

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI
KÖPÜK SANDVIÇ YAPI ÜRETİMİ**

Hüseyin DEMİRTAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2010
ANKARA**

Hüseyin DEMİRTAŞ tarafından hazırlanan TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI KÖPÜK SANDVIÇ YAPI ÜRETİMİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER
Tez Danışmanı, Metal Eğitimi

.....

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

Doç. Dr. İbrahim USLAN
Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon ve İmalat, Gazi Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER
Metal Eğitimi, Malzeme Bilimi, Gazi Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ
Metal Eğitimi, Mekanik Metalurji, Gazi Üniversitesi

.....

Tarih: 25 / 05 / 2010

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

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

TEZ BİLDİRİMİ

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

Hüseyin DEMİRTAŞ

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM
ESASLI KÖPÜK SANDVİÇ YAPI ÜRETİMİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Hüseyin DEMİRTAŞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2010**

ÖZET

Tezin amacı; toz metalurjisi (TM) yöntemi ile alüminyum matrise sahip köpük çekirdek ve alüminyum yüzey levhası kullanarak hafif sandviç yapı üretmektir. Üretim; köpürecek malzemelerin hazırlanması, sandviç yapının oluşturulması ve köpürtmeden oluşan üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Köpürecek malzeme; düşük ergime sıcaklıklarından dolayı (AlSi7, AlSi14 ve AlSi14Cu4,5) üç farklı karışım tozundan toz metalurjisi yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Karışımlarda, köpürtücü madde olarak sabit oranda (% 0,6) TiH₂ (Titanyum hidrür) kullanılmıştır. Tercih edilen karışım tozları 600 °C – 710 °C ve 7 min – 50 min aralığında çeşitli sıcaklık ve sürelerde köpürtülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ara bağlayıcı kullanılmasına gerek kalmayan ön işlemlerle Al plaka yüzeyli ve Al matrisli sandviç köpük üretilmiştir. Üretilen sandviç köpüklerde gevrek davranışına rağmen iyi gözenek morfolojisi, düşük ergime sıcaklığı, yüksek mukavemet gibi sebeplerle AlSi14Cu4,5 karışımının öne çıktığı tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 710.1.092
Anahtar Kelimeler : Toz metalurjisi, Al sandviç köpük, lineer genleşme
Sayfa Adedi : 117
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

**PRODUCTION OF CLOSED-CELL ALUMINUM FOAM - BASED
SANDWICH STRUCTURES BY POWDER METALLURGY TECHNIQUE**

(M.Sc. Thesis)

Hüseyin DEMİRTAŞ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2010

ABSTRACT

Aim of this thesis is to produce light sandwich structure by using foam - based aluminum matrix and aluminum surface plates by Powder Metallurgy (PM) technique. Production was carried out in three steps; preparation of foam materials, formation of sandwich structure and foaming. Due to low melting temperature, the foaming material was prepared from three different powder mixture (AlSi7, AlSi14 and AlSi14Cu4,5) by powder metallurgy technique. In the mixtures, % 0,6 TiH₂ (titanium hydride) was used as a foaming agent. The preferred powder mixtures were foamed at various temperatures (600 °C – 710 °C) and times (7 min - 50 min). At the end of the experimental studies, the sandwich structure having foam-based aluminum matrix and aluminum surface plates was produced with no need to use an intermediate binder. Among the sandwich foams produced here, it was determined that AlSi14Cu4,5 mixture came to the front in terms of good pore morphology, low melting temperature, high strength even though its brittle behavior.

Science Code : 710.1.092

Key Words : Powder metallurgy, Al foam sandwich, linear expansion

Page Number : 117

Adviser : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesinde, araştırma ve deneysel çalışma aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Mehmet TÜRKER'e şükranlarımı sunarım. Ayrıca doğrudan ya da dolaylı olarak faydalarını gördüğüm Gazi ve Karabük Üniversitesi'nin tüm akademik, idari ve hizmetli personeline de teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. METAL KÖPÜKLER VE SANDVIÇ YAPILAR	4
2.1. Metal Köpükler	4
2.2. Sandviç Yapılar	8
3. ÜRETİM YÖNTEMLERİ	13
3.1. Sıvı Metalurjisi	14
3.1.1. Doğrudan gaz ilavesi ile köpük üretimi	14
3.1.2. Köpürtücü madde kullanarak köpük üretimi	17
3.2. Toz Metalurjisi	21
3.3. Alüminyum Sandviç Köpük Üretimi	25
3.3.1. Doğal bağlanma ile sandviç üretimi	25
3.3.2. Yapay bağlanma ile sandviç üretimi	30
4. METAL KÖPÜKLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	32
4.1. Elektriksel Özellikleri	32

	Sayfa
4.2. Termal Özellikleri	34
4.3. Ses ve Titreşim Absorbsiyonu	36
4.4. Mekanik Özellikleri	37
5. KULLANIM ALANLARI	40
5.1. Metal Köpük Dolu Tüpler ve Darbe Emiciler.....	41
5.2. İntegral Zırh Malzemesi.....	44
5.3. Tasarım ve Mimari	45
5.5. Motosiklet Kaskı Olarak.....	45
5.6. Sandviç Yapıların Kullanımı.....	46
5.6.1. İç içe giren kaldırma sistemleri	47
5.6.2. Arine 5 roket adaptör prototipi	48
5.6.3. Pişirme tavaşı.....	49
5.6.4. Bisiklet krank kolu prototipi.....	50
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	51
6.1. Kullanılan Malzemeler	51
6.2. Numune Hazırlama.....	51
6.2.1. Toz karışımlarının hazırlanması	51
6.2.2. Köpürmeye hazır malzemelerin (preform) üretimi.....	52
6.2.3. Köpürtme ve sandviç köpük üretimi.....	54
6.2.4. Karakterizasyon	55
7. DENEYSEL SONUÇLAR.....	58
7.1. Farklı Sıcaklık ve Sürelerde Serbest Köpürtme	58
7.1.1. Hazırlanan numuneler.....	58

Sayfa

7.1.2. AlSi7 karışımının serbest köpürme davranışı	59
7.1.3. AlSi14 karışımının serbest köpürme davranışı	62
7.1.4. AlSi14Cu4,5 karışımının serbest köpürme davranışı	64
7.2. Köpüğün Karakterizasyonu.....	67
7.2.1. Gözenek yapıları	68
7.2.2. Köpük duvarlarının mikro yapıları	72
7.2.3. Göreceli yoğunluk ve lineer genleşme	75
7.3. Basma ve Mikro Sertlik Testi	76
7.3.1. Basma testi	76
7.3.2. Mikro sertlik testi.....	80
7.4. Sandviç Köpük Üretimi ve Mikro Yapıları	81
7.5. Sandviç Köpüklerin Basma Testi	87
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	91
KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	100

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Farklı yöntemler ile üretilen metalik köpüklerin ortalama yoğunluk ve hücre boyutları	7
Çizelge 2.2. Alulight firmasının ürettiği sandviç köpüğün bazı özellikleri	9
Çizelge 6.1. Basma testi için hazırlanan numunelerin köpürtme sıcaklık ve süreleri	58
Çizelge 8.1. Farklı alaşımlardaki köpüklerin çeşitli kriterlere göre kıyaslaması	93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Farklı fazların birbiri içerisinde bulunma durumları.....	6
Şekil 2.2. Sandviç yapı örneği.....	8
Şekil 2.3. Yoğun levha ve köpüğün destekli ve desteksiz halleri	9
Şekil 3.1. Metal köpük üretiminin gruplandırılması.....	13
Şekil 3.2. Direkt gaz ilavesi ile sürekli köpüğün üretimi.....	15
Şekil 3.3. Tercih edilebilir oran ve boyuttaki parçacıklar	16
Şekil 3.4. Alporas köpüğün imalat yöntemi.....	17
Şekil 3.5. İlave edilen kalsiyum (Ca) miktarına bağlı olarak karıştırma süresinin viskoziteye etkisi	18
Şekil 3.6. Ergitme temelli FORMGRIP yöntemi ile son şekle yakın metal köpük parçaların üretim aşamaları	20
Şekil 3.7. Toz metalurjisi yöntemi ile metal köpük üretimi.....	22
Şekil 3.8. TM yönteminde boşlukların oluşma ve büyüme evreleri.....	23
Şekil 3.9. IFAM toz metalurjisi işlem basamakları	23
Şekil 3.10. Köpük kararlılığına sınırlayıcı bazı etkenler	25
Şekil 3.11. Doğal bağlanma ile sandviç köpük üretimi	26
Şekil 3.12. Üç tabakalı kompozitin köpürtülmesi ile sandviç köpük üretimi	27
Şekil 3.13. Alüminyum Silisyum faz diyagramı	29
Şekil 3.14. Yapay bağlanma ile sandviç köpük üretimi.....	31
Şekil 4.1. Alüminyum alaşımlı köpükte elektrik iletkenliğinin göreceli yoğunluk ile ilişkisi.....	33
Şekil 4.2. Elektrik alanı kalkan etkisi ve frekans ile ilişkisi (Gözenekli alüminyum (Alulight) ve aynı ağırlıktaki Si-çelik malzeme)	34

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Alulight firmasının çeşitli alaşımlardan ürettiği köpüklerin sıcaklık ve yoğunluğa bağlı termal iletkenlikleri	35
Şekil 4.4. Cam yünü, Alporas köpük (piyasadaki şekli ile) ve %10 deformasyon ile hücre duvarları tahrip edilmiş Alporas köpüğün ses absorbe grafikleri.....	36
Şekil 4.5. Metal ve metal köpüğün şematik gerilme gerinim diyagramı	38
Şekil 4.6. Köpük, tüp ve köpük dolu tüpün basma sıkışma eğrileri. 4 numaralı eğri köpük ve tüpün toplamını vermektedir	39
Şekil 5.1. Metal köpüklerin kullanım alanlarının gözenek ve uygulama türüne göre gruplandırılması.....	40
Şekil 5.2. Alüminyum köpük sandviçlerin uygulama alanları	47
Şekil 7.1. Köpürtme sıcaklık ve süresinin AlSi7 karışımlı köpüğün yoğunluğu üzerine etkisi	61
Şekil 7.2. Köpürtme sıcaklık ve süresinin AlSi14 karışımlı köpüğün yoğunluğuna etkisi	63
Şekil 7.3. Köpürtme sıcaklık ve süresinin AlSi14Cu4,5 karışımlı köpüğün yoğunluğuna etkisi	66
Şekil 7.4. Farklı alaşımlardaki köpüklerin en düşük yoğunluk değerleri ve optik görüntüleri.....	68
Şekil 7.5. Farklı bileşimlerdeki köpüklerin ortalama gözenek boyutu ve ortalama hücre duvar kalınlıkları.....	73
Şekil 7.6. Farklı bileşimdeki köpüklerde köpürtme süresinin lineer genleşmeye etkisi	77
Şekil 7.7. AlSi7 alaşımlı köpüğün basma, yer değiştirme grafiği	78
Şekil 7.8. AlSi14 alaşımlı köpüğün basma, yer değiştirme grafiği	79
Şekil 7.9. AlSi14Cu4,5 köpüğünün basma, yer değiştirme grafiği	79
Şekil 7.10. Farklı bileşimlerdeki köpüklerin ortalama mikro sertlikleri ve plateau yükseklikleri.....	82
Şekil 7.11. Farklı karışımlara sahip sandviç köpüklerde köpürtme süresinin sandviç yüksekliğine etkisi	83

Şekil	Sayfa
Şekil 7.12. AlSi7 alaşımlı sandviç köpüğün basma, yer değiştirme grafiği	89
Şekil 7.13. AlSi14 alaşımlı sandviç köpüğün basma, yer değiştirme grafiği.....	89
Şekil 7.14. AlSi14Cu4,5 alaşımlı sandviç köpüğün basma, yer değiştirme grafiği ...	90

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Doğadaki gözenekli yapılara örnek olarak solda insan omurundan bir kesit ve sağda metal köpük görülmektedir.....	4
Resim 2.2. Köpük örnekleri: (a) açık hücreli M-PORE tarafından hassas döküm ile üretilmiş, (b) kapalı hücreli CYMAT tarafından ergiyiğe gaz ilavesi ile üretilmiş, (c) kapalı hücreli SCHUNK tarafından toz metalurjisi ile üretilmiş	6
Resim 2.3. Farklı metal köpüklerin SEM görüntüleri: (a) M-PORE (X30), (b) CYMAT (X25), (c) SCHUNK (X25).....	7
Resim 3.1. Cymat firmasının gaz ilavesi ile ürettiği köpüğün optik mikroskop resmi (soldaki numune yoğunluğu yaklaşık $0,3 \text{ g/cm}^3$).....	16
Resim 3.2. Alporas köpüğün (TiH_2 ilaveli) gözenek yapısı. Görünen kesitin gerçek boyutu $80 \times 80 \text{ mm}$ 'dir	19
Resim 3.3. Farklı koşullarda hazırlanan alüminyum alaşımlı Formgrip köpüklerin enine kesitleri. Gözeneklilik G, hücre boyutu B' dir. a) $G=\%69$, $B= 1,1 \text{ mm}$ b) $G = \%79$, $B = 1,9 \text{ mm}$ c) $G = \%88$, $B= 3,1 \text{ mm}$	21
Resim 3.4. Toz metalurjisi yöntemi ile kalıpta köpürtülerek üretilen alüminyum köpük parçalar	24
Resim 3.5. Sandviç köpüğün (a) köpürme öncesi ve (b) sonrası fotoğrafları.....	28
Resim 3.6. $\text{AlMg1/ AlSi7/ AlMg1}$ ' den oluşan sandviç köpüğün fırın içerisinde 700°C ' de, 4 farklı zamandaki değişiminin radyoskopik görüntüleri	29
Resim 3.7. Burulma ile şekillendirilmiş üç boyutlu sandviç köpük.....	30
Resim 3.8. Yapay bağlanma ile üretilen sandviç köpüğün eğme testi sonrası görünümü	31
Resim 4.1. İçi boş ve köpük dolu tüplerin kısmi ezilmeden sonraki tam ve kesit resimleri	39
Resim 5.1. (a) Cymat firmasının ürettiği alüminyum köpük ile doldurulmuş alüminyum tüpten oluşan prototip darbe emici ve (b) farklı iki yoğunluktaki Metcomb alüminyum köpüğü esas alan dizayn örneği	41
Resim 5.2. İçerisine Al köpük konularak desteklenmiş süspansiyon parçası	42

Resim	Sayfa
Resim 5.3. İçine Alporas köpük konulmuş kiriş. Parça uzunluğu 1900 mm köpüğün uzunluğu 1580 mm.....	42
Resim 5.4. (a) COMBINO araç sistemi için yapılan darbe enerji emicisi [40] (b) Alüminyum köpüklerin banliyöler için enerji absorbe edici olarak kullanımı gerçek hayattaki kullanımlarının ilk örneklerindendir	43
Resim 5.5. Eğimli parçaların içleri alüminyum köpük konularak desteklenmiş golf takımı taşıyıcısı	44
Resim 5.6. 20 mm' lik alüminyum köpük tabakası kullanılarak üretilen hafif zırh malzemesinin U.S. ordusu için balistik testi sonrası enine kesiti.....	44
Resim 5.7. TM ile yapılan alüminyum köpüğün tasarımları.....	45
Resim 5.8. Metal köpük kaskların ön ve üst darbelere karşı test edilmesi	46
Resim 5.9. Alüminyum sandviç köpük kullanılmış Teupen EURO B25T kaldırıcı kol destekli araç.....	48
Resim 5.10. Arine 65 roketinin AFS den yapılan koni prototipi a) parçanın roketteki konumu b) koninin birleştirilmiş hali c) AFS'nin detay görüntüleri.....	49
Resim 5.11. (a) Alüminyum sandviç köpük tabanlı tavada su kaynatma testi, (b) tabanın ısı iletim prensibi	50
Resim 5.12. Alüminyum sandviç köpükten üretilen bisiklet krank kolu prototipi.....	50
Resim 6.1. Deneylerde kullanılan üç eksenli karıştırıcı	52
Resim 6.2. Sıcak deformasyon sonrası sandviç köpük ön malzemesi.....	54
Resim 7.1. 30X50 mm' lik kalıpta preslenmiş, 3 saat sinterlenmiş ve sonrasında %50 sıcak deforme edilmiş köpürmeye hazır ön malzemeler.....	60
Resim 7.2. AlSi7 köpüklerin farklı sıcaklıklarda ve en düşük yoğunluklardaki makro fotoğrafları.	62
Resim 7.3. AlSi14 köpüklerin farklı sıcaklıklarda ve en düşük yoğunluklardaki makro fotoğrafları.	64
Resim 7.4. AlSi14Cu4,5 köpüklerin farklı sıcaklıklarda ve en düşük yoğunluklardaki makro fotoğrafları.	67
Resim 7.5. AlSi7 alaşımlı köpüğün optik görüntüsü.	70

Resim	Sayfa
Resim 7.6. AlSi14 alaşımlı köpüğün optik görüntüsü.	71
Resim 7.7. AlSi14Cu4,5 alaşımlı köpüğün optik görüntüsü.	72
Resim 7.8. 700°C’ de 12 dakikada üretilen AlSi7 alaşımlı köpükte üç hücrenin kesişim noktasının mikro yapı görüntüsü.	74
Resim 7.9. 640°C’ de 22 dakikada üretilen AlSi14 alaşımlı köpükte üç hücrenin kesişim noktasının mikro yapısı 74	74
Resim 7.10. 640°C’ de 20 dakikada üretilen AlSi14Cu4,5 alaşımlı köpükte üç hücrenin kesişim noktasının mikro yapısı..... 75	75
Resim 7.11. AlSi7 karışım tozu kullanılarak üretilen sandviç köpüğün süreye bağlı olarak değişimi..... 84	84
Resim 7.12. AlSi7 karışımlı köpük kullanılan sandviçte köpük-plaka ara yüzeyi ve köpük malzemenin orta kısımlarından görüntü 85	85
Resim 7.13. AlSi14 karışım tozu kullanılarak üretilen sandviç köpüğün süreye bağlı olarak değişimi..... 86	86
Resim 7.14. AlSi14 karışımlı köpük kullanılan sandviçte köpük-plaka ara yüzeyi. ... 86	86
Resim 7.15. AlSi14Cu4,5 karışım tozu kullanılarak üretilen sandviç köpüğün süreye bağlı olarak değişimi..... 87	87
Resim 7.16. AlSi14Cu4,5 karışımlı köpük kullanılan sandviçte köpük-levha ara yüzeyi. 88	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
ρ^*	Köpük yoğunluğu, g/cm ³
ρ_s	Köpüğün hücre duvarı yoğunluğu, g/cm ³
v_y	Köpüğün havadaki ağırlığı, g
v_s	Köpüğün su içerisindeki ağırlığı, g
p	Köpüğün gözenekliliği
le	Lineer genleşme
h_f	Köpüğün son boyutu, mm
h_0	Köpüğün ilk boyutu, mm
Kısaltmalar	Açıklama
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
AFS	Alüminyum sandviç köpük
IFAM	Fraunhofer malzeme araştırma enstitüsü
T_m	Malzeme ergime sıcaklığı
TM	Toz metalurjisi

1. GİRİŞ

Malzeme bilimi teknoloji ile çift yönlü bir ilişki içerisinde. Teknolojinin ilerlemesi için gelişmiş malzemelere ve malzemelerin geliştirilebilmesi için de ileri teknolojiye ihtiyaç vardır. Yeni malzemeler bu denge sistemi içerisinde ortaya çıkar. Günümüzde bu etkileşimin bir sonucu olarak birçok mühendislik alanında mekanik özelliklerinden ödün vermeyen fakat daha hafif malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç yeni geliştirilen malzemeler ile veya kompozitlerde olduğu gibi mevcut malzemelerin çeşitli kombinasyonlarının üretilmesi ile giderilmektedir. Bu yeni malzemeler içerisinde hafif konstrüksiyon olarak anılan yüksek özgül dayanım (mukavemet/ağırlık) gösteren sandviç malzemeler önemli bir yere sahiptir.

Sandviç yapılar aslında bize çokta yabancı değildir. Yetişmiş ağaçların dalları ve omurgalı hayvan iskeletini oluşturan kemikler köpüğe benzer iç kısımları ve yoğun dış kısımları ile sandviç yapılara iyi bir örnek teşkil ederler. Bu doğal sandviç yapılar oldukça çeşitli ve kompleks yüklemelere maruz kalır ve bu kuvvetlere karşı çeşitli özellikler sergilerler. Örneğin bacağımızdaki kaval kemiği statik ve tekrarlı yüklemelere, yanıl darbe, ani basma yüklemesi ve diğer birçok kuvvete karşı mukavemet gösterir. Dahası bu çeşitli yüklemelere dayanan yapının kuş kemiklerinde olduğu gibi hafifliğinin de çok önemli olduğu yerler olabilir. Genel olarak baktığımızda bu tür yapılarda minimum malzeme kullanılarak maksimum performans, yapısal optimizasyon prensibi görülmektedir [1]. Asıl itibarıyla tabiatın ne kadar mükemmel ve kusursuz bir yapıya sahip olduğunu düşünürsek bu tür malzemelerin üretilmesinin de ne kadar gerekli olduğunu anlayabiliriz.

Sandviç yapılar farklı fiziksel ve / veya kimyasal özelliklere sahip malzemelerin tabakalar halinde bir araya getirilmesi ile elde edilir. Genellikle iki dış tabaka arasına çekirdek denilen ara malzeme yerleştirilerek elde edilir. Bu tür yapılarda sahip olunan toplam mukavemet; tasarım, üretim yöntemi, ara yüzey bağı gibi çeşitli faktörlere bağılı olmakla birlikte çekirdeğin tasarımı ve malzemesi ile yakından ilişkilidir. Çekirdek malzemesi olarak genellikle ahşap (balza ağacı), polimer ve kâğıt (bal peteği) kullanılır. Bu tür malzemelerin oda sıcaklığının çok daha üstündeki

sıcaklıklarda kullanılamama, rutubete dayanıksız ve yanıcı olma gibi bazı olumsuz yanları vardır ve bu olumsuzluklar kullanıldıkları sandviç yapıya da yansır. Bunun yanında sandviç yapı yerine Z, T, I gibi profiller ile desteklenmiş paneller de kullanılabilir. Fakat bu ilaveler ekstra yük ve maliyet oluşturmamanın yanı sıra genelde anizotropik dayanım gösterir ve sadece bir yüzeyleri kullanılabilir. Bunlara alternatif olarak çekirdek malzemesi metal köpük olan sandviç yapılar hem sıcaklık ve rutubete maruz kalınan ortamlarda kullanılabilir hem de iki yüzeyi de şekillendirilebilir ve nispeten daha izotropiktir [2, 3].

Çekirdek malzemesi olarak köpük gibi gözenekli yapıların kullanılması çeşitli avantajlar sağlamakla birlikte gözenekğin şekli ve üretildiği malzeme cinsi oldukça önemlidir ve kullanılacakları ortam dikkate alınarak seçilmelidir. Metal köpükler diğer malzemelerin köpük yapıları ile kıyaslandığında aralarında mekanik ve diğer bazı özellikler açısından farklılıklar vardır. Örneğin; termal ve elektrik iletkenliği, yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikleri polimer köpüklerden çok daha iyidir. Seramik köpüklere göre ise plastik deforme olabilme ve bu sayede enerji absorbe edebilme özelliğine sahiptir. Bu nedenle çoğu alanda metal köpükleri kullanmak doğru bir seçim olarak görülmektedir [4, 5, 6].

