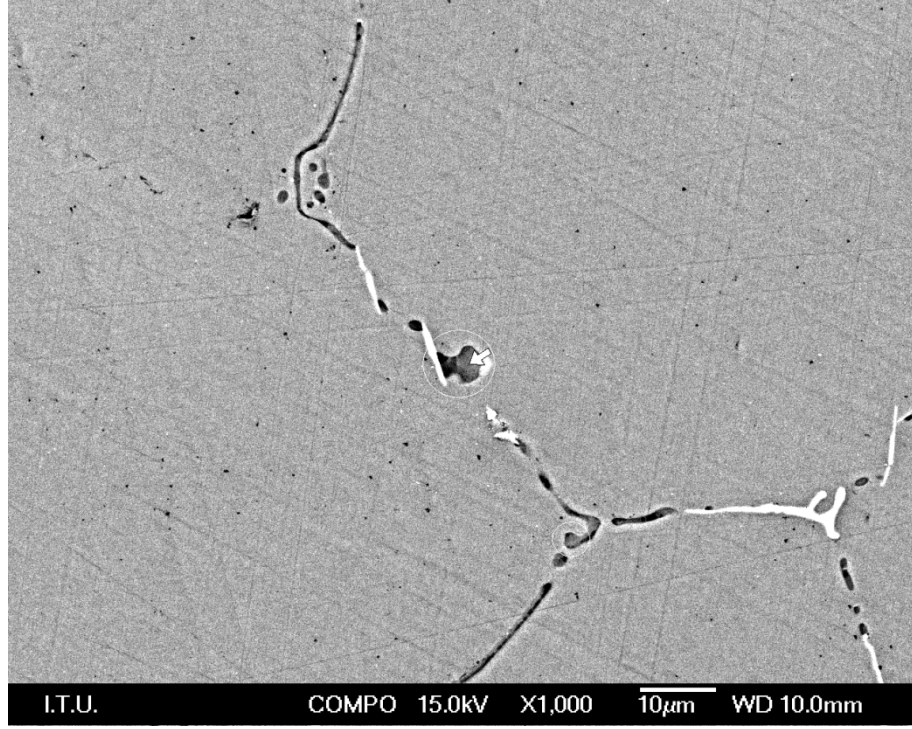


Şekil 5.28 6 no'lu numunede gri bölge EDS analiz grafiği

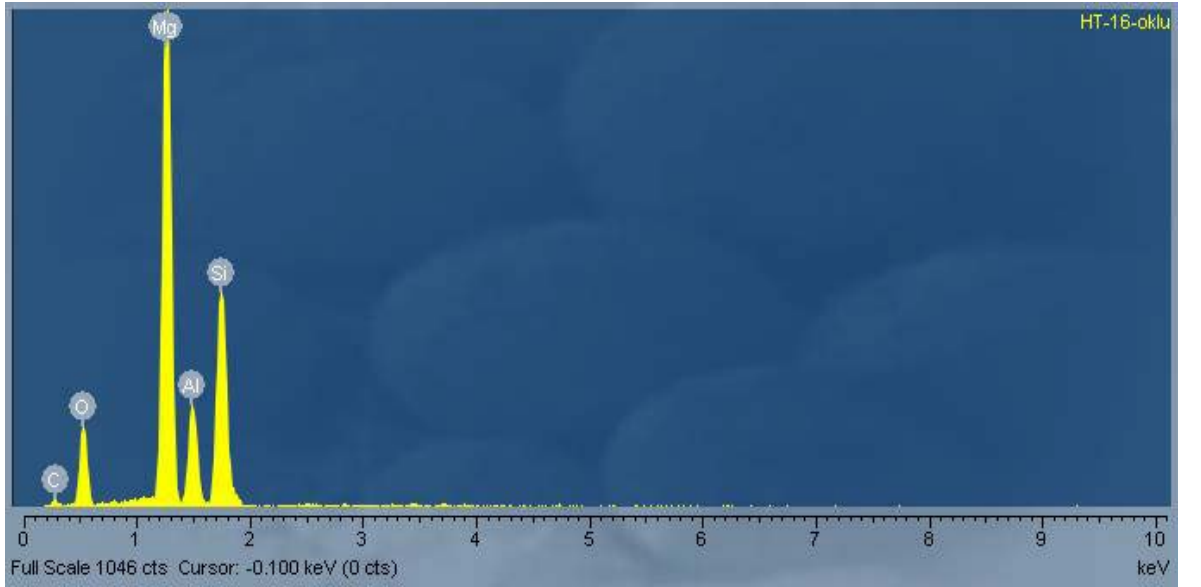


Şekil 5.29 6 no'lu numunede beyaz bölge EDS analiz grafiği

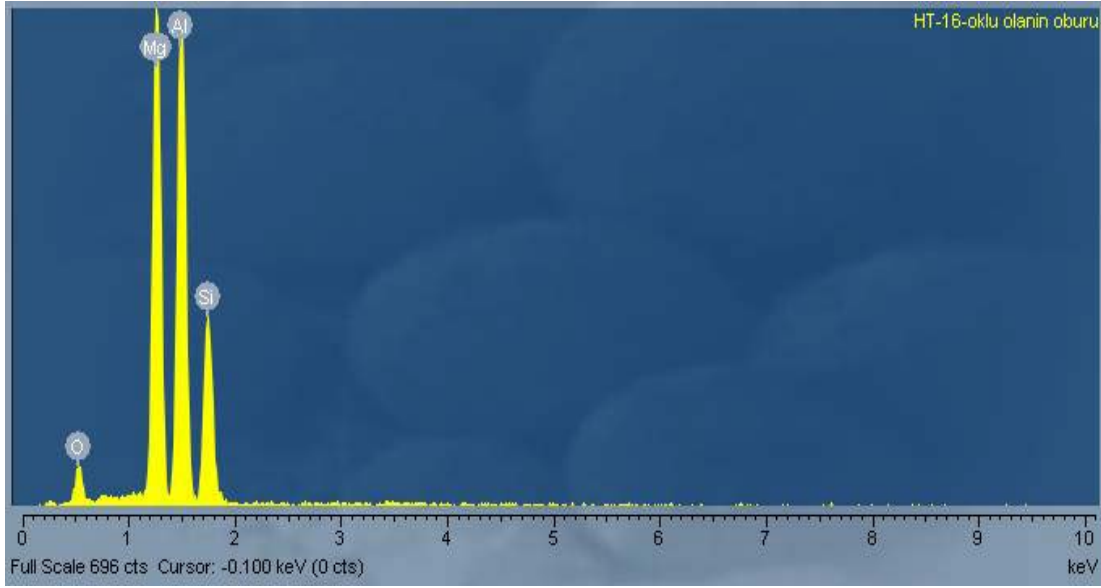
Yukarıdaki EDS analizleri ve ısıtılmış 6 no'lu numunenin SEM ile çekilmiş kompozisyon resminde görülmektedir ki numunede beyaz ince uzun kısımlar AlFeSi intermetalik fazı ve daha yuvarlak şekilli olan gri kısımda da Mg_2Si görülmektedir. Ayrıca bu analizlerde oksijene görülmektedir ancak toz alüminyumun içinde bulunan oksijen yapılan işlemlerden sonra tane sınırlarında yoğunlaşarak alüminyum köpüğün yapısının içinde görülmektedir. Bu durum yapılan ısıtılmış işlemi etkileyebileceği gibi EDS analizlerinde görülen oksijeni de açıklamaktadır[28].



Şekil 5.30 Isıl işlem yapılmış 16 no'lu numunenin SEM ile 1000 büyütmede çekilmiş kompozisyon fotoğrafı