Metal köpükler çinko, kurşun, titanyum, çelik gibi çeşitli metal ve alaşımları ile üretilmekle birlikte düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, uygun maliyet ve diğer metallere göre kolay üretilbilirlik gibi birçok üstün avantajları sebebi ile alüminyum ve alaşımları daha fazla tercih edilmektedir [2,7]. Yeni bir mühendislik malzemesi olarak bahsedebileceğimiz alüminyum köpükler ayrıca, iyi darbe direnci, nispeten yüksek rijitlik, yüksek enerji absorpsiyon kapasitesi, karmaşık şekillerde kolay üretimi, iyi aşınma direnci gibi birçok kullanışlı özelliğe de sahiptir. Bu faktörler alüminyum köpüklere ve çekirdek malzemesi olarak kullanıldığı sandviç yapılara geniş bir potansiyel kullanım alanı oluşturmaktadır [4,7,8].

Bu çalışmada çekirdek malzemesi olarak farklı karışım tozlarından üretilen alüminyum alaşımlı köpük ve üst, alt tabaka olarak da ticari saflıkta alüminyum levha kullanılarak alüminyum sandviç köpük (Aluminium Foam Sandwich, AFS)

üretilmeye çalışılmıştır. Bunun için üretim aşamasında toz metalurjisi yöntemi kullanılarak düşük ergime derecesine sahip farklı bileşimlerdeki alüminyum köpük ön malzemeleri hazırlanmış ve bu sayede ara bağlayıcı kullanılmadan sandviç yapı üretimi gerçekleştirilmiştir.

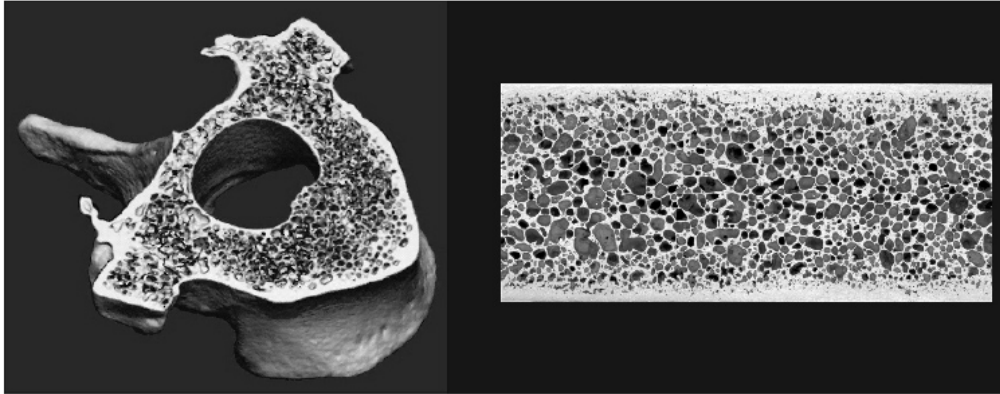
Yapılan deneysel çalışmalardan önce, literatür çalışması olarak sandviç yapılar ve onları doğrudan etkileyen metal ve özellikle alüminyum köpükler hakkında genel bilgi verilmiştir. Alüminyum köpük sandviç yapıların ve metal köpüklerin üretim yöntemleri, fiziksel özellikleri ve bu özelliklere bağlı olarak hali hazırdaki ve potansiyel kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Daha sonra uygulanan deneysel yöntemler ve deneysel sonuçlar ortaya konularak irdelenmiştir.

Sonuç olarak; farklı karışım tozları ile hazırlanmış alüminyum köpükler ve alüminyum levha kullanılarak ara bağlayıcısız sandviç yapı üretilmiştir. Üretilen sandviç yapı ve kullanılan alüminyum köpükler çeşitli yönlerden kıyaslanmış ve kullanılan köpük alaşımları içerisinde sandviç köpük üretimi için hangisinin daha uygun olduğu sonuçları ile ortaya konulmuştur.

2. METAL KÖPÜKLER VE SANDVIÇ YAPILAR

2.1. Metal Köpükler

Doğadaki canlı, cansız tüm yapıların makro veya mikro boyutta birbirinden oldukça farklı malzeme ve tasarımlara sahip olduğu bilinir. İlerleyen teknoloji ve yapılan detaylı incelemeler bu farklılıkların bulundukları yapıya ihtiyaçlarını karşılayacak özgün özellikler kazandırdığı tespit edilmiştir. Örneğin midye kabuğundaki sert yapı küçük tabakalı katmanlar halinde oluştuğundan çatlağın büyümesini engelleyerek darbelerle dayanım kazanır. Timsahın derisi, içerisindeki kolajen protein lifleri sayesinde birçok kesici ve delicinin etkileyemediği bir mukavemete ulaşır. Örümcek ağı, kas yapısı, doğal elmas gibi oldukça çoğaltabileceğimiz bu örnekler mühendislik malzemelerinin tasarımında çalışanları doğayı taklide yönlendirmiştir. Zaten üretilen mühendislik malzemelerinin, doğal malzemelerin özelliklerini taklit etmeleri şaşırtıcı değildir. Aşağıdaki Resim 2.1’de doğal bir yapının ve mühendislik malzemesinin benzerliği açıkça görülmektedir.



Resim 2.1. Doğadaki gözenekli yapılara örnek olarak solda insan omurundan bir kesit ve sağda metal köpük görülmektedir [9]

Gözenekler temel olarak bulundukları yapıya, maruz kaldıkları basma ve çekme gibi çeşitli kuvvetleri absorbe edip bu sayede hasar direncini artırarak ani kırılmalara dayanım özelliği kazandırır. Tabi farklı parçalardaki gözeneklerin şekli ve hacmi ihtiyaçları karşılayacak şekilde değişimler gösterebilir. Metal köpükler de bahsedilen

yapılarda olduğu gibi bünyesinde gözenekler barındırır ve bu sayede doğal malzemelerin sahip olduğu özelliklere benzer özellikler gösterir [10,11].

Tarihsel temelleri yaklaşık 2. Dünya Savaşı'nın sonlarına rastlayan metal köpüklerin ilk üretimi fikir babası olan B. Sosnik tarafından alüminyum ve cıva kullanarak 1943 yılında gerçekleşmiştir. Kapalı bir kap içerisindeki ergimiş metalde buhar fazı ile gözenek oluşturup hızla katılaştırarak metal köpük üretilen bu yöntemde buhar fazını kolayca elde etmek için cıva kullanılmıştır. Metal (alüminyum kullanılmış) içerisinde buharla gözenek oluşturma prensibine dayanan bu yöntem pahalı, kontrolü zor ve daha da önemlisi toksik metal kullanma gibi dezavantajlara sahiptir. 1956'da J.C. Elliot cıva yerine termal ayrışma sonucu gaz üreten köpürtücü madde kullanarak köpüğün üretimini gerçekleştirmiştir. İlk metal köpüklerin üretimindeki başarı ve dikkat çekici özelliklerinin keşfi bu malzemelere karşı ilgi ve heyecan oluşturmuştur. Hatta zamanın bilim adamlarından J. Biorksten 1957 yılında köpük metallerin harika bir satış potansiyeline sahip olduğunu ve 20 yılın içerisinde bütün metallerin %10'unu kapsamasının muhtemel olduğunu belirtmiştir. Bu öngörü o zamanlar için çok iddialı bir demektir ve tabi ki ikinci ifadesi gerçekleşmemiştir. Günümüzde bile metal köpükler birçok mühendisin yabancı olduğu bir malzeme sınıfıdır [2,4].

Metal köpükler genel olarak kapalı gözenekli ve açık gözenekli olmak üzere iki sınıfa ayrılır ve her iki türün de gelişim süreci 50 yılın üzerindedir. Fakat bu geçen zamanın çoğunda önemli bir mühendislik malzemesi gibi akademik merak uyandırmamıştır. 1990'ların ortasında metal köpüklerin geliştirilmesine duyulan ilgi artmış ve buna paralel olarak bu tarihten sonra kullanılabilir üretim yöntemlerinde de önemli bir artış olmuştur. Günümüzde halen araştırma konusu olarak oldukça ilgi çekmekte ve birçok endüstri alanında araştırmaları sürmektedir [12].

Metal köpüklerin fiziksel yapısını tanımlayacak olursak; iki malzeme çeşitli fazlarda birbirini içerisinde çözünmüş bir halde veya çözünmeden bulunması durumunda her karışım farklı olarak isimlendirilir. Şekil 2,1'e bakarak bu karışımların sınıflandırılışı ve köpükler hakkında da fikir sahibi olabiliriz. Örneğin sıvı içerisinde dağılmış gaz karışımı köpük olarak adlandırılır ve buna örnek olarak el sabunlarından oluşan

köpüğü veya kararsız bir konumda da olsa ergiyik haldeki metal köpüğü düşünebiliriz. Katı içerisinde dağılmış gaza ise bahsettiğimiz katı metal köpükler iyi bir örnek teşkil eder [13].

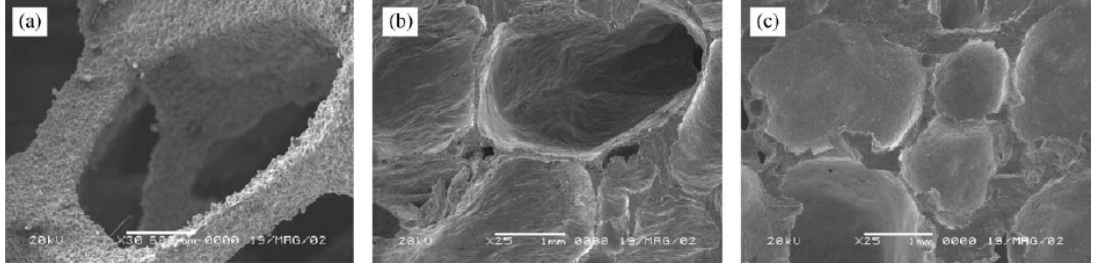
	Gaz	Sıvı	Katı
Gaz İçinde Dağılmış	Gaz Karışımı	Sis	Duman
Sıvı İçinde Dağılmış	Köpük (sabun köpüğü)	Emülsiyon	Jel
Katı İçinde Dağılmış	Katı köpük (metal köpük)	Süspansiyon	Gömülü Parçacık

Şekil 2.1. Farklı fazların birbiri içerisinde bulunma durumları [13]

Tarihsel gelişiminde bahsedildiği gibi metal köpükler hücre duvarlarına bakılarak kapalı gözenekli ve açık gözenekli olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Bu iki sınıf arasındaki temel fark yapı içerisindeki hücre denilen boşlukların etrafının kapalı ya da açık olmasıdır. Resim 2.2 ve Resim 2.3'te bir açık gözenekli ve farklı iki kapalı gözenekli metal köpüğe örnek verilmiştir. Köpüklerin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntülerinin verildiği Resim 2.3'te farkı oluşturan hücre duvarları net bir şekilde görülmektedir.



Resim 2.2. Köpük örnekleri: (a) açık hücreli M-PORE tarafından hassas döküm ile üretilmiş, (b) kapalı hücreli CYMAT tarafından ergiyiğe gaz ilavesi ile üretilmiş, (c) kapalı hücreli SCHUNK tarafından toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş [14]



Resim 2.3. Farklı metal köpüklerin hücre yapılarının SEM görüntüleri: (a) M-PORE (X30), (b) CYMAT (X25), (c) SCHUNK (X25) [14]

Yukarıda bahsedilen gözenekler arasındaki şekilsel farklılıklar bu malzemelerin kendilerine has kullanım alanları oluşturmalarını sağlamıştır. Genellikle filtreleme gibi işlemlerde açık gözenekliler, mukavemet gerektiren yerlerde ise kapalı gözenekliler kullanılmaktadır. Normal yapılarına oranla düşük yoğunluklu olan metal köpüklerin farklı iki grubu arasında da önemli yoğunluk farklılıkları vardır. Beklenildiği gibi açık gözenekli metal köpüklerin yoğunluğu hücre duvarına sahip olmamalarından dolayı daha düşüktür. Tabi bu yoğunluk farklılıkları tercih edilen üretim yöntemine göre değişmektedir. Çizelge 2.1’de farklı yöntemler ile üretilen aynı tür köpüğün yoğunluk farkı görülmektedir.

Çizelge 2.1. Farklı yöntemler ile üretilen metalik köpüklerin ortalama yoğunluk ve hücre boyutları [14]

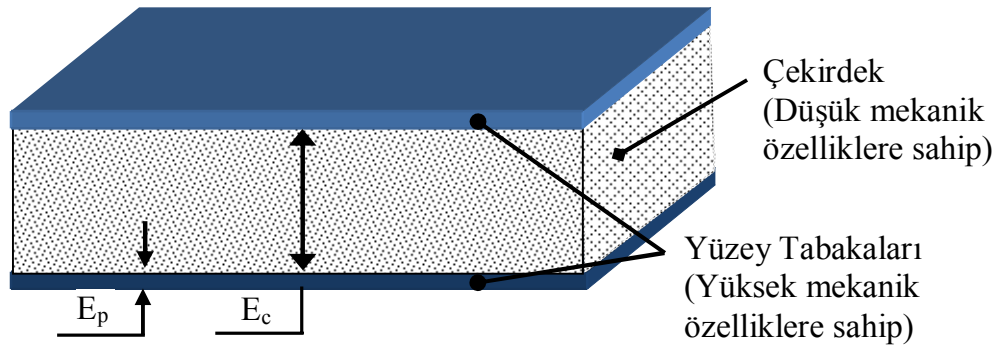
	Genel yoğunluk (g/cm ³)	Ortalama hücre boyutu (mm)	Standart sapma (mm)
M-PORE	0,155	2,42	0,39
CYMAT	0,450	3,87	0,51
SCHUNK	0,580	1,95	0,87

Kısaca özetlenecek olursa metal köpükler tam olarak karakterize edilmemiş, düşük yoğunluklu ve alışılmışın dışında mekanik, termal, elektrik, akustik özellikler barındıran yeni bir malzeme sınıfıdır. Bu malzemeler, enerji absorpsiyonu, ısı kontrolü, yalıtım, hafif yapılar gibi çeşitli alanlarda kullanım potansiyeline sahiptir. Ayrıca geri dönüşümlü olmaları ve toksik özellik içermemelerinden dolayı çevreye

zararları yoktur [2,14, 15].

2.2. Sandviç Yapılar

Genel bir tanım olarak sandviç yapılar, farklı mekanik özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin tabakalar halinde çeşitli yöntemlerle birleştirilerek bir araya getirilmiş halidir (Şekil 2.2). Bu yapılar hafif çekirdek malzemesinin sert iki dış tabaka arasına yerleştirilmesi ile üretilir ve aynı ölçülerdeki yekpare malzemeye göre özgül mukavemeti daha yüksektir. Özgül mukavemetinin sağladığı ağırlık kazancının yanı sıra ses ve ısı yalıtımı, titreşim emme, darbe absorpsiyonu ve daha uzun yorulma ömrü gibi özellikler de barındırabilir [16,17].



Şekil 2.2. Sandviç yapı örneği ($10 \leq E_c / E_p \leq 100$) [18]

Bu yapıların en önemli özellikleri:

- Düşük özgül ağırlık. Örneğin, Roma'da yapımı 1615'te tamamlanan Saint Peter Bazilika kilisesinin 45 metre çapındaki kubbesi 2600 kg/m^2 özgül ağırlığındadır. Aynı yüzey alanına sahip kubbe çelik – poliüretan köpükten (Hanover) yapıldığında ise özgül ağırlığı sadece 33 kg/m^2 dir.
- Yüksek eğilme rijitliği
- Yüksek izolasyon kapasitesi

Aynı çalışmada bu yapıların olumsuz yanları da genel olarak; neme duyarlı olmaları, yanma dirençlerinin düşük olması ve burulma riskinin klasik malzemelerden daha

yüksek olması şeklinde üç maddede sıralanmıştır [18]. İlerleyen yıllar ve teknoloji ile başta metal köpükler olmak üzere geliştirilen yeni çekirdek malzemeleriyle bu yapıların bahsedilen olumsuz yanları nispeten giderilmiştir. Çizelge 2.2’de Alulight® firmasının ürettiği alüminyum köpük çekirdek ve alüminyum yüzey levhasından oluşturulan sandviç kompozitin bazı üretim aralıkları ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.2. Alulight firmasının ürettiği sandviç köpüğün bazı özellikleri [17]

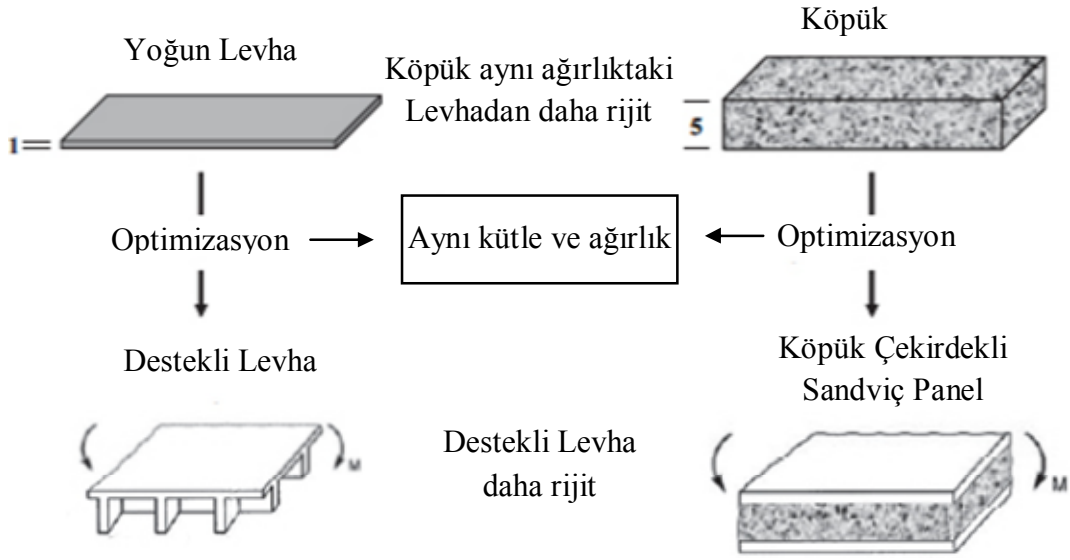
Kalınlık (mm)	9 - 80
Yüzey levhası kalınlığı (mm)	0,65 - 10
Ağırlık (25mm / 1,2 mm yüzey levhası olan panele göre) (kg/m ²)	10,5
Gerilme dayanımı (MPa)	120
Basma dayanımı (çekirdek yoğunluğuna bağlı olarak) (MPa)	4-8
Termal genleşme (1/K)	25*10 ⁻⁶
Termal iletkenlik (W/mK)	10-15

Sandviç yapıların tarihsel gelişimine kısaca baktığımızda 1849 yılında İngiltere North Wales’deki Britannia Tubular köprüsü ile alakalı Fairbairn’in sandviç yapıların prensiplerini ifade eden ilk kişi olduğu rapor edilmiştir. Buradaki sandviç yapı demir levhalar arasına ahşap malzeme konularak iki tarafından perçinlenmesi yöntemini içeriyordu. Von Karman ve Stock gövdesinde sandviç yapı kullandıkları bir planör için 1924’de patent almışlardır. Von Karman’ın öncülüğünde Mautner, kanatlarında sandviç yapı bulunan bir uçak dizayn etmiştir. De Havilland şirketinin baş tasarımcısı Bishop kendinden tahrikli uçaklarda sandviç yapı esaslarını kullanan ilk kişidir. Bu yapıları Comet Racer ve Albatross uçaklarının gövdesinde, ünlü Musquito uçağının kanat ve gövdesinde kullanmıştır [19].

Sandviç teknolojisi yaklaşık 1960’lardan önce, nerdeyse tamamen havacılık uygulamalarıyla sınırlandırılmıştır. Çünkü sandviç yapıların en önemli özelliği yüksek özgül dayanım (mukavemet/ağırlık) oranına sahip malzemeler olmalarıdır.

Bu özellikte bir malzemenin de kullanım alanı olarak ilk akla gelen yeri havacılıktır. Bunun yanında 1960’larda çok sayıda alternatif uygulamalarının keşfedilmesine bağlı olarak bu konudaki araştırmalar daha da artmış ve ilerleme kaydedilmiştir. Zaten ilk başarılı Ay’a çıkışın 1969’da gerçekleşmesi ve bu Apollo uzay aracının kapsülünde sandviç malzeme kullanılması da bunun bir göstergesi niteliğindedir [1]. Zira bu başarı, roket ve bilgisayar biliminin yanı sıra sandviç yapıların da başarısıdır. Sandviç yapıların birçok avantaja sahip olması ve yeni, ihtiyaca uygun malzemeler geliştirilebilmesine imkân vermesi bu yapılara rağbet edilmesini sağlamıştır. Günümüzde sandviç yapılar uydu, havacılık, gemi, otomobil, demiryolu araçları, rüzgâr enerji sistemleri ve kısmen köprü yapıları gibi sıralanan geniş bir uygulama alanında kullanımları hızla artmaktadır [19].

Metal köpükler ve özellikle de alüminyum köpükler daha önce de bahsedildiği gibi alışılmışın dışında ve dikkat çekici özelliklere sahip, pek yeni olmasa da son zamanlarda ilgi uyandıran bir malzeme türüdür. Bu köpükler basit düz şekillerden, hemen hemen istenen her şekilde üretilebilmektedir. Üretim esnasında köpüğün çevresi sınırlandırıldığında dış yüzeylerde kısmen yoğun tabakalar oluşur. Bu tabaka köpüğün mekanik dayanımını artırmanın yanı sıra iç kısımdaki yüksek gözenekli kısmı da korur. Fakat köpüğü koruma ve mekanik dayanımı artırma konusunda çoğu durumda yetersiz kalmaktadır. Bu eksikliği gidermek için köpük iki levha arasına konularak sandviç yapı şeklinde üretilebilmektedir. Uygun tasarlanmış bir sandviç yapı basma, çekme, burulma veya bükülme gibi kuvvetlere karşı çok daha etkili bir şekilde mukavemet gösterebilir [20]. Şekil 2.3’te yoğun levhanın ve köpük malzemenin optimize edilerek mukavemetlendirilmiş ve işlem görmemiş hallerinin mukayesesi görülmektedir.



Şekil 2.3. Yoğun levha ve köpüğün destekli ve desteksiz halleri [20]

Aynı ağırlıktaki köpük ve levha malzeme kıyaslandığında levha malzemenin rijitliği daha düşüktür. Diğer taraftan köpük malzeme sandviç haline getirilerek, plaka levha ise bal peteği ya da kirişle mukavemetlendirilebilir. Bu durumda düzenli mühendislik yapıları (sol) düzensiz köpük (sağ) yapılardan daha dayanıklı hale gelir. Bu bir sürpriz değildir. Çünkü düzenli yapılar uygulanacak yükleme doğrultusunda mukavemetlendirilebilir, hâlbuki metalik köpükler maruz kaldığı kuvvete yönelik tasarıma pek fazla imkân vermeyen statik malzemelerdir. Fakat yaklaşık olarak her yöne benzer performans sergilemesinin avantajları da vardır. Bal peteği şeklindeki bir yapı eğilmelere karşı çok iyi performans sergileyebilir fakat herhangi bir makaslama gerilmesinde başarısızlığa uğrar, hâlbuki köpük her durumda kabul edilebilir bir performans sergiler.

Uygulamalarda sadece sertliğe ya da rijitliğe bakarak malzeme seçimi yapılmaz. Bunların yanında:

- Üç boyutlu malzemelerin üretilebilirliği: AFS ile karmaşık şekillerde üretilebilir.
- Maliyet: İlerleyen teknoloji ile düşürülüyor.
- Hasar toleransı: Mevcut performansını kaybetmeden deforme olabilir.
- Birleştirme tekniklerinin uygulanabilirliği: Kaynak gibi birleştirme teknikleri

uygulanabilir.

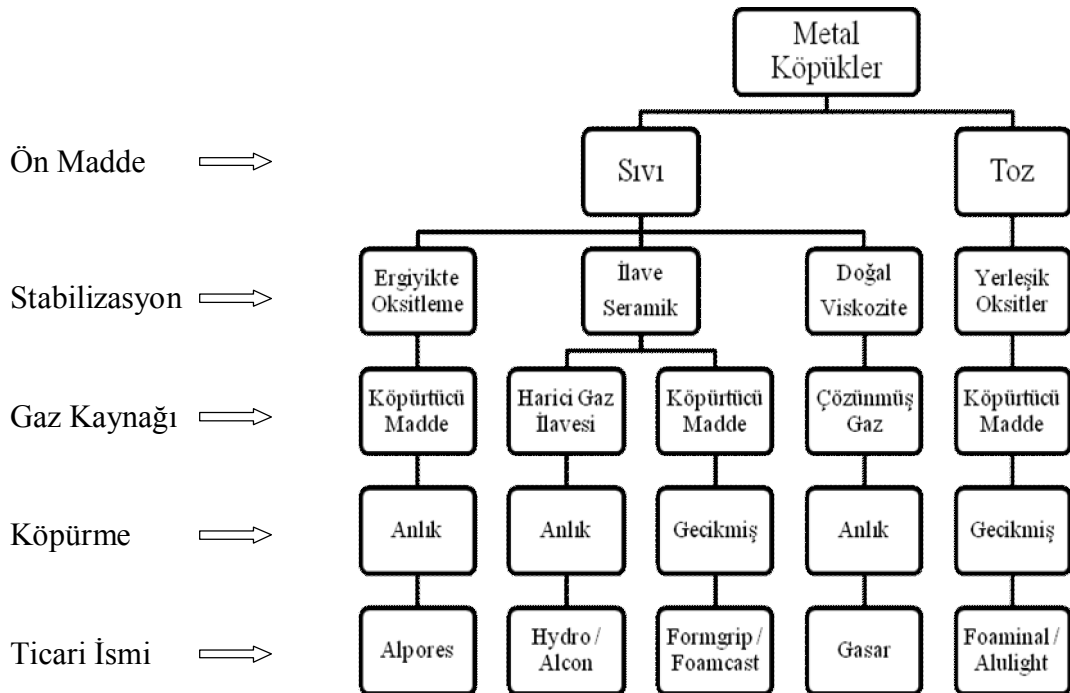
- Sönümleme davranışı: Metal köpüklerden dolayı oldukça iyi.

Bu özelliklerin hepsi hesaba katıldığında AFS'ler için gerçek uygulama alanları belirlenebilir. Alman otomotiv üreticisi Karmann 1996'da AFS'yi temel alan bir konsept otomobil ortaya çıkarmasıyla bu teknolojinin ilk kullanım yeri otomotiv endüstrisi olmuştur. Bunun yanında kullanım alanlarının bahsedildiği beşinci bölümde görüleceği gibi hâlihazırda ve potansiyel birçok uygulama alanına sahiptir [2, 20].

3. ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Metal köpüklerin üretimi eğer ara bağlayıcı kullanılmayacak ise doğrudan kullanıldıkları sandviç yapıların üretimini etkiler. Bu sebeple üretim yöntemlerinin bilinmesi hem sandviç köpüklerin üretimine ışık tutması, hem de yeni sandviç yapı üretim yöntemlerinin geliştirebilmesi bakımından önemlidir. Alüminyum köpük sandviç yapılar genelde köpüğün mekanik özelliklerini geliştirmek için tasarlanmaktadır. Kapalı hücreli köpüklerin mukavemetinin açık gözeneklilerden daha yüksek olmasından dolayı yapılan bu çalışmada kapalı hücreli metal köpük tercih edilmiş ve literatürde de sadece kapalı hücrelilerden bahsedilmiştir.

Metal köpüklere yakın tarihte artan ilgi ile birlikte akademik çalışmaların hız kazandığı ve birçok yeni üretim yönteminin geliştirildiğinden daha önce bahsetmiştik. Bu üretim yöntemleri çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflamalardan bir tanesi aşağıdaki Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Metal köpük üretiminin gruplandırılması [21]

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi köpük üretim yöntemleri köpürmeye hazır ön malzemenin üretim yöntemine göre sıvı ve gaz olarak ikiye ayrılmıştır. Daha sonra sıvı fazda köpürtme yöntemi viskozite kontrolü için kullanılan stabilizasyon yöntemlerine göre üç gruba ayrılır. Daha sonra köpürmeyi sağlayan gaz kaynağına göre de tekrar ayrılır. Bunların yanı sıra tüm yöntemlerdeki köpürme işleminin zamanı ve üretilen köpüklerin ticari isimleri de verilmiştir.

3.1. Sıvı Metalurji

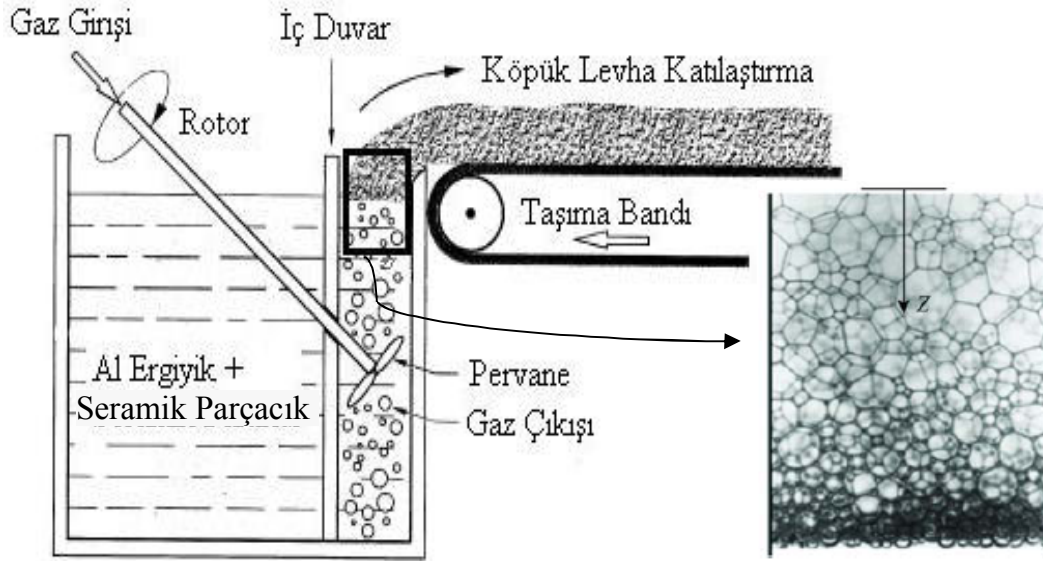
Metal köpük üretim yöntemlerinden bir tanesi sıvı metalurjisi yöntemidir. Bu yöntem izlenen üretim yoluna göre farklı isimlerde sınıflandırılmış ve çeşitli kullanım alanları bulmuştur. Toz metalurjisi yöntemi ile kıyaslandığında en büyük avantajı genel olarak büyük boyutlarda köpük üretimine imkân tanımasıdır. Bunun yanında ileriki alt başlıklarda da görüleceği gibi geliştirilen her yöntemin kendine has avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

3.1.1. Doğrudan gaz ilavesi ile köpük üretimi

Ergiyiğe doğrudan gaz ilavesi ile metalik köpük üretim yöntemi 1980 ve 1990’ların sonlarında eş zamanlı ve birbirinden bağımsız olarak Kanada’daki Alcan ve Norveç’teki Norsk Hydro firmaları tarafından geliştirilmiştir [22]. Üretim aşamasında temel olarak önce ergiyiğin viskozitesi artırılır ve daha sonra ergiyiğe dışarıdan gaz ilave edilir. İlave gaz ile oluşan gözenekler yukarıya doğru yükselirken bir yandan azalan basınçla büyür bir yandan da soğumadan dolayı artan viskozite sebebi ile kararlı faza geçer. Son olarak kısmen katılaştan metalik köpük taşıma bantları ile taşınırken tamamen katılaşır ve istenen boyutlarda kesilir [13,23].

Bu yöntem metal köpük üretiminde kullanılan en basit yöntemlerden biridir. Yöntemin en büyük avantajlarından birisi geniş boyutta ve düşük maliyette köpük üretimine imkân sağlamasıdır. En önemli eksikliği ise saf metallere uygulanabilirliğinin zorluğudur. Çünkü ilave edilen gaz (CO_2 , O_2 veya hava) katı fazda köpük oluşumundan önce ergiyik metal yapıyı terk eder. Bunu engellemek için

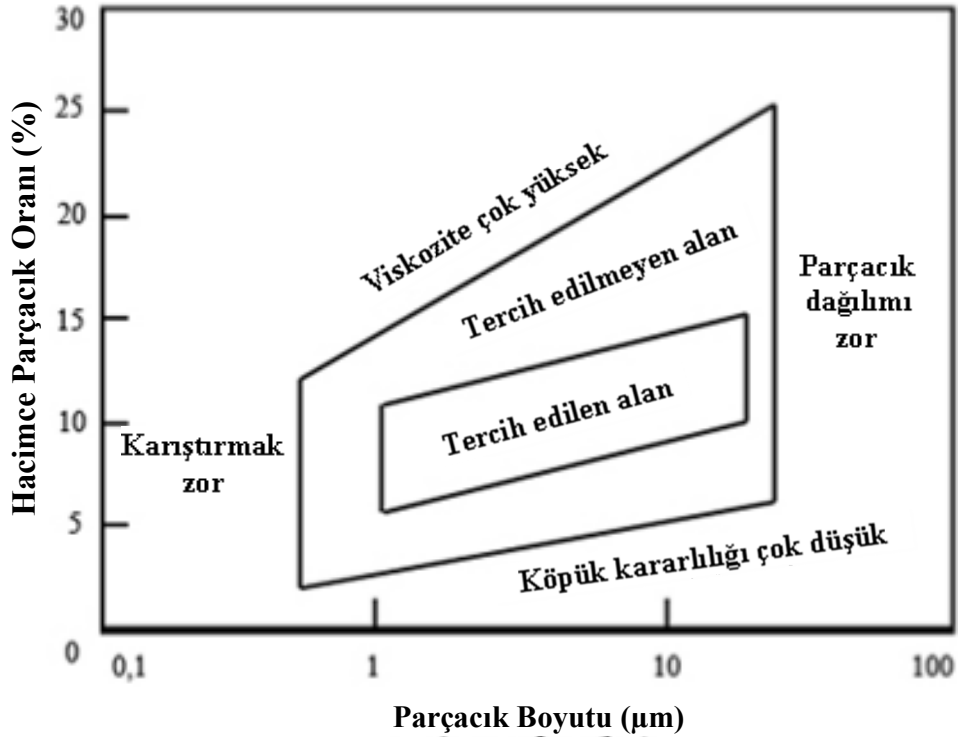
ergiyiğe alümina (Al_2O_3), zirkonyum dioksit (ZrO_2) ve silisyum karbür (SiC) gibi seramik parçacıklar ilave etmek gerekir. Ayrıca bu yöntem günümüzde sadece alüminyum köpük üretimi ile sınırlıdır [2]. Aşağıda uygulamanın şekli (Şekil 3.2) şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.2. Direkt gaz ilavesi ile sürekli köpüğün üretimi [13, 23]

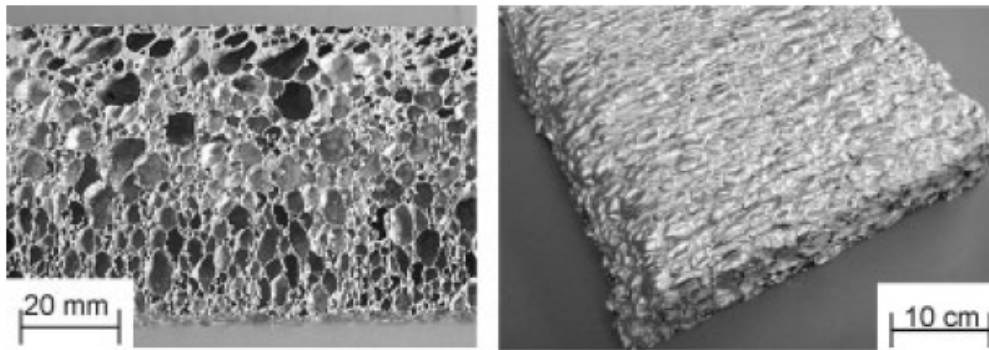
İlave edilen seramik parçacıklar sahip oldukları uygun ara yüzey enerjisi ile hücre duvarlarının kararlılığını artırmaya ve birleşmelerini engellemeye yardımcı olarak oluşan gaz kabarcıklarının tutulmasını sağlar. Aynı zamanda ergiyiğin viskozitesini artırarak ergiyiğin içerisinde yükselen gözeneklerin hızını azaltır. Ayrıca yükselen gözeneklerin kinetik enerjisini azalttığından dolayı köpük malzeme dışarıya çıkarken oluşabilecek mekanik kopmaları engeller. Oluşan köpük sıvı fazda taşıma bandı ile uzaklaştırılırken katılaştırılır ve soğutulur. Köpüğün yoğunluğu genellikle pervane hızı, gaz akısı, ergiyikteki ilave parçacık (miktar ve boyut) ve son olarak katılma koşulları gibi üretim parametreleri ile kontrol edilebilir [22].

Ortalama parçacık boyutu 5 – 20 μm olan takviye parçacıkları genellikle hacimce % 10 - 20 arası çeşitli oranlarda katılır. Parçacık oranı ve boyutunun seçimi deneysel çalışmalar göz önüne alınarak gerçekleştirilebilir. Katılan parçacığın boyut ve oranına bağlı olarak gerçekleşen değişim Şekil 3.3'te gösterilmiştir [24].



Şekil 3.3. Tercih edilebilir oran ve boyuttaki parçacıklar [24]

Üretim kolaylığı sayesinde Cymat firması bu yöntemle 25–150 mm kalınlık aralığında 1,5 m genişliğinde tek parça halinde ortalama 900 kg / h ile köpük paneller üretmektedir. Bu veriler gerçekten basit ve uygulanabilir bir yöntem olduğunun göstergesidir [22]. Resim 3.1’de firmanın ürettiği alüminyum köpük görülmektedir.



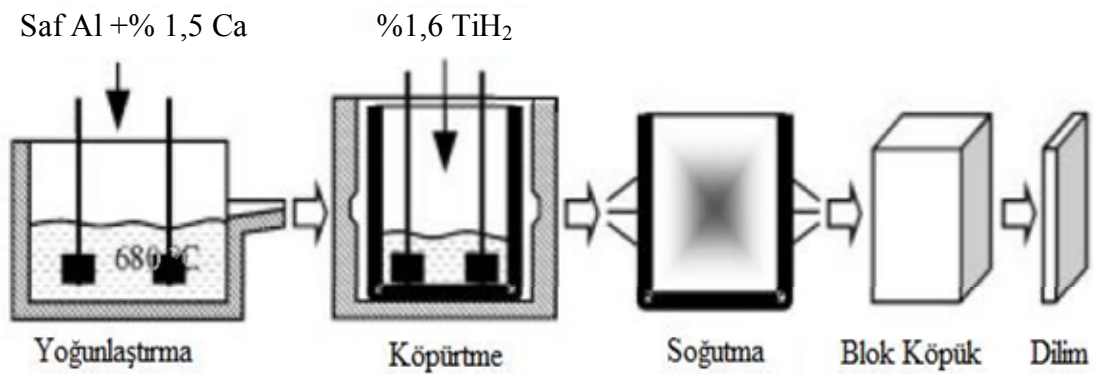
Resim 3.1. Cymat firmasının gaz ilavesi ile ürettiği köpüğün optik mikroskop resmi (soldaki numune yoğunluğu yaklaşık 0,3 g/cm³) [22]

3.1.2. Köpürtücü madde kullanarak köpük üretimi

Bu yöntemde ergiyik metale doğrudan gaz ilavesinin yerine, oda sıcaklığında kararlı fakat köpürecek malzemenin ergimesine yakın sıcaklıklarda kimyasal ayrışma ile gaz oluşturan toz halindeki parçacıklar kullanılır. Ticari olarak genellikle titanyum hidrür (TiH_2) köpürtücü madde olarak kullanılmakla birlikte zirkonyum hidrür (ZrH_2), kalsiyum karbonat (CaCO_3) da kullanılmaktadır [13, 25].

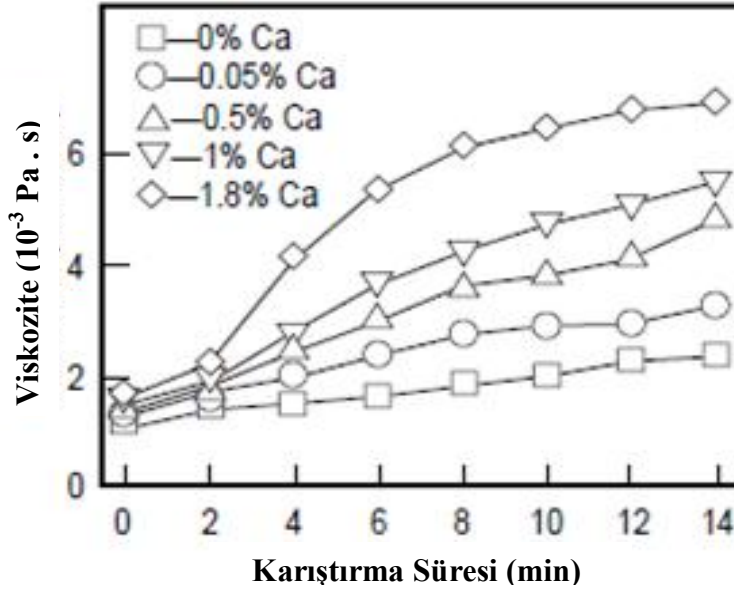
Shinko Wire Yöntemi:

Alporas ismi ile anılan bu parça döküm yönteminin patenti Japon Shinko Wire Ltd. Şirketi tarafından alınmıştır. Kurulan fabrikada büyük hacimde köpürmüş alüminyum bloklar üretilebilmektedir. Bu yöntemde sıvı köpüğün çökmelere karşı kararlı olarak kalabilmesi için ergiyiğe kalsiyum, magnezyum gibi reaktif alaşım elementleri katılır. Bu katılan alaşım elementlerinin oksijene ilgileri yüksektir ve bu nedenle ergiyik içerisinde çeşitli oksitler oluşturarak (CaO , Al_2O_3 , CaAl_2O_4 v.b.) viskozitenin yükselmesini sağlar [13,22]. Yöntemin üretim şeması aşağıdaki şekilde (Şekil 3.4) görülmektedir.



Şekil 3.4. Alporas köpüğün imalat yöntemi [22]

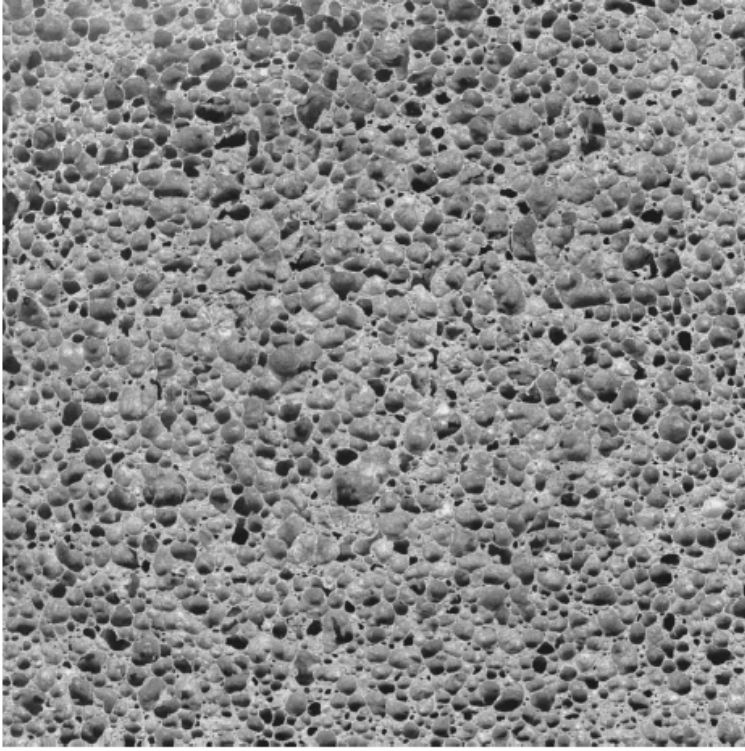
Köpüğün üretiminde ilk olarak viskoziteyi artırmak için atmosfer ortamında $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ısıtılan ergiyiğe ağırlıkça % 1,5 Ca ilave edilerek 6 dakika boyunca karıştırılır. İlave edilen Ca miktarının ve karıştırma süresinin etkisi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. İlave edilen kalsiyum (Ca) miktarına bağlı olarak karıştırma süresinin viskoziteye etkisi [24]

Bu karışım sonrasında bahsedilen oksitler oluşturularak viskozite artırılır ve uygun yoğunluğa ulaşan ergiyeğin içerisine ağırlıkça %1,6 TiH_2 ilave edilir ($680^{\circ}C$ 'de). Etkili bir şekilde devam edilen karıştırma H_2 gazı ayrışmaya başladığında kesilir ve ergiyik metalin köpürerek kapalı kabı doldurması beklenir. Oluşan köpük hızla soğutularak kalıptan çıkarılır ve böylece kararlı yapıdaki katı köpük elde edilmiş olur. Üretilen köpük bloğu 450 mm genişliğinde, 2050 mm uzunluğunda, 650 mm yüksekliğinde ve yaklaşık 160 kg ağırlığındadır. Blok genellikle 5 – 250 mm kalınlık aralığında ihtiyaç duyulan kalınlıklarda (standart kalınlık 10 mm) tabakalar şeklinde dilimlenir [13,22].

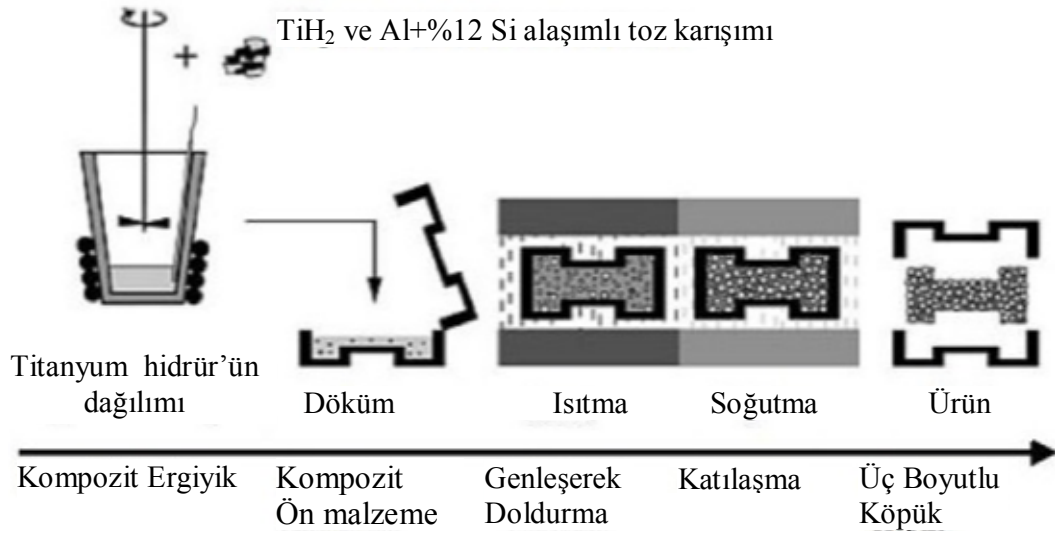
Alporas kapalı hücreli yapısı ile çok hafif bir malzemedir. Ürünün yoğunluğu $0,18 - 0,24 \text{ g/cm}^3$ arasındadır ve ortalama hücre boyutu yaklaşık 4,5 mm'dir. Gözenek yapısı yönünden piyasada satılan en iyi alüminyum köpük olduğundan bahsedilmektedir. İşlem sonrasında oluşan gözeneklerin çoğu Resim 3.2'de görüldüğü gibi eş eksenlilikten uzaktır. Fakat toplam homojenliği diğer ticari alüminyum köpüklerden yüksektir [22, 26].