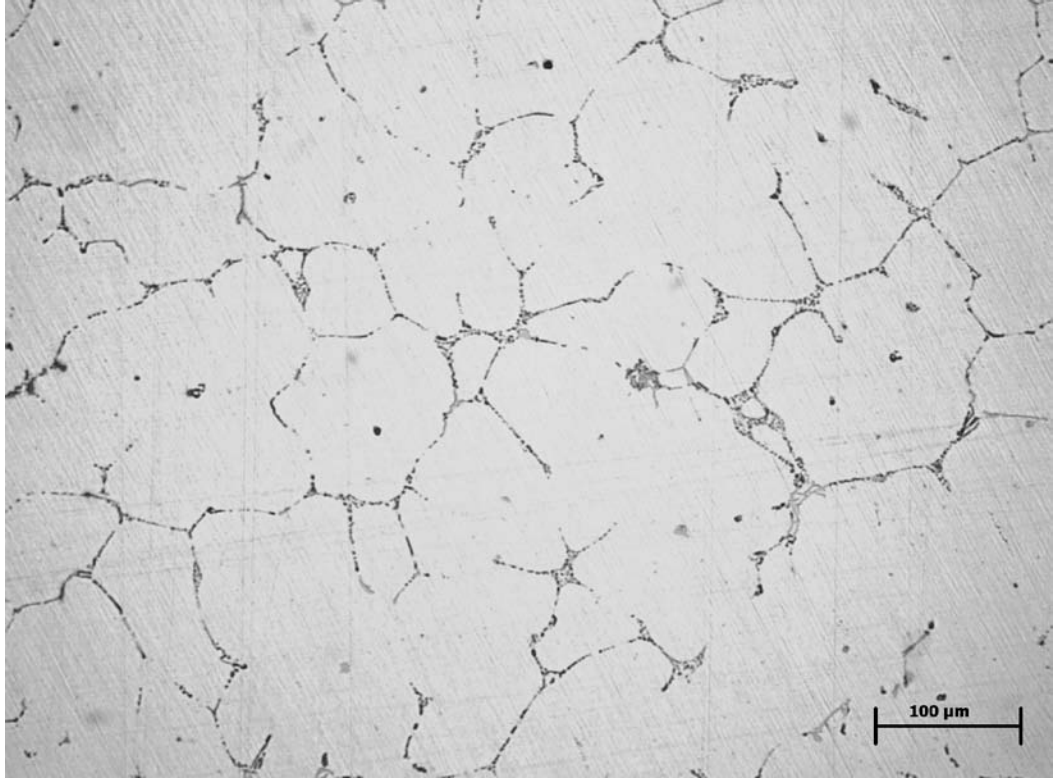


Şekil 5.31 16 no'lu numunede ok ile gösterilen bölge EDS analiz grafiği

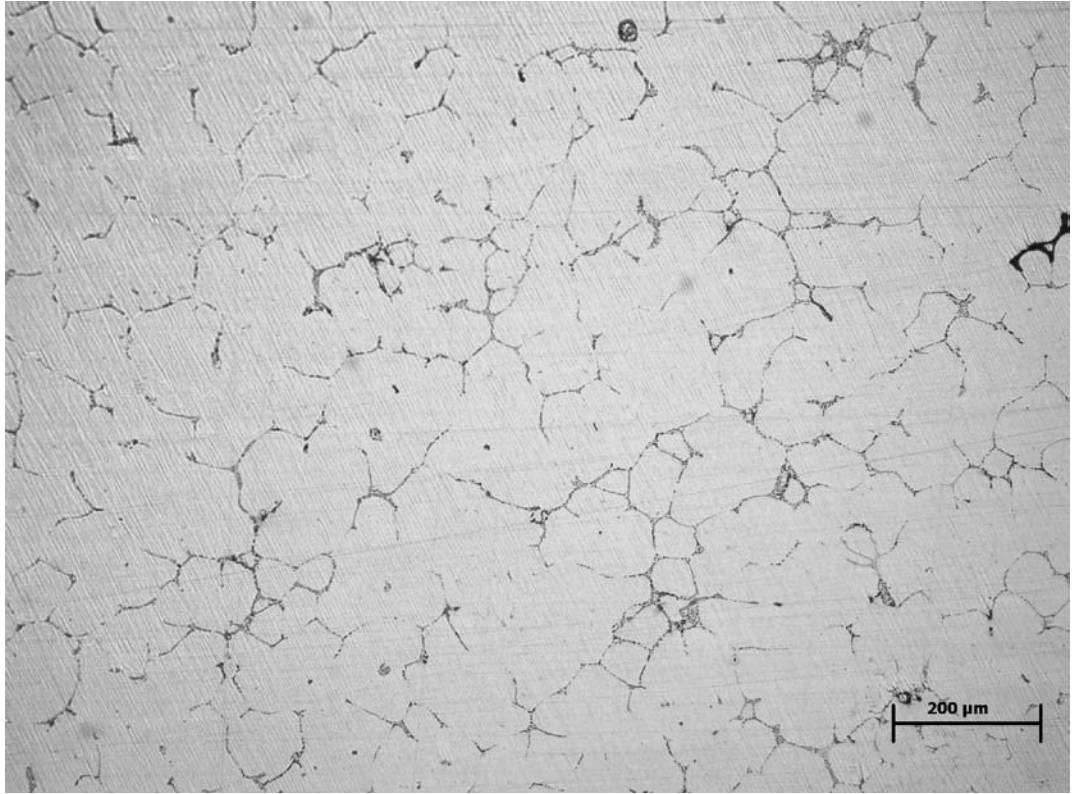


Şekil 5.32 16 no'lu numunede ok ile gösterilmeyen bölge EDS analiz grafiği

EDS den de görülen ve neredeyse molar olarak bire iki oranında olan Mg Si bileşiğinin bu sebeple Mg_2Si olduğu söylenebilir. [37] Burada görülen faz ısıtıl işlem ile Ortaya çıkan GP bölgesi sonrası oluşan β' veya β fazı olması mümkündür. Bu iki fazın da bileşimi 2:1 olduğu için bileşim olarak ayırt etmek mümkün değildir. Ancak birinin yapısı HCP diğeriinki de FCC olmakla beraber görüntüleri de biri çubuk, diğeri ise plaka şeklindedir[25]. Burada ki resimde görüldüğü gibi her iki özelliğe de sahip çökelti bulunmaktadır. Bu sebeple hem β' hem β çökeltilerinin bulunduğunu söylenebilir.



Şekil 5.33 Isıl işlem yapılmış 16 no'lu numunenin optik mikroskop ile 20 büyütmede çekilmiş mikro yapı fotoğrafı



Şekil 5.34 Isıl işlem yapılmış 7 no'lu numunenin optik mikroskop ile 10 büyütmede çekilmiş mikro yapı fotoğrafı

Yukarıda verilen resimlerde ısıtıl işlem görmüş alüminyum köpük numunelerinin mikro yapıları görülmektedir. Mikro yapı fotoğraflarında yukarıda bahsi geçen Mg_2Si ve $AlFeSi$ fazları rahatlıkla seçilmektedir. Bunun sonucu olarak ısıtıl işlem sonrasında fazların tane sınırlarına iyice çöktüğü söylenebilir. Ancak daha önce ısıtıl işlem yapılmamış numunelerden alınan resimlerde de tane sınırlarında çökelti gözlenmektedir. Bunun sebebi; alüminyum köpük üretiminde köpürtmenin arkasından yapılan soğutmayla aşırı doyma elde edilmesidir. Ancak bu soğutma tam bir aşırı doyma oluşturmamakta ve ısıtıl işlem sonrası yapılan hızlı soğutma ile daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. [28]

Isıtıl işlem ve sonrası da ki yaşlandırma sırasında $MgSi$ ve Mg_2Si fazları aşırı doymuş kısımlarda çökme yaparak ortaya çıkmaktadırlar.[21] Bu da ısıtıl işlem görmemiş numunelerde $MgSi$ ve Mg_2Si fazlarının neden görülmediğini açıklamaktadır.