Resim 3.2. Alporas köpüğün (TiH_2 ilaveli) gözenek yapısı. Görünen kesitin gerçek boyutu 80x80 mm'dir [13]

Formgrip Yöntemi:

Formgrip (Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors) yöntemi sıvı ve toz metalurjisi üretim yöntemlerinin bazı olumlu yanlarının birleştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde toz metalurjisine çok benzer bir şekilde köpürtücü madde (TiH_2) içeren ön malzeme (precursor) bir kalıbın içerisinde ısıtılarak köpük elde edilir. Aynı zamanda ön malzemenin ergitme işlemi ile elde edilmesi yönünden sıvı metalurjisi yöntemlerine benzemektedir. Sonuçta hem tozların karışımı, preslenmesi, sinterlenmesi ve deformasyonu gibi işlemlere gerek kalmamış hem de toz metalurjisi yönteminin en önemli avantajlarından biri olan istenen şekilde köpük üretimine imkân tanınmıştır. Ayrıca diğer sıvı metalurjisi üretimlerinde olduğu gibi süreklilik gerektirmemektedir. İşlem basamakları Şekil 3.6'da verilmiştir.

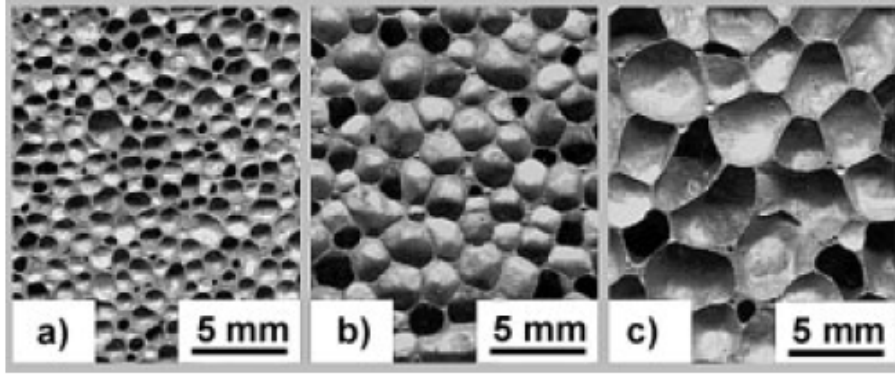


Şekil 3.6. Ergitme temelli FORMGRIP yöntemi ile son şekle yakın metal köpük parçaların üretim aşamaları [27]

Köpürebilir ön malzeme hazırlamak için; AlSi12 karışımına gaz sağlayıcı olarak toz haldeki TiH₂ ve viskoziteyi kontrol için SiC parçacıkları (parçacık boyutu 12,8 µm) ilave edilerek mekanik karıştırıcılar ile 1200 rpm'de karıştırılır. Kullanılan TiH₂ parçacıklar daha öncesinde ısıtılma tabi tutularak yüzeylerinde difüzyon bariyeri oluşturulur ve bu sayede ergiyik içerisinde köpürme öncesi reaksiyona girip gaz ayrışması engellenir. Köpürtücü maddeye ısıtılma işlemi olarak iki basamaklı bir termal oksidasyon (400 °C'de 24 h + 500 °C'de 1 h) uygulanır. Bu işlem TiH₂'ün hidrojen konsantrasyonunu çok az miktarda düşürür. Üretim esnasındaki en önemli nokta köpürtücü maddeden sınırlı miktarda gaz ayrışmasının sağlanmasıdır. Bunun için TiH₂ katılırken, ergiyik düşük sıcaklıkta (T = 620 °C) tutulur. Ayrıca katılan SiC parçacıkları ve ön oksitleme ile yüksek bir viskozite elde edilerek köpürtücü madde yavaşlatılabilir [22, 27].

Elde edilen karışım bir kalıba dökülerek soğutulur ve bu sayede gözenek oluşumu ve büyümesi durdurulmuş olur. Daha sonra kapalı kalıptaki ön malzeme ergime derecesinin üstünde bir sıcaklığa ısıtılır ve sıcaklıkla birlikte TiH₂'den ayrılan H₂ gazı ile oluşan köpük kalıbı doldurur. Son olarak oluşan sıvı köpük soğutulur ve üç boyutlu son şekle yakın köpük elde edilir. Elde edilen köpüğün göreceli yoğunluğu (ρ_p / ρ_s) 0,1 – 0,3 ve hücre boyutu da 2 – 8 mm arasındadır. Oluşan köpüğün farklı

boyutta gözeneklere sahip görüntüleri Resim 3.3'te verilmiştir. Resimlerde köpüğün hücre boyutu arttıkça gözenekliliğinin de arttığı açıkça görülmektedir.



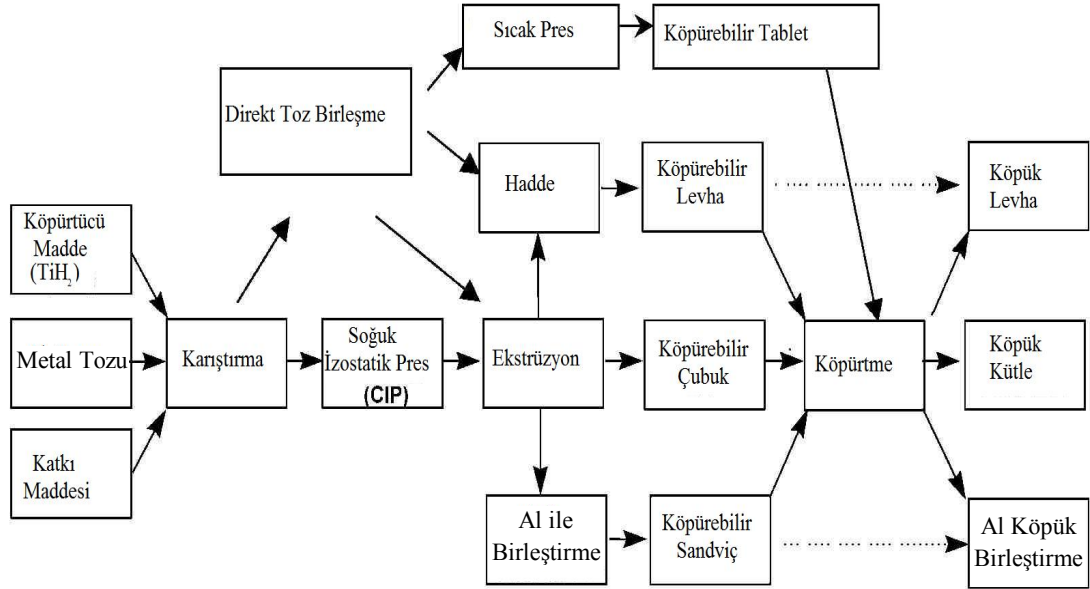
Resim 3.3. Farklı koşullarda hazırlanan alüminyum alaşımlı Formgrip köpüklerinin enine kesitleri. Gözeneklilik G, hücre boyutu B'dir. a) $G=69\%$, $B= 1,1$ mm b) $G = 79\%$, $B = 1,9$ mm c) $G = 88\%$, $B= 3,1$ mm [22]

Formgrip yönteminin geometrik şekillerde üretime ve aynı zamanda mikro yapı kontrolüne imkân verdiğini göz önüne alındığında Shinko Wire yönteminden üstün gözükmektedir. Ayrıca birbirinden bağımsız ve haliyle süresiz olan işlem basamakları üretim maliyetine olumlu katkılar sağlamaktadır [22].

3.2. Toz Metalurjisi

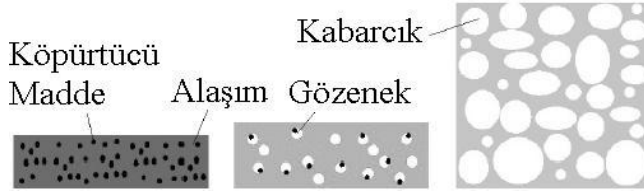
Basit olarak toz metalurjisi yöntemi olarak anılan bu yöntem kendine has bir terim olarak sıkıştırılmış tozların köpürtme yöntemi olarak da anılmaktadır. Diğer bahsedilen yöntemlerden temel farkı köpürtülecek malzemenin ergitme yöntemleri kullanılmadan hazırlanmasıdır. Yöntemin popülerliği geçtiğimiz beş yılda giderek artmıştır ve şu anda endüstriyel uygulama seviyesindedir [8]. Ayrıca uygulanabilirliği sadece alüminyum ve alaşımları ile sınırlı değildir. Uygun köpürtücü madde ve üretim parametreleri seçildiğinde kalay, kurşun, altın ve diğer bazı metal ve alaşımları da bu yöntem ile köpürtülebilir. Saf alüminyum ve 2xxx, 6xxx gibi alaşımları köpük üretiminde en fazla kullanılan malzemelerdir. Ayrıca AlSi7Mg, AlSi12 gibi döküm alaşımları da içeriğindeki ergime sıcaklığını düşürücü alaşım elementleri sebebi ile tercih edilir. Üretim parametrelerine dikkat edildiği

takdirde diğer alaşım elementleri de kullanılabilir [8]. Aşağıdaki Şekil 3.7’de yöntemin birkaç alternatifli akış şeması görülmektedir.



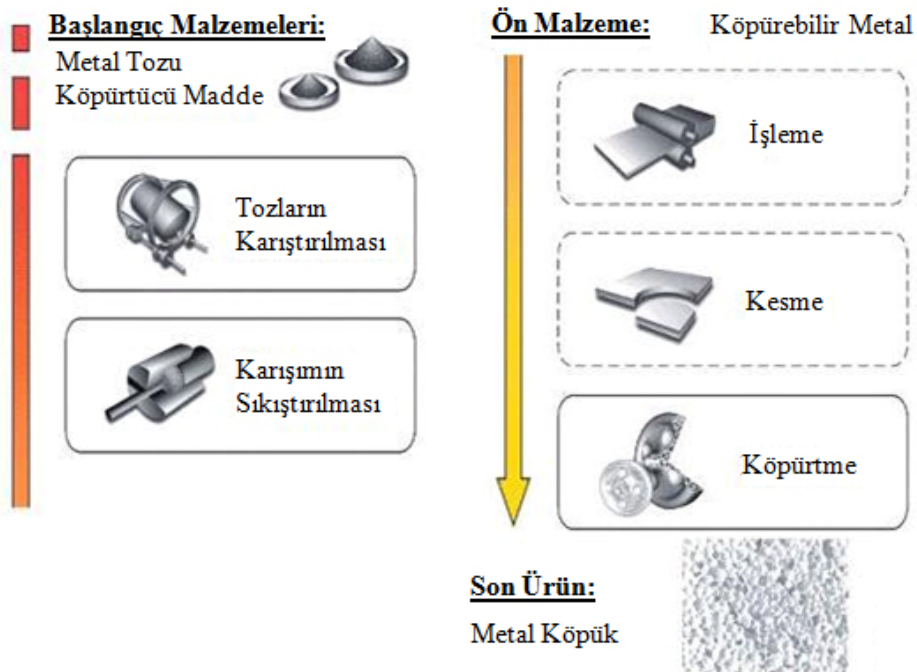
Şekil 3.7. Toz metalurjisi yöntemi ile metal köpük üretimi [22]

İşlem basamakları olarak öncelikle köpürtülecek metal veya alaşımı (Al veya Al + Si, Mg, Cu vs.) uygun köpürtücü madde (TiH_2 , CaCO_3 , v.b.) ile karıştırılır. Burada dikkat edilecek nokta köpürtücü maddenin kimyasal ayrışma sıcaklığının köpürtülecek alaşımın ergime sıcaklığına yakın olmasıdır. Köpük üretiminin endüstriyel uygulamalarında köpürtücü madde olarak genellikle kullanılan TiH_2 , ağırlıkça % 0,5 – 0,6 oranlarında katılmaktadır [28]. Daha sonra elde elden karışım sıcak veya soğuk presleme, ekstrüzyon, toz haddeleme gibi çeşitli işlemlerle köpürebilir ön malzeme denilen yoğun blok haline getirilir. Daha sonra fırın içerisine yerleştirilen blok numune bir yandan ergime sıcaklığına yaklaşır, diğer yandan TiH_2 tozları H_2 gazı ve Ti olarak ayrışarak etrafında ufak gözenekler oluşturmaya başlar. Sıcaklık arttıkça gözenek boyutları da bir noktaya kadar sürekli artar (Şekil 3.8). Yeterince köpüren malzeme hızla soğutulurak kararlı hale getirilmesi ile metal köpük elde edilir.



Şekil 3.8. TM yönteminde boşlukların oluşma ve büyüme evreleri [29]

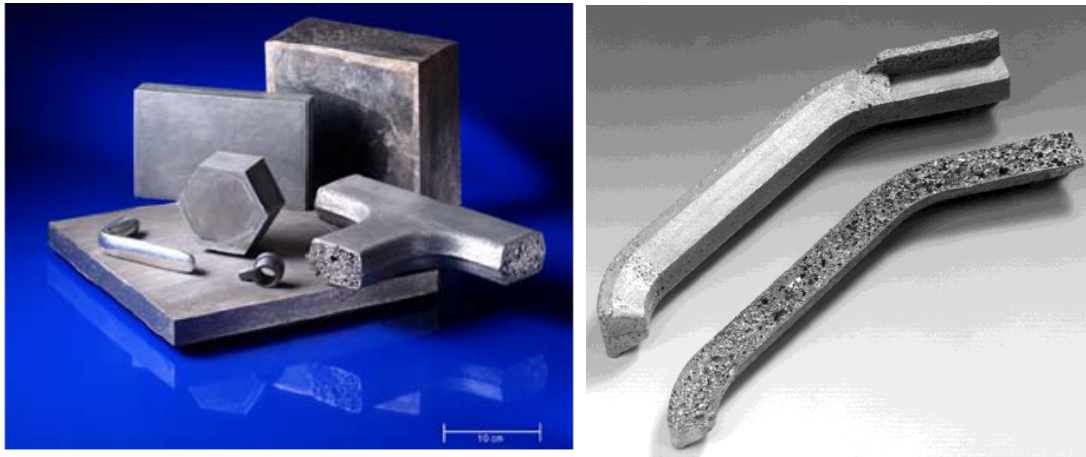
Kimyasal ayrışma ile gaz üreten köpürtücü madde kullanımı, doğrudan gaz ilavesine göre son hücre yapısı üzerinde daha iyi kontrol edilebilmesini sağlar. Köpürebilir ön malzeme içinde oluşan gazları geçirmeyen bir yapıda yani basitçe karışım tozlarının birbirine kaynaşması ile elde edilir. Çeşitli toz sıkıştırma yöntemleri yukarıdaki şekilde (Bkz. Şekil 3.7) gösterilmiştir. Şekil 3.9'da metal köpüklere olan ilginin hızla büyümesinde ön ayak olan IFAM'ın kullandığı toz metalurjisi yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.9. IFAM toz metalurjisi işlem basamakları [30]

Üretim şemasındaki toz karıştırma, sıkıştırma, işleme gibi bazı işlem basamakları çeşitlilik gösterebilir. Ayrıca duruma göre işleme ve kesme işlem basamakları

kaldırılabilir. Bu yöntem ile köpürtülecek ön malzeme karmaşık şekil verilmiş kalıplar içerisinde köpürtülerek oldukça çeşitli şekillerde köpükler elde edilebilir. Bunun için köpürmeye hazır ön malzeme şekil verilmiş bir kalıp içerisinde ergime derecesine kadar ısıtılarak köpük oluşturulur. Sonrasında kalıp soğutulur ve köpürmüş numune kalıptan çıkarılarak şekil verilmiş köpükler (Resim 3.4) elde edilir. Ayrıca bu yöntemde bağlayıcı madde kullanılmadan ön malzemenin ergimesi esnasında köpükler birbirine bağlanılabilir [30].



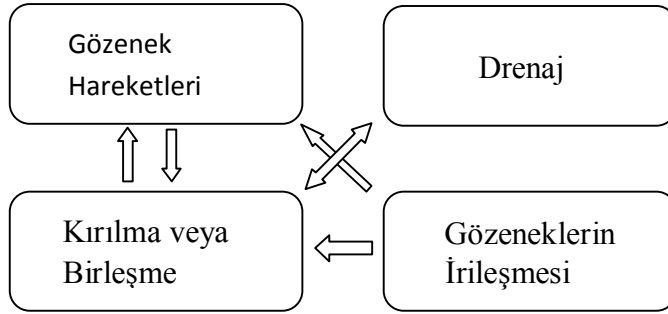
Resim 3.4. Toz metalurjisi yöntemi ile kalıpta köpürtülerek üretilen alüminyum köpük parçalar [9,30]

Köpüğün yapısındaki değişim Şekil 3.10'da gösterilen ve aşağıda belirtilen terimlere göre sınıflandırılabilir [28,29] ;

- Gözenek hareketleri: Köpürme esnasında dış kuvvetlerin etkisi veya iç gaz basıncının değişimi gibi faktörlerin sebep olduğu gözeneklerin birbirine göre hareketleri
- Drenaj: Ergimiş metalin yüzey gerilimi etkisi ile hücre duvarlarından hücre kenarlarına akması ve devamında kapiler etki ve yerçekiminin etkisi ile Plateau sınırları (üç köpük filminin kesişimi) boyunca aşağıya doğru akmasıdır ki köpüklerin alt kısmındaki kalın tabaka genellikle bu etki ile oluşur.
- Kırılma veya birleşme: Bir köpük duvarının kaybolmasına yol açan ani bir kararsızlıktır. Bu mekanizma iki gözenegın birleşip büyük bir tane oluşturması

ile sonuçlanır.

- Gözeneklerin irileşmesi: Gazın küçük gözenekten büyüğüne doğru basınç farkı ile yavaşça difüzyonu. Gözenek oluşumundaki etkileşim aşağıdaki şekilde (Şekil 3.10) sembolize edilmiştir.



Şekil 3.10. Köpük kararlılığına sınırlayıcı bazı etkenler [29]

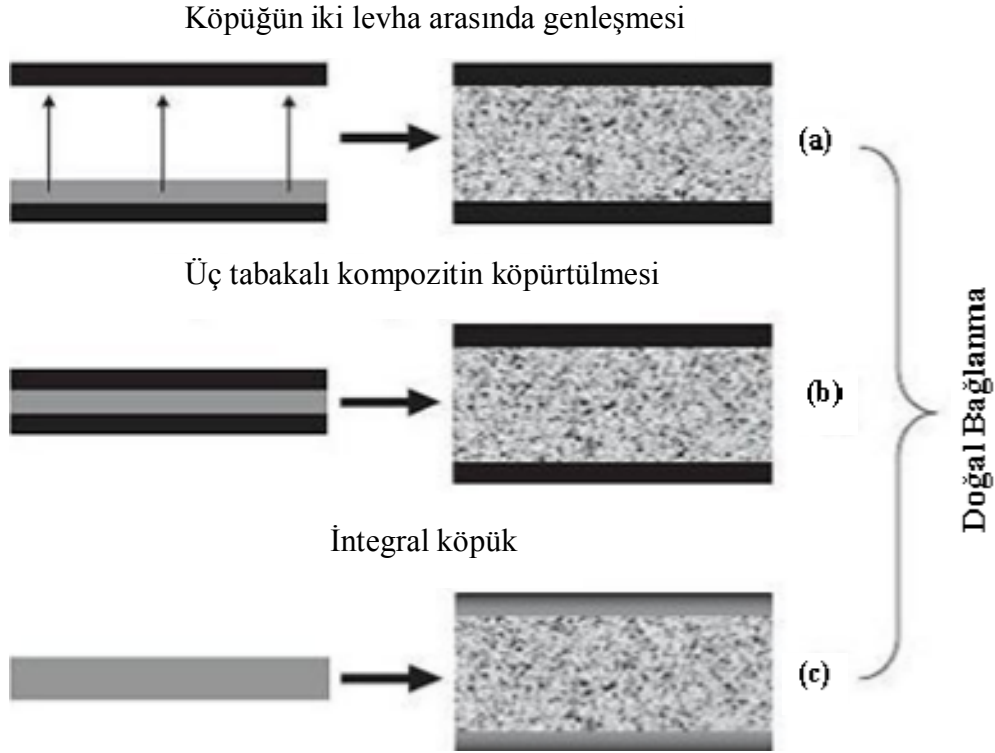
3.3. Alüminyum Sandviç Köpük Üretimi

Metal köpüklerden sandviç yapı üretiminde yüzey levhaları köpüğe çeşitli yöntemlerle bağlanabilmektedir. Bu yöntemler köpüğün türüne ve üretim yöntemine göre değişmektedir. Alüminyum köpük kullanarak sandviç yapı üretimi, bağlanma mekanizmaları yönünden temel olarak doğal bağlanma (in-situ bonding) ve yapay bağlanma (ex-situ bonding) olarak ikiye ayrılabilir [20,31].

3.3.2. Doğal bağlanma yöntemi

Yapay bağlanma ile sandviç üretimine alternatif olarak geliştirilen bu yöntem diğer yöntemin bahsedilen olumsuz yanlarının bazılarını ortadan kaldırmaktadır. Bunun yanı sıra metalik bağ sayesinde yapıştırıcılara oranla ısı hassasiyeti azaldığından, yapılarda alev almayan ısı direnç duvarı şeklinde yeni kullanım alanları da oluşturmuştur. Bu uygulamalarda temel mantık metal köpük oluşurken sandviç yapı da oluşur. Yani köpürtme sonrası fazladan bir işleme gerek duyulmaz. Onun yerine uygulanan yöntemle göre köpürtme öncesi bazı ön işlemler yapılır. Yöntemin en önemli dezavantajı alaşım kombinasyonunun sınırlı olmasıdır. Aynı zamanda yüzey

plakaları ergimeden köpüğün tam manası ile genişlemesi için zaman ile yarışılmaktadır [31]. Şekil 3.11’de doğal bağlanma ile köpük sandviç üretiminin çeşitli yöntemleri şematik olarak verilmiştir.