6. SONUÇLAR

- Yapılan deneyler sonucunda alüminyum köpük üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir.
- Yapılan deneysel tasarım sonucunda seçilen parametreler için alüminyum köpük üretimi ve köpüklerin sertlik değerleri en iyi hale getirilmiştir.
- Optik mikroskop ve SEM fotoğraflarında köpükleşme sonucunda tamamen yeni taneler oluşmuş ve tanelerin içinde küçük boşluklara rastlanmıştır.
- Basma deneylerinde köpükleşme kalıbını tam olarak dolduran ve yoğunluğu düşük olan köpüklere yapılan basma testleri sonucunda klasik köpük basma davranışında görülen elastik bölgeye, düşük ve alçak akma dayanım sınırına, plato bölgesine ve porların birleştiği bulk metal elastik bölgesine rastlanmıştır.
- Literatürde yapılan araştırmalar ve yapılan basma deneyleri sonucunda sertliğin artmasıyla birlikte basma dayanımında da bir yükselme görülmektedir. Bu değerlerin yükselmesi her ne kadar paralel olsa da tam anlamıyla aynı şekilde değiştiklerini söylemek şu adımda mümkün değildir.
- Yanıt yüzey analizinden magnezyumun sertlik üzerine lineer ve pozitif yönde etki ettiği anlaşılmaktadır. Silisyumun etkisi ise değişiklik göstermektedir. Kontör grafiğine göre yüksek sertlik değerleri %1,5 Mg ve %1 Si için elde edilmektedir.
- Yanıt yüzey analizinden TiH_2 'nin etkisinin çok düşük olduğu görülmüştür. Mg ve Si'un etkileri ise yapılan analizler sonucunda oldukça yüksek çıkmıştır. Ortalama sertliğin Mg ve Si etkenlerine göre yanıt yüzey analizinden alınan $R-Sq = 89,0\%$ $R-Sq(adj) = 86,3\%$ değerleri de yapılan analizin güvenilirliğini teyit etmektedir.
- Numunelere ısıtılma işlem yapıldıktan sonra yapılan analizlerde magnezyumun sertlik üzerine parabolik bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Silisyumun etkisi ise lineer ve pozitif yöndedir. Kontör grafiğine göre en yüksek sertlik değerleri Si için %1,5 Mg için %1,0-%1,5 ' de elde edilmektedir.

- Isıl işlem için yapılan yanıt yüzey analizinde TiH_2 'nin etkisinin çok düşük olduğu görülmüştür.
- Mg ve Si'un etkileri ise yapılan analizler sonucunda oldukça yüksek çıkmıştır. Ortalama sertliğin Mg ve Si etkenlerine göre yanıt yüzey analizinden alınan $R-Sq = 93,49\%$ $R-Sq(adj) = 90,24\%$ değerleri de yapılan analizin güvenilirliğini teyit etmektedir.
- Yapılan ısıt işlemin sertlikler üzerindeki etkisini incelemek için Mg, Si ve ısıt işlem etken olarak alınmış ve ortalama sertlikle beraber yanıt yüzey analizleri yapılmıştır. Çıkan sonuçta ısıt işlemin sertliğe etki ettiği ortaya çıkmış ve alınan $R-Sq=87,78\%$ $R-Sq(adj)=81,96\%$ değerleri analizi teyit etmiştir.
- Mikro yapılar incelendiği zaman ısıt işlem görmemiş yapılarda yapıyı kuvvetlendiren β Al-Fe-Si intermetalik fazları görülmüş, ısıt işlem görmüş numuneler incelendiklerinde ise β Al-Fe-Si intermetalik fazının yanında β ve β' Mg_2Si fazına da rastlanmıştır.
- Isıl işlem gören numunelerde çökelen Mg_2Si fazı sertlik değerlerinin fark edilir şekilde artmasına sebep olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] J. Banhart, Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams, Progress in Materials Science 46, (2001), 559-632.
- [2] N. Babcsan, J. Banhart, D. Leitmeyer, Metal Foams- Manufacture and Physics of Foaming, International Conference Advanced Metallic Materials, 5-7 November, 2003, Smolenice, Slovakia, p.5-15.
- [3] M. Güden, T.E. Çelik, E. Akar, S. Çetiner, Compression testing of a sintered Ti6Al4V powder compact for biomedical applications, Materials Characterization 54 (2005) 399– 408
- [4] S.C. Tzeng, W. P. Ma, A novel approach to manufacturing and experimental investigation of closed-cell Al foams, Int J Advanced Manufacturing Technology, (2006), 28, p. 1122–1128
- [5] N. Babcsan, D. Leitmeyer, J. Banhart, Metal foams—high temperature colloids Part I. Ex situ analysis of metal foams Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 261 (2005) 123–130
- [6] H. W. Seeliger, Aluminum Foam Sandwich (AFS) Ready for Market Introduction, Advanced Engineering Materials, 2004, 6, No.6, 448-451
- [7] A. Fuganti, L. Lorenzi, Aluminium Foam for Automotive Applications, Advanced Engineering Materials, 2000, 2, No. 4, 201-204
- [8] J. Banhart, Manufacturing Routes for Metallic Foams, JOM • December 2000, p. 22-27
- [9] J. Banhart, Metallic Foams, europhysics news 1/1999
- [10] S. Amjad, Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams, 2001 p. 1-15
- [11] D. Lehmus, C. Marschner, J. Banhart, Influence of heat treatment on compression fatigue of aluminium foams, Journal Of Materials Science 37 (2002) 3447 – 3451