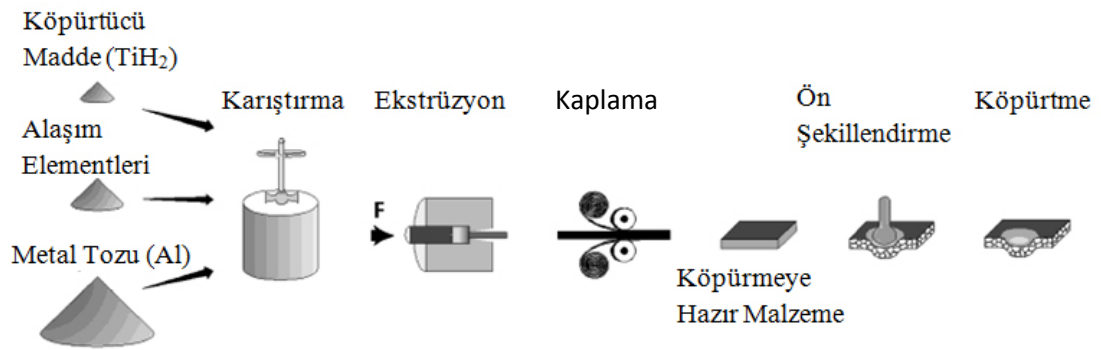
Şekil 3.11. Doğal bağlanma ile sandviç köpük üretimi [20]

Köpüğün iki levha arasında genişlemesi (Şekil 3.11.a) ile sandviç üretiminde, köpürmeye hazır ön malzeme iki sabit levha arasına yerleştirilir ve köpürtme işlemi yapılır. Köpürerek aradaki boşluğu dolduran köpük, yüzey plakalarına difüze olarak birleşir. Ancak bu işlemde iki yüzey levhası ve köpükteki oksit tabakası düzgün bir metalik bağ oluşumunda zorluklara yol açmaktadır. Köpürtme öncesi yüzeyler temizlense bile köpürtme esnasında da oksitlenmeye karşı korunması gerekir. Ayrıca ısı, köpüğe levhalar üzerinden iletiildiği için yüzey levhalarının ergime ihtimali vardır ve bu da sıcaklık kontrolünü zorlaştırır. Bu gibi sebepler ile bu yöntem tam olarak uygulamaya geçmemiş deneysel bir yaklaşımdır [20].

İntegral köpük kullanarak (Şekil 3.11.c) AFS üretimi kullanılabilecek diğer bir

yöntemdir. Köpürmeye hazır ön malzeme hazırlama işlemlerinde değişiklikler yaparak herhangi bir yoğun levha kullanmadan yoğun yüzey tabakaları oluşturma prensibine dayanır. Bu yöntem toz metalurjisi ile üretimde köpürmeyen toz karışımı tabakası, köpüreabilen toz karışımı ve yine köpürmeyen toz karışım tabakasının bir arada yoğunlaştırılıp sonra köpürtülmesi olarak düşünülebilir. Fakat böyle bir yaklaşımın ne kadar uygulanabilir ve ihtiyaçları karşılayabilir olduğu şüphelidir [20].

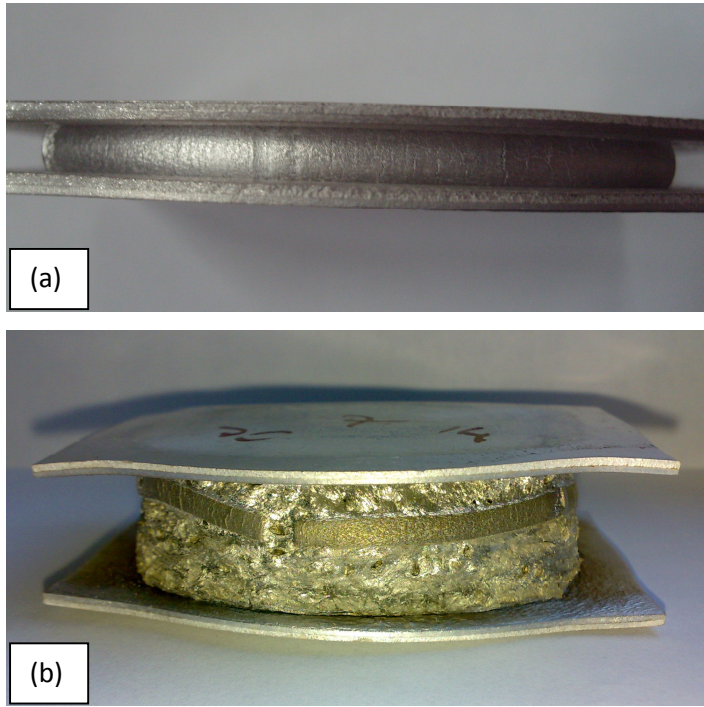
Son olarak üç tabakalı kompozitin köpürtülmesi ile sandviç üretimi (Şekil 3.11.b) 1992’ de Fraunhofer enstitüsünde geliştirilmiştir [32]. Bu yöntemin uygulanabilirliği diğer yöntemlere göre oldukça iyidir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.12) bu yöntem ile sandviç köpük üretiminin şeması verilmiştir.



Şekil 3.12. Üç tabakalı kompozitin köpürtülmesi ile sandviç köpük üretimi [31]

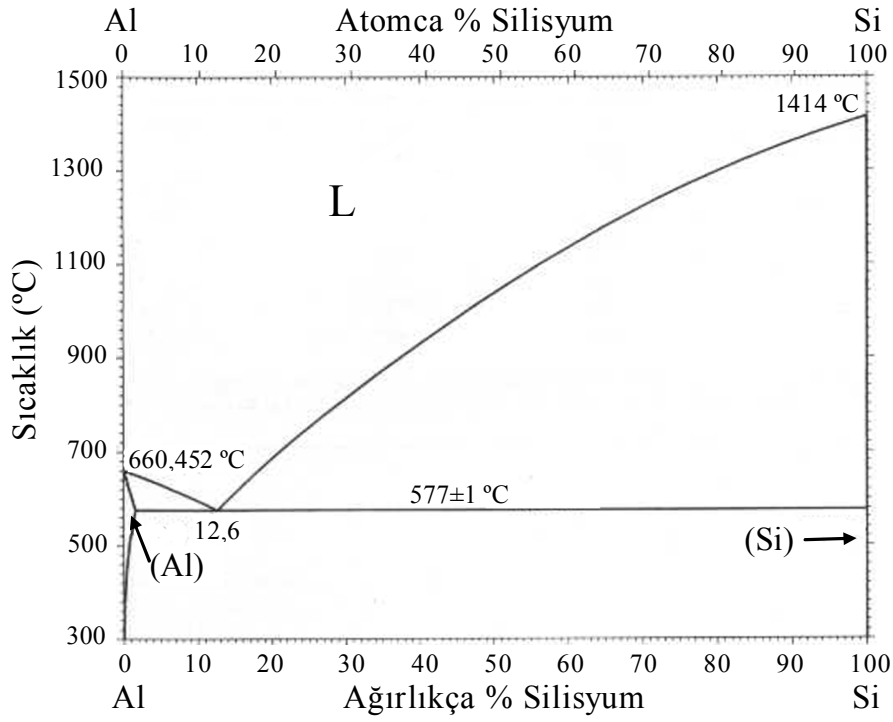
Üretim yöntemi incelendiğinde (Şekil 3.12) yüzey kaplamaya kadar toz metalurjisi ile aynı yol takip edilmektedir. Daha sonra haddeleme, presleme gibi bir dış kuvvet yardımı ile köpürmeye hazır ön malzemenin yüzeyi plaka ile kaplanır. Bu işlem sonrasında köpürebilir alüminyum alaşımlı ön malzeme (metal alaşımı) çekirdek tabakayı oluşturur ve iki yüzeye konulan levha ile (genellikle Al alaşımı fakat Ti veya çelik de kullanılabilir) üçlü bir katman oluşturur (Resim 3.5.a). Burada maksat köpürtme öncesi yüzey plakası ile köpürecek malzeme arasında mekanik bir kilitleme sağlamak ve aynı zamanda ara yüzeydeki oksit tabakalarının parçalanmasını sağlayarak köpürme esnasında bağlanmasını kolaylaştırmaktır. Yüzeyi kaplanan numune eğer ihtiyaç duyulur ise köpürtme öncesi ön şekillendirmeye tabi tutulur. Son işlem olarak numune sıcaklık ve zaman göz önünde

bulundurularak köpürtülür (Resim 3.5.b). Sonuçta alüminyum alaşımlı köpük ile plaka arasında metalik bir bağ oluşur. Oluşan bu yoğun bağlanma tipi kompozit bileşenleri arasında maksimum kuvvet iletimini sağlar [30].



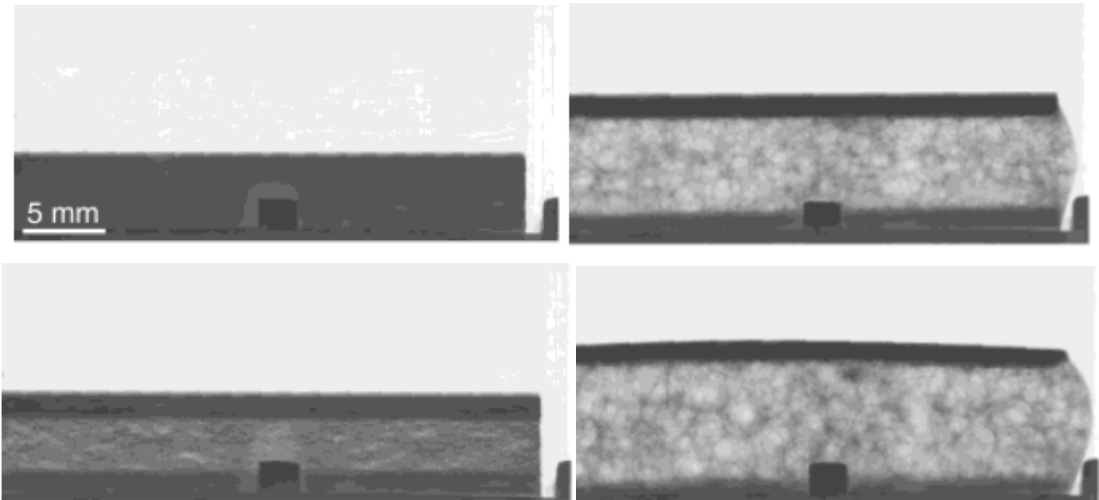
Resim 3.5. Sandviç köpüğün (a) köpürme öncesi ve (b) sonrası fotoğrafları

Sandviç köpükler genellikle alüminyum alaşımlı köpük üzerine yine alüminyum plaka kaplama yöntemi ile üretilmektedir. Bu sebeple üretim yöntemindeki en önemli nokta sıcaklık ve sürenin iyi kontrol edilmesidir. Çünkü ergime sıcaklıkları yakın olan iki malzemeden birinin köpük haline gelmesi için ergimesi, plakanın ise katı halde kalması gerekir. Bunu sağlamak için köpürecek malzemeye alaşım elementleri katılarak plaka ile köpüğün ergime sıcaklıklarının farkı artırılabilir. Literatüre bakıldığında alüminyum sandviç köpük üretiminde en sık kullanılan alaşım elementi silisyumdur [20,31]. İlave edilen silisyumun alüminyumun ergime sıcaklığına etkisi Şekil 3.13' teki faz diyagramında görülmektedir.



Şekil 3.13. Alüminyum Silisyum faz diyagramı [54]

Aşağıdaki Resim 3.6’da AlSi7 alaşımı kullanılarak üretilen sandviç köpüğün, süreye bağlı olarak değişimi görülmektedir.



Resim 3.6. AlMg1/ AlSi7/ AlMg1’ den oluşan sandviç köpüğün fırın içerisinde 700°C’ de, 4 farklı zamandaki değişiminin radyoskopik görüntüleri [31]

Resim 3.6’daki görüntüler incelendiğinde köpüğün ve plakanın dört farklı zaman

dilimi içerisindeki değişimi görülmektedir. Köpüğün genleşmesi açıkça görülmekle birlikte dördüncü zamanda üst plakanın kenarlardan hafiften ergidiği, alt plakanın ise neredeyse kaybolmaya başladığı görülmektedir. Bu sebeple sandviç köpük üretiminde soğumanın başlatılması gereken hassas nokta üç ve dördüncü zaman dilimleri arasındadır.

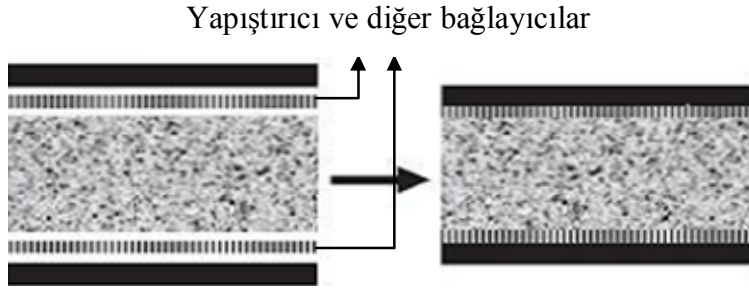
Doğal bağlanma ile köpük üretiminin en önemli avantajlarından birisi de daha önce üretim şemasında (Bkz. Şekil 3.12) verildiği gibi köpürtme öncesi sandviç yapıya şekil verebilme imkânıdır. Bu sayede üç boyutlu olarak şekillendirilmiş sandviç plakalar üretilebilir. Resim 3.7'deki şekilde bir sandviç köpüğün yapay bağlanma ile üretimi oldukça zordur. Hatta bazı daha karmaşık şekilli numunelerin üretimi imkânsızdır. Fakat doğal bağlanma yönteminde numuneye köpürme öncesi gerekli şekillendirme yapılarak, köpürtme sonrası istenilen şekillerde ürünler elde edilebilir.



Resim 3.7. Burulma ile şekillendirilmiş üç boyutlu sandviç köpük [20]

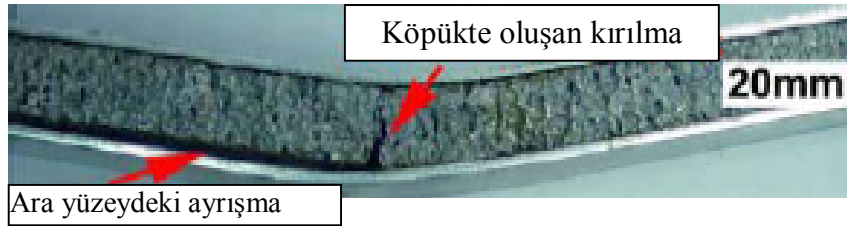
3.3.1. Yapay bağlanma ile sandviç üretimi

Bu yönteme yapay bağlanma denmesindeki maksat; yüzey levhaların çeşitli yöntemler ile köpüğe bağlanmasının köpürme sonrası gerçekleştirilmesidir. Yapıştırıcılar ile bağlama, sert lehimleme ile bağlama bu yöntemlerden bazılarıdır. Hem üretim kolaylığı hem de çeşitliliğinden dolayı en çok karşılaşılan yöntemdir [20]. Çeşitli yöntemler ile üretilmiş alüminyum köpüğün yüzeyine düz bir levhanın yapıştırıcılar ile tutturulması sandviç köpük üretiminde en açık ve kolay yoldur [31]. Şekil 3.14'te yapay bağlanma ile sandviç üretimi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Yapay bağlanma ile sandviç köpük üretimi [20]

Sandviç üretiminde SA80, SA103, Redux 322 gibi çeşitli epoksi yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Yapıştırıcı seçimi önemlidir çünkü bazen bulunduğu konuma göre işlevini tam olarak gerçekleştiremeyebilir. Örneğin aşağıdaki Resim 3.8’de sandviç köpük üretiminde kullanılmış SA103 anti-darbe yapıştırıcısının eğmeye karşı ara yüzeydeki yetersizliği görülmektedir [5,33,34].



Resim 3.8. Yapay bağlanma ile üretilen sandviç köpüğün eğme testi sonrası görünümü [5]

Yapay bağlanma yönteminin ilk akla gelen ve en önemli avantajı köpürtme işlemi ile sandviç yapı üretim işlemi birbirinden tamamen bağımsız olmasıdır. Bu sayede herhangi bir yöntemle üretilen, istenilen özelliklere sahip köpük malzeme ile yine ihtiyaca göre belirlenen çeşitli yüzey levhaları uygun bir yöntem ile birbirine bağlanır. Yani bu yöntem tasarım konusunda büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Ama azalan mukavemet, yüksek maliyet, zor geri dönüşüm, ilave ağırlık, fazladan ihtiyaç duyulan işlem gibi bazı olumsuzluklara da sahiptir. Bu olumsuzluklar alternatif bağlanma tiplerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır [20].

4. METAL KÖPÜKLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Üretim parametrelerinin ve kullanılan malzemelerin çeşitliliğinden dolayı sandviç yapıların, hatta alüminyum köpük sandviç yapıların bile fiziksel ve mekanik özelliklerinin tanımlanması çok geniş bir çalışma gerektirir. Bu sebeple ileriki sayfalarda alüminyum köpük sandviç yapıların özelliklerini doğrudan etkileyen, metal köpüklerin bazı fiziksel özelliklerinden bahsedilecektir.

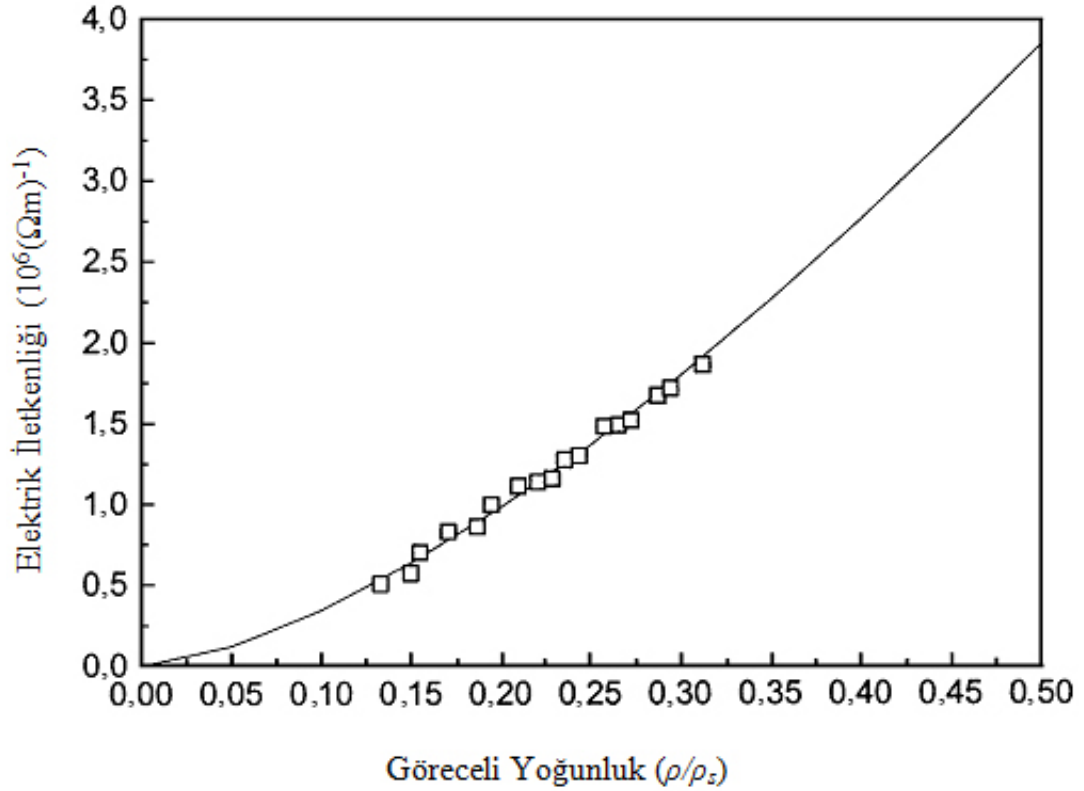
4.1. Elektriksel Özellikleri

En temel yaklaşımla metal köpüklerin gazla dolu boşluklardan oluştuğu göz önüne alınırsa iletkenliklerinin aynı metalden yapılan geleneksel malzemelere göre daha düşük olması beklenen bir sonuçtur. Bunun yanı sıra bazı köpüklerin iç ve dış yüzeyleri metal oksit tabakaları ile kaplanmaktadır ve bu da yalıtkanlığını artırmaktadır. Farklı gözenek boyutu ve yoğunluğa sahip aynı tür malzemeler üzerinde yapılan denemelerde göreceli yoğunluğun elektrik iletkenliğinde en önemli faktör (Şekil 4.1) olduğu, gözenek boyutunun ise göz ardı edilebilecek kadar küçük bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [35,36].

Malzemelerin elektrik iletkenliği (δ) aşağıda (Eş.4.1) verilen Ohm kanununa göre belirlenir.

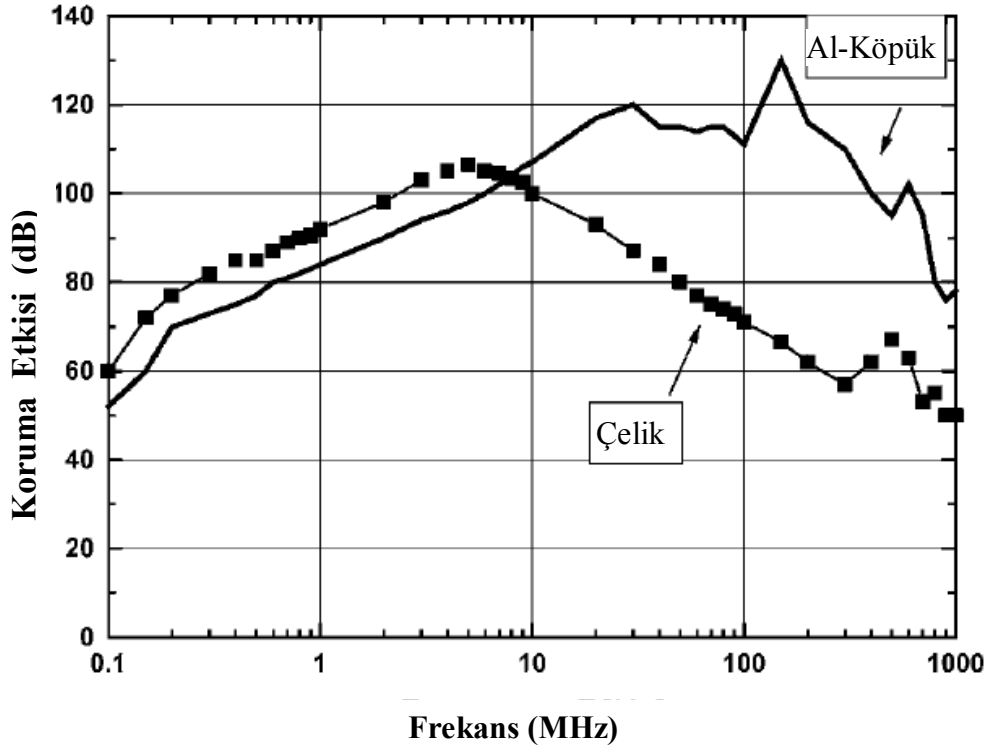
$$\delta = \frac{l}{S} \times \frac{I}{U} \quad (4.1)$$

Formülde; (U) uygulanan akımı, (I) l mesafesi boyunca oluşturduğu potansiyel farkı, S ise kesit alanı göstermektedir. İletkenliğin malzemenin kesit alanı ile (S) sıkı bir bağ içerisinde olduğu açıkça görülmektedir. Tabi köpüklerin büyük bir kısmı boşluklardan oluştuğu için, kesitinin küçük bir kısmı elektrik iletkenliğine katılmaktadır [37]. Bu sebeple köpüğün artan yoğunluğu ile elektrik iletkenliği de artmaktadır. Şekil 4.1’de alüminyum alaşımlı köpüğün yoğunluğu ile elektrik iletkenliği arasındaki ilişki grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. Alüminyum alaşımlı köpükte elektrik iletkenliğinin göreceli yoğunluk ile ilişkisi [36]

Bunun yanında metal köpüklerin; polimer, seramik gibi maddelerden yapılan köpüklere göre de iletkenliğe sahip olması bazı yerlerde ayrıcalıklı bir kullanım alanına sahip olmasını sağlar. Özellikle kapalı hücre gözenekli köpükler ile kaplanan yüzeylerde gözenekli metallerin elektrik iletkenliği elektromanyetik dalgaların yapıya sızmasını azaltır. Köpüğün bu özelliği elektronik devrelerin ve insanların elektromanyetik parazitlerden korunmasında etkili bir şekilde faydalanılabilir. Etkili bir dalga kalkanı, dalga frekansına ve malzeme kalınlığına bağlıdır. Metal köpüklerin temel avantajı düşük manyetik geçirgenlik için aynı maddeden yapılan yoğun malzemeye göre daha kalın bir malzeme olmasıdır. Şekil 4.2’de Alulight’ın ürettiği alüminyum kapalı hücreli köpük ve aynı ağırlıktaki Si-çelik (manyetik özellikleri geliştirilmiş özel çelik) levhanın deneysel ölçümleri verilmiştir.



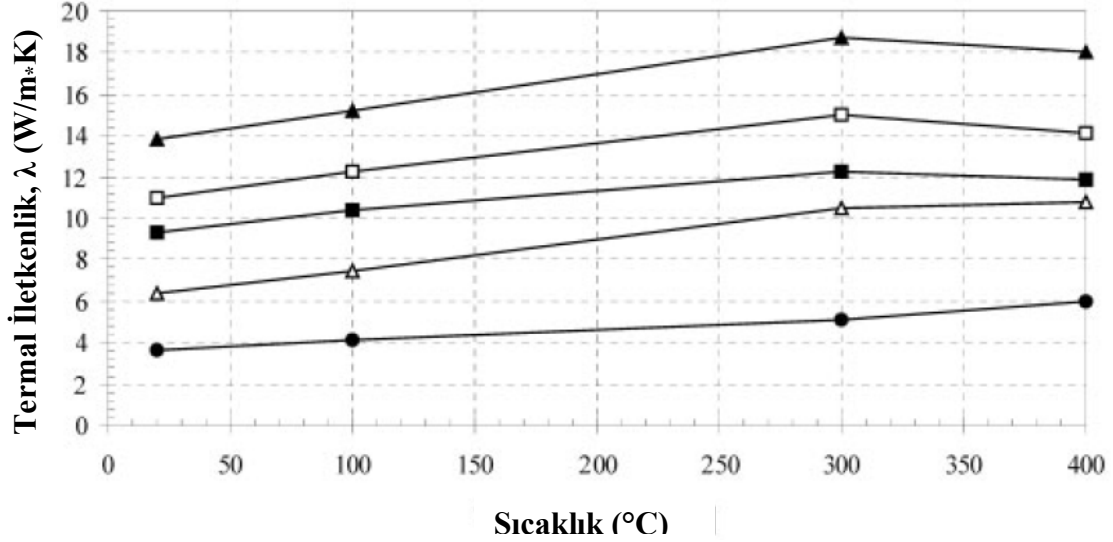
Şekil 4.2. Elektrik alanı kalkan etkisi ve frekans ile ilişkisi (Gözenekli alüminyum (Alulight) ve aynı ağırlıktaki Si-çelik malzeme) [37]

Gözenekli alüminyum köpükler aynı ağırlıktaki yoğun malzemeye göre yüzey alanından dolayı daha iyi manyetik alan koruma özelliği sergiler. Grafikten de görüldüğü gibi 10 MHz'ye kadar birbirlerine paralel bir özellik sergilerlerken daha yüksek frekanslarda Al köpük çok daha iyi özellik göstermektedir.

4.2. Termal Özellikleri

Metal köpüklerle ilgili olarak önemli ana termal özellikler ergime noktası, öz ısı (c), ısı genleşme katsayısı, ısı iletkenlik, ateş ve termal şok direnci olarak sıralanabilir. Bu özelliklerden bazıları dolu malzemelerle tamamen aynıdır, diğerleri ise gözenek yapısı ile sıkı bir bağ içerisinde. Örneğin metal köpüklerin ergime noktaları yapıldığı alaşım elementlerine bağlı olarak diğer metaller ile aynıdır. Fakat bazen alüminyum köpüklerde olduğu gibi yüzey kesintisiz oksit tabakası ile kaplanır ve bu tabaka ergime sıcaklığını önemli derecede etkileyebilir [37]. Aşağıdaki Şekil 4.3'te Alulight firmasının farklı alaşımlardan ürettiği köpüklerin sıcaklık ve yoğunluğa

bağı olarak termal iletkenlikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Alulight firmasının çeşitli alaşımlardan ürettiği köpüklerin sıcaklık ve yoğunluğa bağlı termal iletkenlikleri [37].

- AlSi12 alaşımı p = 330 kg m⁻³
- ▲ AlMgSi0.6 alaşımı p = 500 kg m⁻³
- saf Al 99.6, p = 320 kg m³ ($\lambda_s = 230 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
- Δ AlSi12 alaşımı p = 440 kg m⁻³ ($\lambda_s = 120 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
- AlMgSi0.6 alaşımı, p = 420 kg m⁻³ ($\lambda_s = 200 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Köpük yüzeyinin ısıyı yayım gücü, yapıldığı köpük olmayan metalden neredeyse her zaman daha yüksektir. Köpüğün gerçek yüzey alanı çok daha geniş olduğu için dolu malzemeye göre daha fazla termal radyasyon emer veya yayar. Polimer ve seramik köpükler termal yalıtım için daha fazla kullanılırlar. Fakat metal köpüklerin yüksek termal iletkenlik özellikleri ısı değiştiricilerde veya hava soğutmalı kondansatörler gibi bazı elektronik eşyalarda soğutucu olarak iyi bir şekilde faydalanılabilir. Tabi bu gibi uygulamalar hava sirkülasyonu gerektiği için açık gözenekli metal köpükler kullanıma daha uygundur. Nispeten düşük termal iletkenlikleri, tutuşmamaları ve düşük ağırlıkları metal köpükleri ateş duvarı uygulamaları için cazip hale getirir [37].

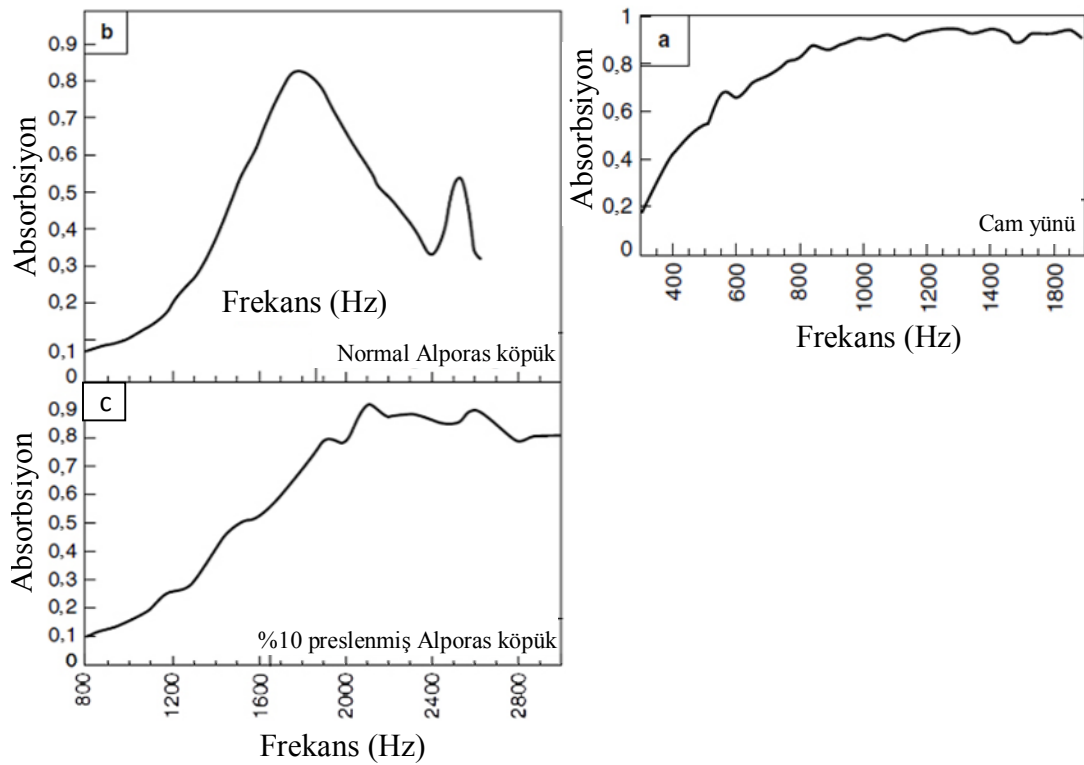
4.3. Ses ve Titreşim Absorbsiyonu

Ses atom ya da moleküllerin bir sonraki ile çarpışması ile oluşan dalgalanma ile

taşınan bir enerji türüdür. Boylamasına elastik titreşimlerin hızı (c) genellikle elastikiyet modülünün (E) yoğunluğa (ρ) oranının karekökü ile ifade edilmiştir [37].

$$C \propto \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.2)$$

Sesin farklı fazlarda ilerleme hızı yüksekten düşüğe doğru katı, sıvı ve gaz şeklinde sıralanabilir. Katı çelik veya alüminyumda ses iletim hızı yaklaşık 5000 m/s ve deniz seviyesindeki havada yalnızca 343 m/s'dir [37]. Sadece bu yönden baktığımızda bile içi hava boşlukları ile dolu olan köpüğün ses iletiminin aynı kalınlıktaki yoğun metale göre çok daha düşük olması beklenir. Şekil 4.4'te cam yünü ve farklı metal köpüklerin ses absorbe özellikleri kıyaslanmıştır.



Şekil 4.4. (a) Cam yünü, (b) Alporas köpük (piyasadaki şekli ile) ve (c) %10 deformasyon ile hücre duvarları tahrip edilmiş Alporas köpüğün ses absorbe grafikleri [2]

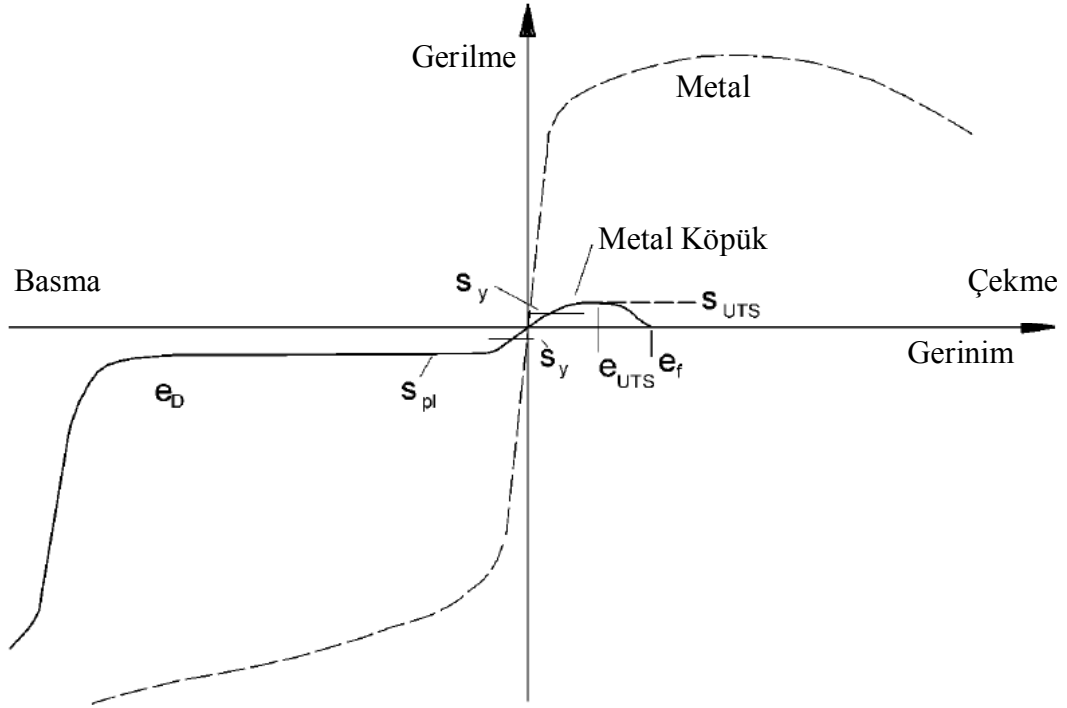
Absorbe katsayısı temel olarak bir kabul edilirse ki bunun anlamı ses neredeyse tamamen absorbe edilmiş demektir. Bu bakımdan Şekil 4.4.a'da cam yününün 1000

Hz üzerindeki frekansları neredeyse tamamen absorbe ettiği görülmektedir. Şekil 4.4.b'de hiçbir işlem görmemiş Alporas köpüğün değerleri görülmektedir. Burada yaklaşık 0,9 Hz'den 1800 Hz'e kadar absorbsiyon artmakta sonrasında ise düşmektedir. Şekil 4.4.c'deki grafikte ise aynı köpüğün %10 preslenerek deforme edilmiş hali verilmiştir. Deforme edilen köpüğün ses absorbsiyonunda normal haline kıyasla büyük gelişme gözlemlenmiştir. Çünkü köpüğün deformasyonu sonrası çoğu hücre duvarı kırılmakta ve bu da titreşimlerin iletimini azaltmaktadır. Sonuç olarak metal köpüklerin ses absorbsiyon kabiliyetleri cam yünü kadar iyi değildir ama çok fonksiyonlu uygulamalarda avantaj sağlayabilir [2, 38]. Ayrıca yalıtım malzemeleri çeşitli amaçlar ile kullanılabileceğinden metal köpükler de bazı amaçlar için kullanılabilir. Genellikle ses yalıtım malzemeleri işlevlerine göre üç temel durumda sınıflandırılabilir [37];

- Ses izolasyon malzemeleri, havadaki ses dalgalarını korunan alanın dışında tutar.
- Ses emme malzemeleri, sesin olduğu odaların içindeki ses şiddetini azaltır ya da tamamen emer.
- Ses sönümleme malzemeleri, ses yalıtımı oluşturarak yapının akustiğini sağlar.

4.4. Mekanik Özellikler

Metal köpüklerin en dikkat çekici özelliklerinden biri mekanik özellikleridir. Yapıldığı metale ve alaşımına göre oda şartlarında genelde sünektir ve bünyesinde barındırdığı boşluklar sayesinde basma yüklerine karşı oldukça fazla enerji emme özelliğine sahiptir. Bu enerji absorbsiyon özelliği sayesinde çeşitli yerlerde uygulama imkânı bulmaktadır. Aşağıdaki Şekil 4.5'te alüminyum köpüğün gerilme – gerinim davranışı lineer elastik, plastik çökme ve yoğunlaşma olmak üzere grafikte üç aşamalı olarak temsil edilmiştir.

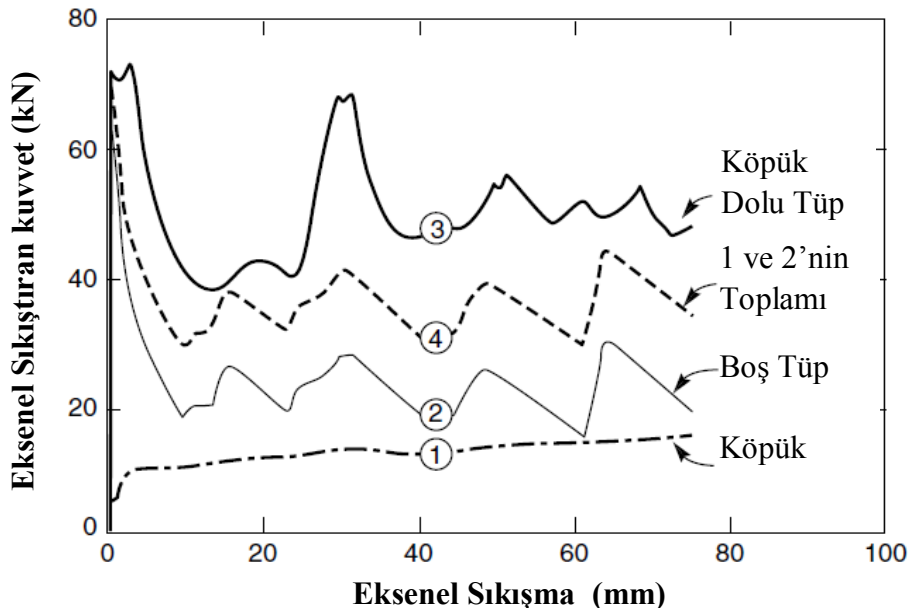


Şekil 4.5. Metal ve metal köpüğün şematik gerilme gerinim diyagramı [37]

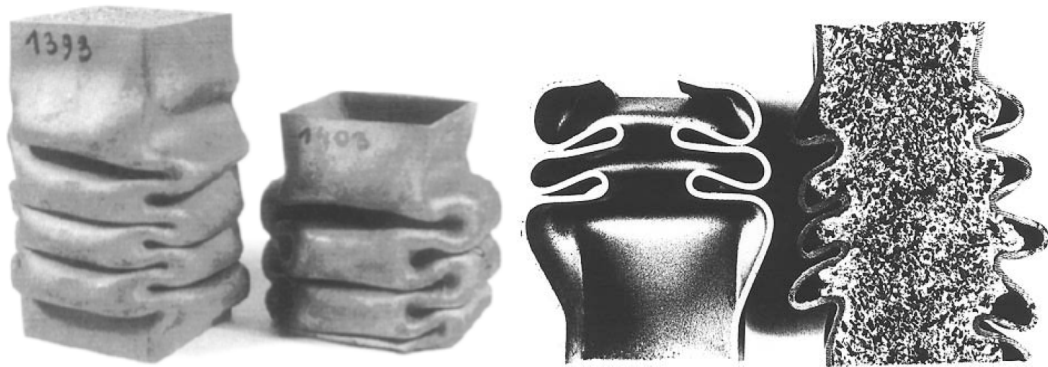
Metal köpüklerin tipik gerilme-gerinim eğrisinin verildiği Şekil 4.5'te grafiğin parametreleri; köpük türüne, yoğunluğa, açık veya kapalı gözenekli oluşuna, anizotropiye ve diğer bazı yapısal parametrelere bağlı olarak değişebilir. Şekilde s_y elastik limiti (basma ve çekmede birbirinden çok az farklı), s_{UTS} maksimum çekme dayanımı, s_{pl} basmadaki sıkışma alanı (plateau stress) (alt simge plastik manasında pl), e_D yoğunlaşma gerinimi, e_f kopma gerinimini vermektedir. Görüldüğü gibi çekme yükleri altında köpüğün davranışı yoğun metal ile benzerlik göstermektedir. Fakat basma yükü altındaki davranışı bariz bir fark göstermektedir Burada köpük metallerin ideal plastik davranışına benzer bir davranış sergilemektedir (Şekil 4.5).

Köpükler taşıma sistemlerine uygulandığında çarpışma durumundaki enerji absorpsiyon kabiliyetlerinin yanında darbe davranışları da önemlidir. Çarpışmadaki yüksek deformasyon oranlarında köpüğün mekanik özellikleri değişir. O esnada iki nokta göz önüne alınır: hücre kenarlarının ve duvarlarının eylemsizlik kütlesi ve kapalı gözenekli köpüklerin içindeki gaz akışı ve gaz basıncı [37]. Ayrıca köpükler

profil içerisinde doldurarak da kullanılabilir. Bu durumda Şekil 4.6’ da görüldüğü gibi köpük dolu tüpün basmaya karşı mukavemeti köpük ve tüpün ayrı ayrı sergiledikleri mukavemetlerinin toplamından daha yüksektir. Bu sebeple de daha yüksek enerji absorpsiyon yeteneğine sahiptir. Resim 4.1’de içi boş ve dolu tüpün basma testi sonrası fotoğrafları görülmektedir.



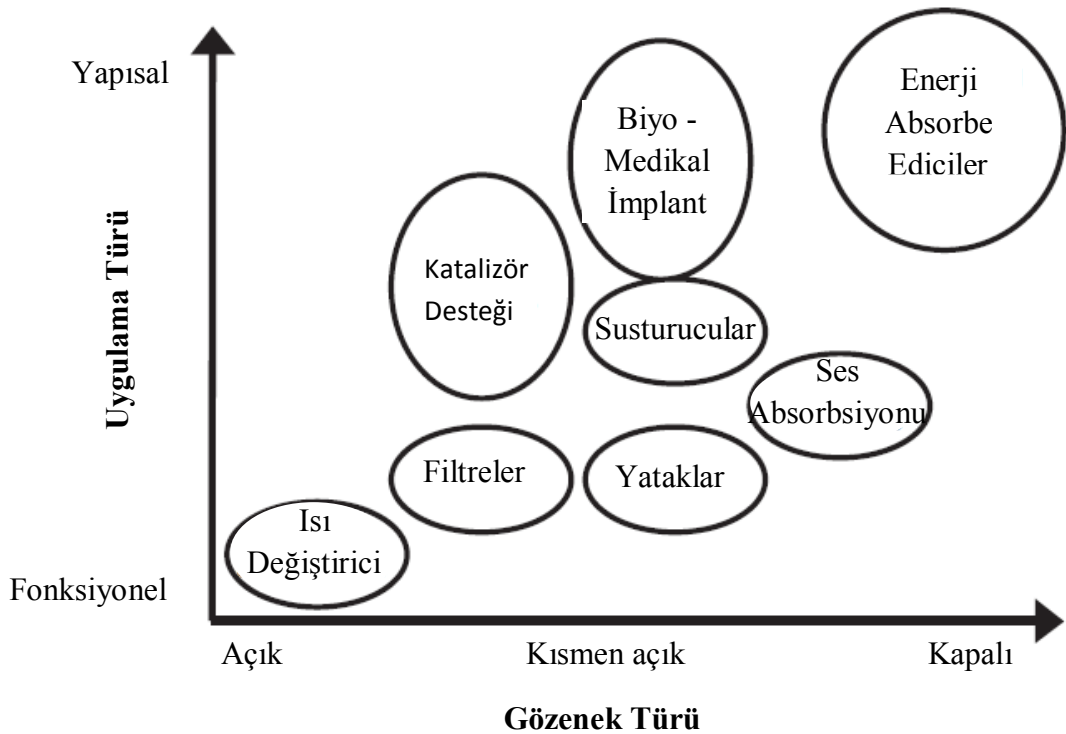
Şekil 4.6. Köpük, tüp ve köpük dolu tüpün basma sıkışma eğrileri. 4 numaralı eğri köpük ve tüpün toplamını vermektedir [2]



Resim 4.1. İçi boş ve köpük dolu tüplerin kısmi ezilmeden sonraki tam ve kesit resimleri [39]

5. KULLANIM ALANLARI

Metal köpükler ve köpük sandviç yapıların kullanım alanları, bir kısmı yukarıda verilmiş olan fiziksel özelliklerine göre çeşitlilik gösterir. Enerji absorpsiyonu gibi sadece bir özelliğinden faydalanmak için taşıma araçlarında tercih edilebildiği gibi binalarda; yalıtım, görsellik ve yanıcı olmama gibi birkaç özelliğinin kombinasyonundan yararlanılmak için de tercih edilebilir. Yani metal köpükler bir veya daha fazla özelliği sebebi ile kullanım alanı bulabilir. Hem bu sebeple hem de kısmen yeni bir malzeme grubu olması ve yeni kullanım alanları öngörülmesinden dolayı kullanım alanlarını belirleyebilmek imkânsızdır. Kısacası sahip oldukları özelliklere göre birçok alanda kullanılabilir. Şekil 5.1’de metal köpüklerin kullanım alanları, uygulama türü ve gözenek yapılarına göre yapısal ve fonksiyonel olarak gruplandırılmıştır.

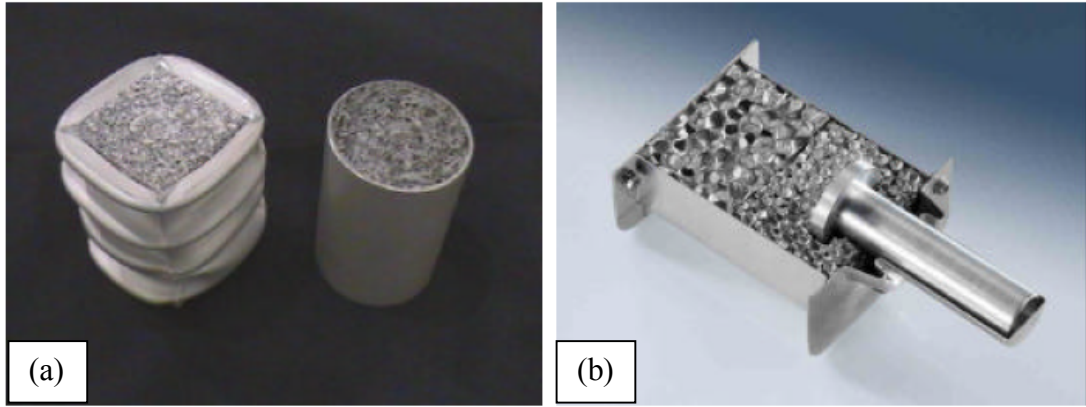


Şekil 5.1. Metal köpüklerin kullanım alanlarının gözenek ve uygulama türüne göre gruplandırılması [13]

İleriki konularda metal köpüklerin ve köpük sandviç yapıların mevcut ve potansiyel kullanım alanlarına örnekler verilmiştir. Verilen bu örnekler malzemelerin sahip olduğu özellikler doğrultusunda çoğaltılabilir.

5.1. Metal Köpük Dolu Tüpler Ve Darbe Emiciler

Taşıma araçlarında özellikle önden veya arkadan çarpmalar sonucu hem aracın fazla hasar almasını engellemek hem de sürücü ve yolcu güvenliği için enerji absorbe edici malzemeler tasarlanmıştır. Bu amaçla içi boş tüpler kullanarak darbe enerjisinin deforme olan tüpler tarafından emilmesi öngörülmüştür. Daha sonra bu tüpler metal köpük ile doldurularak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Köpüklerin fiziksel özelliklerinde de bahsedildiği gibi köpük dolu tüpün mukavemeti yalnız köpük ve tüpün toplam mukavemetinden fazladır. Resim 5.1.a'da köpük dolu tüpün deformasyon sonrası hali ve b'de farklı bir tasarımı görülmektedir.



Resim 5.1. (a) Cymat firmasının ürettiği alüminyum köpük ile doldurulmuş Al tüpten oluşan prototip darbe emici ve (b) farklı iki yoğunluktaki Metcomb alüminyum köpüğü esas alan dizayn örneği [40]

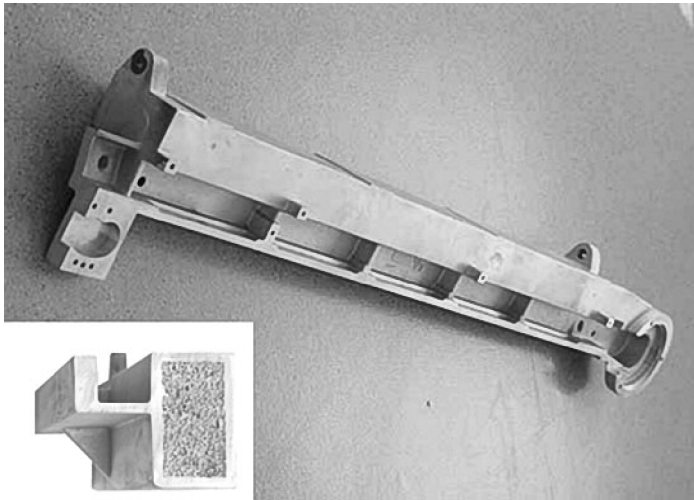
FIAT ve Norwegian Bilim ve Teknoloji Üniversitesi tarafından metal köpük dolu tüp hakkında yapılan çalışmalar sonucunda; eksen boyunca ve özellikle eksen dışı çarpışmalarda enerji absorpsiyonunun arttığını göstermiştir. Cymat, Fransız otomotiv parça üreticisi Valeo ile birlikte ön arka modül sistemlerinde uygulamak için çarpma kutusu geliştirme programına katılmıştır. Biraz farklı olan tasarımları Resim 5.1.b'de

görülmektedir [40]. Metal köpükler ayrıca içi boş malzemenin zayıf noktalarının özelliğini geliştirmek için içerisine yerleştirilerek de kullanılabilir (Resim 5.2).



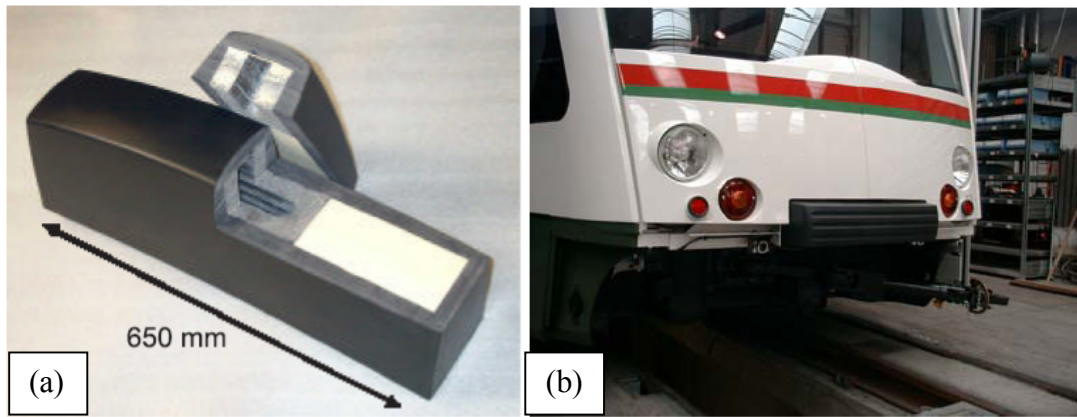
Resim 5.2. İçerisine Al köpük konularak desteklenmiş süspansiyon parçası [32]

Kapalı hücreli alüminyum köpüğün diğer bir uygulaması da Resim 5.3'te görüldüğü gibi kiriş içerisini doldurma yöntemidir. Bu parça 370 Hz frekans civarında iyi titreşim sönümleme kapasitesi ile kesme ve freze makinelerinde kullanılmaktadır. Köpüksüz normal parçaya göre titreşim seviyesini % 60 oranında azaltmaktadır. Gleich şirketi tarafından 2004 yılından beri her biri 21 kg olan 2500 parça üretilmiştir [6].



Resim 5.3. İçine Alporas köpük konulmuş kiriş. Parça uzunluğu 1900 mm, köpüğün uzunluğu 1580 mm [6]

Metal köpükler raylı taşıma araçlarında da uygulama alanı bulmaktadır. Üç Alman şirketi olan tramvay üreticisi Siemens, darbe absorbe edici malzeme üreticisi Hübner ve metal köpük üreticisi Schunk Sintermetalltechnik birlikte çalışarak Resim 5.4.a’da görülen darbe sistemini COMBINO® modüler tramvay konsepti için geliştirmişlerdir.



Resim 5.4. (a) COMBINO araç sistemi için yapılan darbe enerji emicisi [40] (b) Alüminyum köpüklerin banliyöler için enerji absorbe edici olarak kullanımı gerçek hayattaki kullanımlarının ilk örneklerindendir [30]

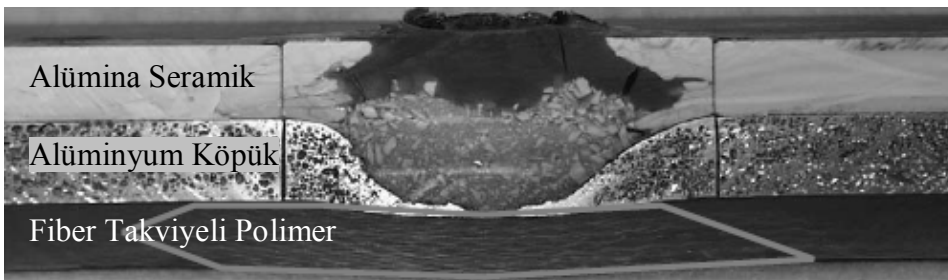
Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit ve sandviçler onlarca yıldır kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek rijitlik ve çekme dayanımına sahiptir ve bu özellikleri ile birçok alanda kullanım imkânı bulurlar. Fakat bu kompozitler içi boş ve ince çeperli olarak üretildiklerinde eğilmeye dayanıksız duruma gelir. Bu noktada alüminyum köpük yapının ağırlığını kabul edilebilir ölçülerde artırarak gerekli bükülme dayanımını sağlayabilir. Bu sistem kullanılarak hafif ve yüksek performanslı golf sopası çantalarını taşıma araç prototipi geliştirilmiştir (Resim 5.5). Prototipte eğimli parçalar yüksek yüklemelerde kararlı olması için alüminyum köpüklerle doldurulmuştur [30].



Resim 5.5. Eğimli parçaların içleri alüminyum köpük konularak desteklenmiş golf takımı taşıyıcısı [30]

5.2. İntegral Zırh Malzemesi

Daha önce bahsedildiği gibi metal köpüklerin en dikkat çekici özelliği enerji absorbsiyon kabiliyetidir. Zırh malzemelerinin imalatının da temel amacı maruz kalan enerjiyi emme ya da direnç göstermedir. Bu bağlamda integral zırh malzemesi geliştirilmesinde metalik köpükler gerekli potansiyele sahiptir. Resim 5.6'da seramik, köpük ve polimerden oluşan integral zırh malzemesinin test sonrası görüntüsü verilmiştir.



Resim 5.6. 20 mm'lik alüminyum köpük tabakası kullanılarak üretilen hafif zırh malzemesinin U.S. ordusu için balistik testi sonrası enine kesiti [41]

Yapılan deneysel ve nümerik analizlerde alüminyum köpüklerin dinamik deformasyonu tamamen sıkışana kadar dağıtmayı sürdürdüğü gözlemlenmiştir. Yani

aradaki köpük tamamen yoğunlaşana kadar darbe yükünü dağıtır ve daha sonra alt tabakaya aktarır. Bu aktarma miktarı köpüğün kalınlığı ile lineer bir ilişki içerisinde. Bu tasarım daha hafif ve hasar toleransı daha yüksek ileri nesil zırhlı araçlar için bir basamak teşkil etmektedir [41,42].

5.3. Tasarım ve Mimari

Metal köpüklerin hem estetik görüntüsünden hem de düşük termal iletkenlik, rutubet ve UV radyasyona direnç, ses emme ve elektromanyetiklik gibi fiziksel özelliklerinden yararlanılma fikri mimar ve mobilya tasarımcılarının ilgisini çekmektedir. Bu gibi çeşitli özellikleri ile taşıyıcı bölümler dışında yapı endüstrisinin birçok alanda kullanıma müsaittir. Ayrıca metal köpük paneller ekolojik olarak zararsız ve geri dönüşümlü olması çevre yönünden büyük bir avantajdır. Bazı kullanım alanları Resim 5.7’de görülmektedir.



Resim 5.7. TM ile yapılan alüminyum köpüğün tasarımları [32]

5.4. Motosiklet Kaskı Olarak

Motor kazalarında kasklar insan kafasına gelen darbeleri absorbe eder veya bir noktaya gelen darbeleri geniş bir alana yayarak etkisini azaltır. Sıradan kaskların dış

kabuğu sert ve rijit olan ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) veya polikarbonat termoplastiklerden yapılır. Bu malzemelerde temel amaç hafiflik ve keskin nesnelere çarpma sonucu oluşan darbe etkisini yayarak kafayı korumaktır.

Metal köpükler de ağırlık azaltma ve enerji absorpsiyonu yönünden öne çıkan bir malzeme gurubudur. Bu sebeple metal köpüklerin yeni nesil motor kaskı olarak kullanılması planlanmaktadır. Bunun için de metal köpük ile prototip kasklar üretilmiş ve standart darbe durumlarında ISO standartlarına göre test edilmiş (Resim5.8) ve elde edilen sonuçlar ABS den üretilen kasklarla kıyaslanmıştır.



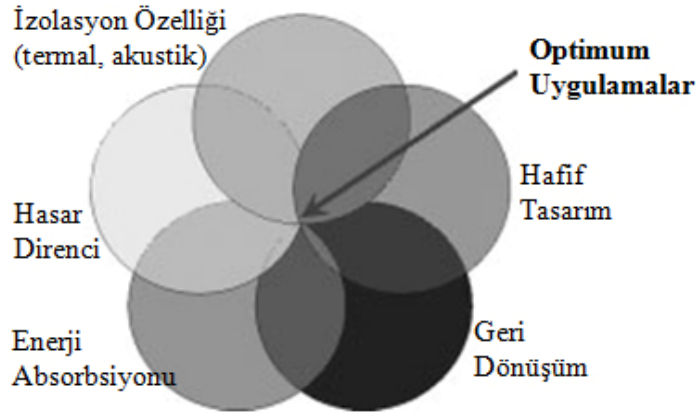
Resim 5.8. Metal köpük kaskların ön ve üst darbelere karşı test edilmesi [43]

Darbe sonrası metalik köpüklerin darbe bölgelerinde şekil ve geometrileri değişmiş ve darbe yüzeyleri düzleşmiştir. Deney sonrası kafayı etkileyen toplam kuvvet ABS kasklara göre metal köpüklerde daha düşük çıkmıştır. Ayrıca ABS kasklara göre kullanılan metalik köpük (500 kg. m^{-3}) ağırlığı %30 azaltmıştır [43].

5.5. Sandviç Yapıların Kullanımı

Aslında metal köpüklerin fiziksel özelliklerine ve kullanım alanlarına bakılarak da sandviç yapıların kullanım alanları için yorum yapılabilir. Çünkü genel olarak alüminyum köpüklü sandviç yapılar köpüğün özelliğini yapısında barındırmaya devam eder. Sandviç yapılar enerji absorpsiyonu, hasar direnci, izolasyon gibi çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Fakat optimum uygulama bu özelliklerin kesiştiği alandır.

Bu noktada sandviç yapı çok fonksiyonlu bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Şekil 5.2’de alüminyum köpük sandviç yapıların uygulama alanları belirtilmiş ve optimum uygulama noktası gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Alüminyum köpük sandviçlerin uygulama alanları [44]

5.5.1. İç içe giren kaldırma sistemleri

Teupen firması (Gronau, Germany) çalışma platformunu iç içe geçen kollarla kaldıran destek sistemi için farklı bir konsept geliştirmiştir. Burada amaç geçerli çalışma yüksekliğini 20-25 m ve yatay uzanmasını 11 m ye çıkartmak ve toplam araç ağırlığını 3500 kg’ın altında tutmaktır. Bu sayede Avrupa’daki araç sürücülerini ileri sınıflar yerine sadece EURO B ehliyetine ihtiyaç duyacak ve şirketler de araç operatörleri yönünden avantaj kazanacaktır. Uzanan kolun yapısı 6 katlı C tipi AFS panelden oluşturulmuş ve panellerdeki levhalar 6060 ve 6082 Al alaşımlarından üretilmiştir. Resim 5.9’ de görülen yapı yaklaşık 2,5 m yüksekliğinde çok eksenli periyodik yüklemelerle (100 kN dikey, 14 kN yatay) test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda malzemenin 100.000 yüklemeye dayanabildiği ve bu sebeple herhangi bir sorun olmadan 40.000 defadan fazla kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. Yapı 110 kg’lık ağırlığı ile benzer klasik çelik yapıdan % 50 daha hafiftir. Bu yapının yılda ortalama % 60’ı ‘Alm’ ve Teupen firmaları tarafından üretilmektedir.



Resim 5.9. Alüminyum sandviç köpük kullanılmış Teupen EURO B25T kaldırıcı kol destekli araç [20,44]

5.5.2. Ariane 5 roket adaptör prototipi

The European “Ariane 5” roketinin taşıdığı yükü destekleyen iki koni şekilli adaptör kullanılmıştır (Resim 5.10). Bunlar hâlihazırda yüksek maliyetlerle alüminyum bal peteğinden üretilmektedir. Bu koniler 12 parça eğimli alüminyum sandviç köpük yapıdan (1,3 mm’lik 6060 alaşımlı yüzey levhası ve AlSi6Cu6 köpük) üretilip TIG kaynağı ile birleştirilerek daha ucuz ve kolay imalatı hedeflenmiştir. Koninin son hali yaklaşık 4 m genişliğinde ve 180 kg ağırlığında olmaktadır. Koni üzerinde yapılan testlerde prototipe 100 kN üzerinde normal ve kesme düzleminde yüklemeler yapılmış ve malzeme yeterli dayanım göstermiştir. Fakat yinede mukavemet olarak gerekenden % 10 daha düşüktür. Sonraki prototiplerde nihai gereksinimleri

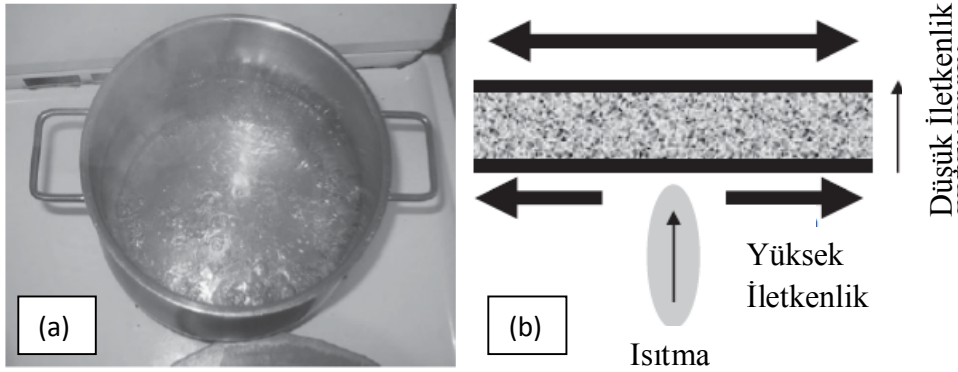
karşılması için yapının daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olarak üretilmesi gerekmektedir.



Resim 5.10. Arine 65 roketinin AFS den yapılan koni prototipi a) parçanın roketteki konumu b) koninin birleştirilmiş hali [20] c) AFS' nin detay görüntüleri [45]

5.5.3. Pişirme tavaşı

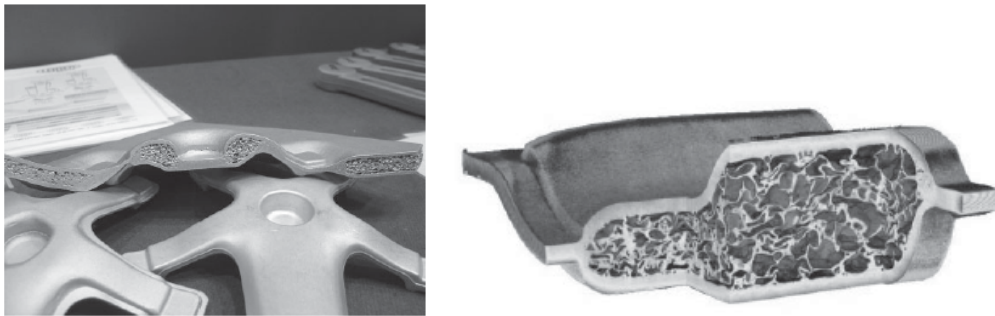
Saplı tencere veya kızartma tavaşının altı oldukça kısmi bir bölümünden (alev) ısıtılır. Genellikle başarılı bir pişirme için sıcaklığın geniş bir alanda aynı olmasına ihtiyaç duyulur. Bu yüzden alınan ısı dağıtılmalı ve sıcaklık tabanın her bölgesinde eşitlenmelidir. Eğer taban alüminyum sandviç köpükten yapılırsa ısının köpük tabakasından geçişi çok daha yavaş olacağından (köpüğün ısıl iletkenliği yoğun malzemeden yirmi kat daha düşük) en alttaki yoğun yüzey levhası sıcaklığı yoğun olduğu yönde hızlıca ileterek ısıyı yayacaktır. Daha sonra köpükten geçen ısı üstteki yüzey levhası tarafından tekrar dağıtılacaktır. Isı dağılımını test etmek için farklı tabandaki iki kapta su kaynatılmıştır. Test sonucunda gerçekten suyun kaynaması AFS tabanlı kapta çelik tabanlıda yapılane göre çok daha homojen olarak gerçekleşmiştir (Resim 5.11).



Resim 5.11. (a) Alüminyum sandviç köpük tabanlı tavada su kaynatma testi, (b) tabanın ısı iletim prensibi [20]

5.5.4. Bisiklet krank kolu prototipi

Alüminyum sandviç köpük yapıların döverek şekillendirme uygulamasının ilk denemesini yarış bisikletleri için krank kolu üretiminde yer bulmuştur. Bisiklet krank kolları normalde alüminyum 6082 alaşımından dövülerek üretilir ve satılan en hafif parçanın ağırlığı 300 g'dır. Yerine kullanılacak olan Resim 5.12'de görülen AFS krank kolu ise 222 g'dır ve diğer malzemeye göre % 30 daha hafiftir.



Resim 5.12. Alüminyum sandviç köpükten üretilen bisiklet krank kolu prototipi [20]

Bu onlarca gramlık fark büyük bir başarıdır. Çünkü bisiklet gibi zaten hafif olan bir araçta profesyonel kullanıcılar için gramlık farklar bile önemlidir. Eğer alüminyum sandviç köpüklerin dövme teknolojisi maliyet ve tasarım yönünden geliştirilebilirse, ileride yüksek bir pazar potansiyeline sahip olacağı düşünülmektedir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Kullanılan Malzemeler

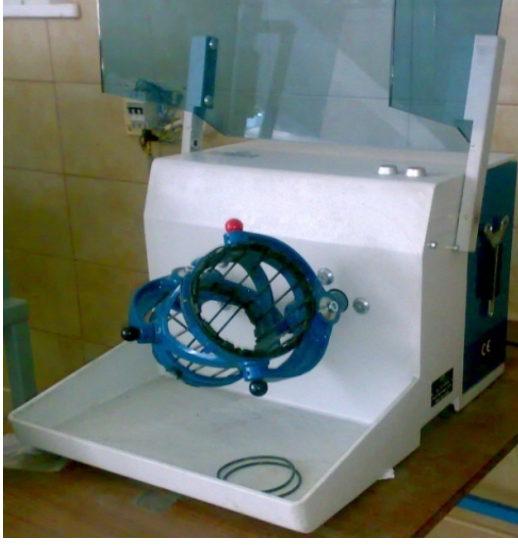
Çalışmada; sandviç yapının çekirdek malzemesi olan alüminyum matrisli köpüğü üretebilmek için, ECKA firmasından temin edilen %99,9 saflıktaki AS 91/S kodlu alüminyum tozu kullanılmıştır. Ayrıca alüminyum alaşımlandırmak için ortalama 63 µm boyutunda bakır tozu ve 10µm boyutunda, %99,9 saflıkta silisyum (AEE SI 102) tozu kullanılmıştır. Köpürtücü madde olarak, Aldrich firmasından sağlanan - 325 mesh boyutunda ve %98 saflıkta TiH_2 (titanyum hidrür) tozu kullanılmıştır. Sandviç yapı üretimi için, yüzey tabakası olarak piyasada yaygın olarak bulunan ticari saflıktaki alüminyum plakalar tercih edilmiştir.

6.2. Numune Hazırlama

6.2.1. Toz karışımlarının hazırlanması

Üretilecek olan köpük, alüminyum plakalı sandviç yapı üretiminde kullanılacağından dolayı köpüğü oluşturan alüminyumun ergime sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir. Bu amaç ile farklı oranlarda silisyum (Si) ve bakır (Cu) tozları kullanılmıştır. Bu tozlar ile birlikte, köpürtücü madde olarak sabit oranda (ağırlıkça % 0,6) TiH_2 tozundan yararlanılmıştır.

Alüminyum köpük oluşturabilmek için ağırlıkça Al % 7 Si, Al % 14 Si, Al %14 Si + % 4,5 Cu ve her birinde %0,6 TiH_2 ilave edilerek, üç farklı karışım 1/10000 g hassasiyetinde Precisa marka hassas terazi kullanılarak hazırlanmıştır. Çeşitli oranlarda hazırlanan bu tozların homojen bir dağılım göstermesi için Turbula marka T2 F tipi üç eksenli karıştırıcı (Resim 6.1) kullanılmıştır. Bu karıştırma işlemi esnasında toz tutucu kapta bilye v.b. öğütücü malzeme kullanılmamıştır. Karıştırma süresi toz kabının doluluk oranı ile değişmekle birlikte kullanılan oranlarda 45 dakikalık sürenin yeterli olduğu yapılan ön çalışmalarda görülmüştür.



Resim 6.1. Deneylerde kullanılan üç eksenli karıştırıcı

6.2.2. Köpürmeye hazır malzemelerin (preform) üretimi

Tozların çeşitli yöntemler ile sıkıştırılarak yoğun bir toz bloğunun eldesi ve bu bloğunun sinterlenerek tozlar arası bağlanmayı artırmak sureti ile bloğa mukavemet kazandırılması toz metalurjisinin temel işlemlerindendir. Toz metalurjisi ile köpük üretiminde de buna benzer işlemler uygulanmaktadır. Fakat burada esas amaç malzemeye mukavemet kazandırmak değil yüksek yoğunluğa sahip blok elde etmek ve bu sayede köpürtücü madde (TiH_2) etrafında sıkı bir tabaka oluşturarak köpürme işlemi esnasında ortaya çıkan H_2 gazının ortamdaki kolayca uzaklaşmasını engellemektir. Bu amaç ile yapılan işlemler aşağıda açıklanmıştır.

Toz Karışımının Yoğunlaştırılması:

Çeşitli oranlarda hazırlanmış tozları blok haline getirebilmek için 30x50 mm boyutlarında numune üretilen çelik kalıplar kullanılmıştır. Presleme işleminde tek yönlü yük uygulanmış ve uygulanan pres basıncının homojen dağılım gösterebilmesi için numunelerin son boyut yükseklikleri 10 mm ile sınırlandırılmıştır. Presleme esnasında tozların kalıp duvarına sıvanarak yapışmaması ve numunenin kalıptan

kolay çıkarılabilmesi için çinko stearat (Zn - 55) yağlayıcı kullanılmıştır. Tüm toz oranları için sıkıştırma basıncı olarak 600 MPa kullanılmıştır.

Blokların Sinterlenmesi:

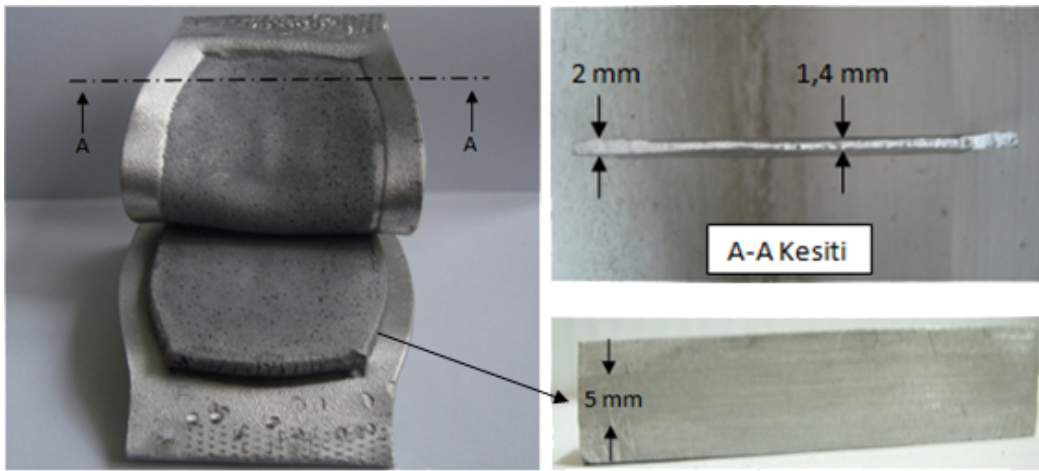
Presleme sonrası elde edilen blok numuneler ne kadar yoğun olarak gözükseler de toz taneleri arasında tam bir bağlanma oluşmamaktadır. Ara yüzeydeki temas alanını genişletmek ve bağlantıyı güçlendirmek için presleme sonrası numunelere sinterleme ısı işlemi uygulanır. Uygulanan ısı işlemin sıcaklığı tek bileşenli malzemelerde genellikle $\frac{2}{3} T_m$ (malzeme ergime sıcaklığı) veya $\frac{4}{5} T_m$ olarak alınır. Çok bileşenlilerde ise işlem biraz daha farklıdır. Fakat sonuçta blok numune içerisinde köpürtücü maddenin varlığı uygulanacak ısı işlem sıcaklığını sınırlamaktadır. Bu sebeple blokların sinterleme sıcaklığı 450 °C olarak seçilmiştir. Sinter sıcaklığının numunelere tam olarak nüfuz edebilmesi ve yeterli etkiyi gösterebilmesi için sinter süresi 3 saat olarak belirlenmiştir.

Köpürtme Öncesi Sıcak Deformasyon ve Sandviç Köpük Ön Malzemesi Hazırlama:

Sinterleme işlemi sonrası numuneler köpürtmeye tabi tutulmadan önce son işlem olarak sıcak deformasyon uygulanır. Bu işlem esas olarak tozların birbirine bağlanmasını ve yoğunluğun artırılması amacıyla yapılır. Bu çalışmada uygulama olarak sinterlemeye tabi tutulan numuneler, ısı işlem fırınından çıkarılınca soğumadan eksantrik preste deformasyona uğratılmıştır. Bu işlemdeki önemli parametreler deformasyonun miktarı ve sıcaklığıdır. Yapılan çalışmada deformasyon sıcaklığı olarak sinterleme sıcaklığı (450 °C), deformasyon miktarı ise %50 oranında uygulanmıştır. Uygulanan deformasyon tek seferde gerçekleştirilmiştir.

Sandviç köpük üretimi buraya kadar serbest köpük üretimi ile aynı işlemlerden geçer. Bu noktada farklı olarak deformasyon işlemi yapılırken köpük ön malzemesi sandviç plakası ile birlikte deforme edilir. Bu deformasyon haddeleme, presleme gibi çeşitli yöntemlerle yapılabilmektedir. Yapılan ön çalışmalarda haddeleme ve

presleme ile sandviç üretimi gerçekleştirilmiştir. Fakat hem küçük boyutlu sandviçlerin üretim kolaylığı hem de daha standart bir üretim imkanına sahip olmasından dolayı bu çalışmada eksantrik preste deformasyon tercih edilmiştir. Bu işlemde de aynı deformasyon sıcaklığı ve miktarı uygulanmıştır. Deformasyon sonrası oluşan köpürmeye hazır sandviç malzemenin üst levhası kıvrılmış görüntüsü aşağıda (Resim 6.2) verilmiştir.



Resim 6.2. Sıcak deformasyon sonrası sandviç köpük ön malzemesi

Aynı deformasyon sıcaklığı uygulanmakla birlikte sandviç yapılarında deformasyon öncesi daha iyi bir bağlanma gerçekleşmesi için numunelerin oksit tabakalarının giderilmesi gerekir. Bunun için de numuneler deformasyon öncesi soğutulup yüzeylerindeki oksit tabakaları mekanik olarak giderilmiştir. Daha sonra numuneler tekrar sinter sıcaklığına ısıtılarak deforme edilmişlerdir.

6.2.3. Köpürtme ve sandviç köpük üretimi

Uygulanan ön deformasyon sonrası numuneler tam olarak köpürmeye hazır ön malzeme (preform) olarak bahsedilen şekle ulaşmıştır. Deformasyon sonrası bazı numunelerin kenarlarında derin çatlaklar oluşmuştur. Ayrışan H_2 gazlarının bu çatlaklardan kaçmasını engellemek için numunelerin bu kısımları kesilerek çıkartılmıştır. Serbest köpürtme için uzun kenarlarından ikiye bölünerek yaklaşık

30X30mm'lik boyuta ulaşan numuneler çeşitli sıcaklık ve sürelerde köpürtülmüştür. Basma ve mikro yapı incelemesi için hazırlanan numuneler ise standart bir çelik kalıp içerisinde köpürtülerek elde edilmiştir.

Sandviç köpük üretimi de normal köpük üretimine benzer sadece daha önceki işlemde köpürücü ön maddelerin üzerine mekanik kilitlenme ile bağlanmış plakalar da köpürme işlemine katılır. Burada dikkat edilecek nokta sandviç plaka malzemesi ile köpük malzemesi yakın ergime derecelerine sahip olduklarından plakaların ergimeden köpüğün elde edilmesi gerekir. Bu da başta hazırlanan toz karışımları sayesinde köpürtme sıcaklığını düşürerek ve köpürtme süresini uygun ayarlanmasını sağlamıştır. Tez esnasında yapılan çalışmalarda 'Proterm' marka fırın kullanılmış ve köpürtme işlemleri atmosfer ortamında gerçekleştirilmiştir.

6.2.4. Karakterizasyon

Metal köpükleri tanımlamada ve sınıflandırmada çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Fakat köpük malzemelerin halen tam manası ile ifade edilemediğini yani tam bir standarda sahip olmadığını göz önünde bulundurulduğunda karakterizasyon yöntemlerinin hala yetersiz olduğu söylenebilir. Aşağıda çalışmada uygulanan bazı karakterizasyon işlemlerinden bahsedilmiştir.

Yoğunluk, Gözeneklilik ve Lineer Genleşme Tayini:

Üretilen köpüklerin yoğunluğunu tayin etmek için Arşimet prensibinden faydalanılmıştır. Bu ölçüm için 0,0001 g hassasiyetinde Sartorius cp 2243 marka yoğunluk ölçme cihazı kullanılmıştır. Yoğunluğu belirlemek için numunenin serbest haldeki ağırlığı ve yoğunluğu bilinen bir sıvı (su) içerisindeki ağırlığı ölçülmüştür. İlk ölçüm ile numunenin ağırlığı ve ikinci ölçüm ile kullanılan sıvıya oranla hacmi belirlenerek bu sonuçların oranlaması ile de yoğunluk değeri belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde ölçüm sıvısı olarak su kullanılmıştır. Arşimet prensibine göre (Eş. 6.1) yoğunluk aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$d = \frac{m}{v_y - v_s} \quad (6.1.)$$

V_y : Yaş ağırlık (g)

d : Yoğunluk (g/cm³)

V_s : Su içerisindeki ağırlık (g)

m : Ağırlık (g)

Köpüğün gözenekliliği Eş 6.2’de verilen formül ile (p), köpük yoğunluğunun (ρ^*) köpüğün hücre duvarlarını oluşturan malzemenin yoğunluğuna (ρ_s) oranlayarak elde edilir [46].

$$p = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (6.2.)$$

Lineer genleşme oranını hesaplamak için ise Eş. 6.3’te [47] verilen formülden yararlanılmıştır. Bu eşitlikte lineer genleşmeyi tespit etmek için köpüğün köpürtme öncesi ve sonrası yüksekliği ölçülmüştür.

$$le = \frac{h_f - h_0}{h_0} \quad (6.3.)$$

Formülde lineer genleşme (le); köpüğün son boyutu (h_f) ve ilk boyutu (h_0) farkının ilk boyuta kıyaslanması ile elde edilir.

Makro Yapı ve Mikro Sertlik Ölçümü:

Köpük numuneler metalografik muayeneye hazırlamak için kesilmiş ve bakalite (soğuk reçine) alınmıştır. Daha sonra yüzey pürüzlülüğü giderilmek için 600, 800, 1200 mesh’lik SiC zımpara kâğıdı kullanılarak zımparalama işlemlerinden geçirilmiştir. Numuneler mikro yapı görüntüleri için ayrıca 3µm’luk Al₂O₃ süspansiyon kullanılarak parlatılmış ve Keller (100 ml için; 2,5 ml HNO₃ + 1,5 ml HCl + 1,0 ml HF + 95ml su) ile dağlanmış. Yüzeyi klasik metalografik tekniklerle hazırlanan numunelerin, bilgisayar destekli Leica marka mikroskopta 10X büyütme altında gözenek duvar kalınlıkları ölçülmüştür. Ölçümler esnasında kalın ve ince kısımlar ayrı olarak değerlendirilerek ortalamaları alınmış ve hücre duvarı kalınlık aralığı belirlenmiştir. Daha sonra köpüğün çeşitli yerlerinden mikro yapı görüntüleri alınmıştır.

Mikro sertlik ölçümü için ise köpüğün çeşitli yerlerindeki gözenek duvarlarından Shimadzu marka mikro sertlik cihazı altında $HV_{0,1}$ sertlik değerinde Vickers sertlikleri ölçülmüştür. Ölçüm sonrası ortalama değerler belirlenmiş ve bu değerler göz önünde bulundurularak karışım tozlarının etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Basma Testi:

Basma testi için 25x25x25 mm'lik kalıpta köpürtülmüş numuneler kullanılmıştır. Numuneler kalıpta köpürtme öncesi hazırlanırken serbest köpürtmedeki parametreler kullanılmıştır. Köpürtme işlemi sonrası elde edilen köpüklerin yan duvarları kesilmiştir. Köpükleri hazırlamada uygulanan köpürtme sıcaklık ve süreleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Basma testi için hazırlanan numunelerin köpürtme sıcaklık ve süreleri

	Kalıp Köpük	Sandviç Köpük
AlSi7	690°C ve 6 min	690°C ve 12 min
AlSi14	630°C ve 12 min	630°C ve 22 min
AlSi14Cu4,5	630°C ve 12 min	630°C ve 20 min

Verilen süreler yaklaşık değerlerdir. Çünkü kalıpta köpürtmeler kalıp dolduğu zaman soğumaya alınmıştır. Ayrıca üretilen sandviç numunelere de basma testi uygulanmıştır. Test numuneleri Çizelge 6.1'de verilen sıcaklık ve sürelerde üretilmiş, sonrasında 20x20 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. Sandviç basma numunelerinin yükseklikleri ise köpürebilirliklerine göre farklılıklar göstermektedir. Basma testleri Instron (3369 kodlu) marka cihazda 5 mm/min yükleme hızında yapılmıştır. Test cihazına veri olarak numunenin basma yüzeyi boyutu ve yüksekliği girilmiştir. Test sonrasında ise numunenin yüksekliğindeki değişimin (mm) basma kuvvetine (MPa) oranını veren grafik elde edilmiştir.

7. DENEYSEL SONUÇLAR

Ara bağlayıcı kullanılmadan sandviç köpük üretmek için AlSi7, AlSi14 ve AlSi14Cu4,5 karışım tozları hazırlanarak, bunların farklı sıcaklık (590 – 710 °C) ve sürelerde (5 – 45 min) serbest köpürme davranışları incelenmiş ve uygun köpürtme sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu belirlenen sıcaklıklar göz önünde bulundurularak kalıpta üretilen köpük çeşitli yönlerden karakterize edilmiş ve basma testine tabi tutulmuştur. Daha sonra farklı sürelerde üretilen sandviç köpüklerin mikro yapılarına bakılmış ve basma testi yapılmıştır. Yapılan tüm test ve ölçümler göz önünde bulundurularak sandviç üretimi için uygun köpük karışımı belirlenmeye çalışılmıştır.

7.1. Farklı Sıcaklık ve Sürelerde Serbest Köpürtme

7.1.1. Hazırlanan numuneler

Bütün numunelerin daha önce belirlenen oranlarda toz karışımları hazırlanmış ve ortalama 30 dakika karıştırılmıştır. Elde edilen homojen karışimli tozlar tek eksenli hidrolik preste 30x50 mm'lik kalıpta 10 mm kalınlıkta numuneler halinde literatüre paralel olarak 600 MPa'da soğuk olarak preslenmiştir [48]. Preslenerek kısmen yoğunlaştırılmış olan toz blokları TiH₂'ün ayrışma ihtimalinden dolayı 450 °C'de 3 saat süre ile sinterlenmiştir. Literatürde TiH₂'ün atmosfer ortamında yaklaşık olarak 480 °C'de ayrışmaya başladığı ve 650 °C civarında ise ayrışmanın tam olarak gerçekleştiği bildirilmiştir [49]. Farklı bir kaynaktan ise atmosfer ortamındaki ayrışmanın 390 °C üzerinde başladığını belirtilmiştir [50]. Ayrıca TiH₂ parçacıklarının blok numunede hem kısmen basınç altında olması, hem de çevrelerinin kapalı olmasından dolayı ayrışma sonrası salınan gazın ortamdaki uzaklaşmamasının ayrışma grafiğini etkilemesi beklenir. Bu belirsizlikler sebebi ile yapılan ön çalışmalarda 550 °C'de sinterleme denenmiştir. AlSi7 karışımının görüntüsünde sinterleme sonrası herhangi bir değişiklik görülmemiş ve köpürtme işleminde istenilen gözenek yapısına ulaşılmıştır. AlSi14Cu4,5 ve AlSi14 karışımlarında ise sinterleme sonrası kabarmalar oluşmuş ve köpürtme işleminde yeterli köpürme elde edilememiştir. Sonuçta sinterleme sıcaklığı olarak; literatürdeki

550 °C oldukça yüksek, 380 °C ise gereğinden fazla düşük bulunduğundan, 450 °C tercih edilmiştir [51,52]. Sonrasında eksantrik pres kullanılarak sinter sıcaklığındaki numuneler önceki çalışmaya paralel olarak %50 oranında deforme edilmiştir [53]. Deformasyon sonrası numunelerin görüntüleri Resim 7.1’de verilmiştir. Ayrıca benzer parametreleri kullanan bir çalışmada sıcak presleme için 400 °C ile 450 °C sıcaklık aralığının uygun bulunduğu, bu sıcaklık aralığının biraz altı veya üstünün problem teşkil ettiği de belirtilmiştir [28].

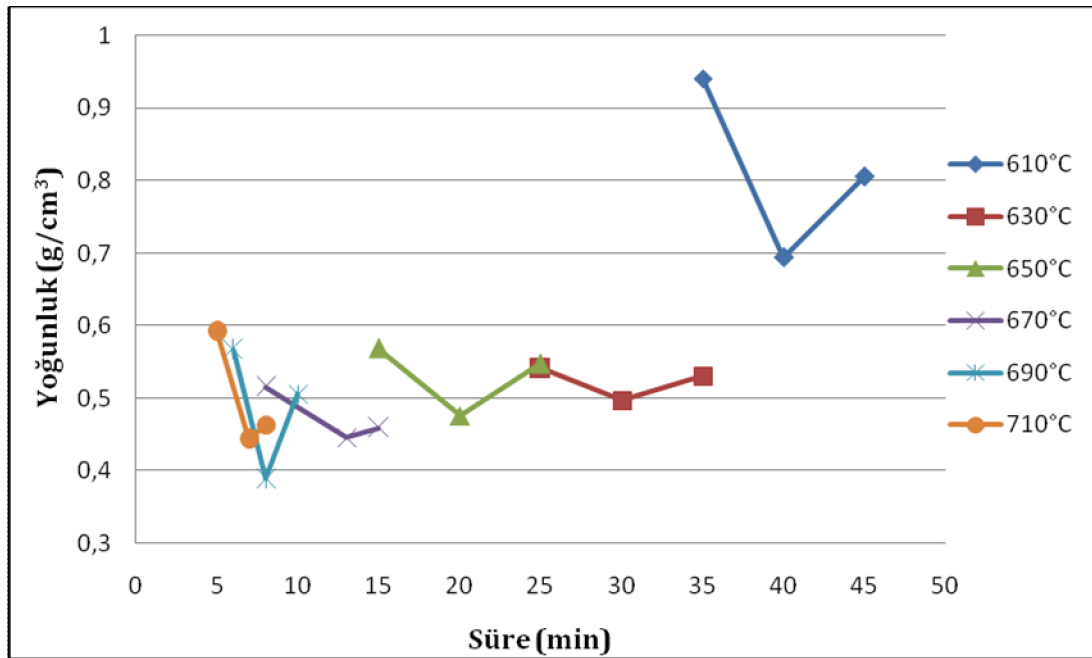


Resim 7.1. 30x50 mm’lik kalıpta preslenmiş, 3 saat sinterlenmiş ve sonrasında %50 sıcak deforme edilmiş köpürmeye hazır ön malzemeler

Deformasyon sonrası numunelerin kenarlarında oluşan çatlaklar Resim 7.1’de görülmektedir. Oluşan çatlakların miktar ve derinliğine bakıldığında AlSi7 alaşımlı bloğun diğer alaşımlardan daha sünek davrandığı görülmektedir. Son işlem olarak çatlaklar kesilerek giderilmiş ve numuneler ortalarından ikiye bölünerek yaklaşık 30 mm X 30 mm’lik köpürmeye hazır ön malzemeler elde edilerek köpürtülmüştür.

7.1.2. AlSi7 karışımının serbest köpürme davranışı

Daha önce belirtilen şartlarda hazırlanan ön malzemelerin köpürtme işlemi 610 °C ve 710 °C arasında 20 °C’lik aralıklar ile 6 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Köpürtme süreleri ise düşük sıcaklıklarda 5 dakika aralıklarla, yüksek sıcaklıklarda ise 3 ve 2 dakika aralıklarla değiştirilmiştir. Bu süreler fırın içerisindeki köpürme işlemi izlenerek yaklaşık köpürtmenin başlangıçları, en yüksek boyuta ulaşması ve çökmeye başlamasına rastlayacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sebeple yüksek sıcaklıklarda süre farkı kısaltılmıştır (Şekil 7.1).

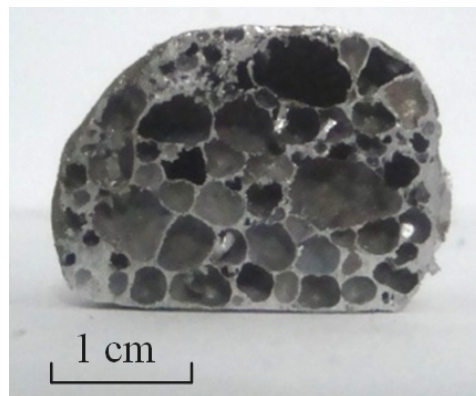


Şekil 7.1. Köpürtme sıcaklık ve süresinin AlSi7 karışımı köpüğün yoğunluğu üzerine etkisi

Şekil 7.1'deki grafiğe baktığımızda 610 °C hariç, diğer tüm sıcaklıklarda en düşük yoğunluk değerlerinin birbirlerine yakın olduğu ve 690 °C'ye kadar sürekli düştüğü görülmektedir. Ayrıca 0,389 g/cm³ ile en düşük yoğunluk 690 °C'de, 8 dakika köpürtme sonrası elde edilmiştir. Yoğunluğun yanı sıra gözenek morfolojisi de önemli bir kriterdir. Bunun için numuneler köpürme eksenine paralel kesilerek makro görüntüleri alınmıştır. Aşağıdaki fotoğraflarda (Resim 7.2) her köpürme sıcaklığının en düşük yoğunluk halindeki makro yapı fotoğrafları verilmiştir.



610 °C ve 40 min



630 °C ve 30 min

Resim 7.2. AlSi7 köpüklerin farklı sıcaklıklarda ve en düşük yoğunluklardaki makro fotoğrafları



650 °C ve 20 min



670 °C ve 13 min



690 °C ve 8 min