- [12] J. Gassan, W. Harwick, D. Girlich, Behavior Of Aluminum Foams Under Quasi-Static And Crash Loadings, *Journal Of Materials Science Letters* 20, 2001, 1047 – 1048.
- [13] A. R. A. Hernandez, Combined Flow And Heat Transfer Characterization Of Open Cell Aluminum Foams, *Doktora Tezi*, 2005, p.1-10.
- [14] J. Banhart, Manufacture, Metal foams: production and stability, *Advanced Engineering Materials* 2006,8, No 9
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Metallic_foam tarih: 25.04.2009
- [16] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, *Metal foams: a design guide*, p 1-5
- [17] Jikou Zhou, *Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization and Applications* chapter 5, CRC Press 2006
- [18] Banhart J., *Metal Foams—from Fundamental Research to Applications*, Department of Materials Science, Technical University Berlin, Berlin, GERMANY
- [19] Duante I. and Banhart J., Study of aluminum foam formation kinetics and microstructure, *Fraunhofer-Institute for Advanced Materials, Wiener Str. 12, 28359, Bremen, Germany*
- [20] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, *Metal foams: a design guide*, p 6-23
- [21] Lehmhus D. and Banhart J. and Rodriguez-Perez M. A., Adaptation of aluminium foam properties by means of precipitation hardening, *Fraunhofer-Institute for Manufacturing and Advanced Materials, Wiener Strasse 12, 28359 Bremen, Germany*
- [22] Matijasevic B., Characterisation and Optimisation of Blowing Agent for Making Improved Metal Foams, *Technical University Berlin, Hardenbergstrasse 36, 10623 Berlin, Germany*
- [23] Matijasevic B. And Banhart J., Improvement of aluminium foam technology by tailoring of blowing agent, *Scripta Materialia* 54 (2006) 503–508
- [24] T. S. Srivatsan and Satish Vasudevan, *Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization and Applications* chapter 9, CRC Press 2006

- [25] S. J. Andersen, H. W. Zandbergen, J. Jansen³, C. Trøholt, U. Tundal⁴ and O. ReisoThe crystal structure of the β'' phase in Al-Mg-Si alloys, Elsevier 1998
- [26] Philip A. and Schweitzer, P.E., Metallic Materials: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties chapter 19, Marcel Dekker, Inc. 2003
- [28] Lehmhus D. and Banhart J., Properties of heat-treated aluminum foams, Fraunhofer-Institute for Manufacturing and Advanced Materials, Wiener Strasse 12, 28359 Bremen, Germany
- [29] Dmitry G. Eskin, Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys chapter 2, Taylor and Francis 2008
- [30] Consuelo Garcia-Cordovilla and Enrique Louis, Analytical Characterization of Aluminum, Steel, and superalloys, Taylor and Francis 2006
- [31] Randall M. German, Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industries Federation,1994
- [32] Keleşoğlu Ergün, Al-Mg-Si Alaşımlarında homojenizasyon Derecesi endeksi oluşturulmasına yönelik bir model, YTÜ, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Esenler İSTANBUL
- [33] Kim, A., Hasan, M.A., Nahm, S.H. ve Cho, S.S.,(2005), Evaluation of compressive mechanical properties of Al-foams using electrical conductivity, *Composite Structures*, **71**, 191–198.
- [34] Aly, M.S., (2007), Behavior of closed cell aluminium foams upon compressive testing at elevated temperatures: Experimental results, *Materials Letters*, **61**, 3138 3141.
- [35] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, Metal foams: a design guide, p 1-5
- [36] Demirtaş Hasan, Öztürk Fahrettin, Alkan Mahmut, 6061-o alaşımlarında ara verilerek yapılan yaşlandırmanın malzeme mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi, Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Niğde
- [37] Hong L., Zhao G., Liu C., Zuo L., Effects of magnesium content on phase constituents of Al-Mg-Si-Cu alloys, School of Mechanical Engineering, Shadong Institute of Light Industry, Ji'nan 250100, China

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Şevki Deniz SEZER
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 3 Ekim 1983
Adres: Yeşilbahar sokak Olpak apt. 13/10 Göztepe Mahallesi
Kadıköy İstanbul
Lisans Üniversite: İ.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü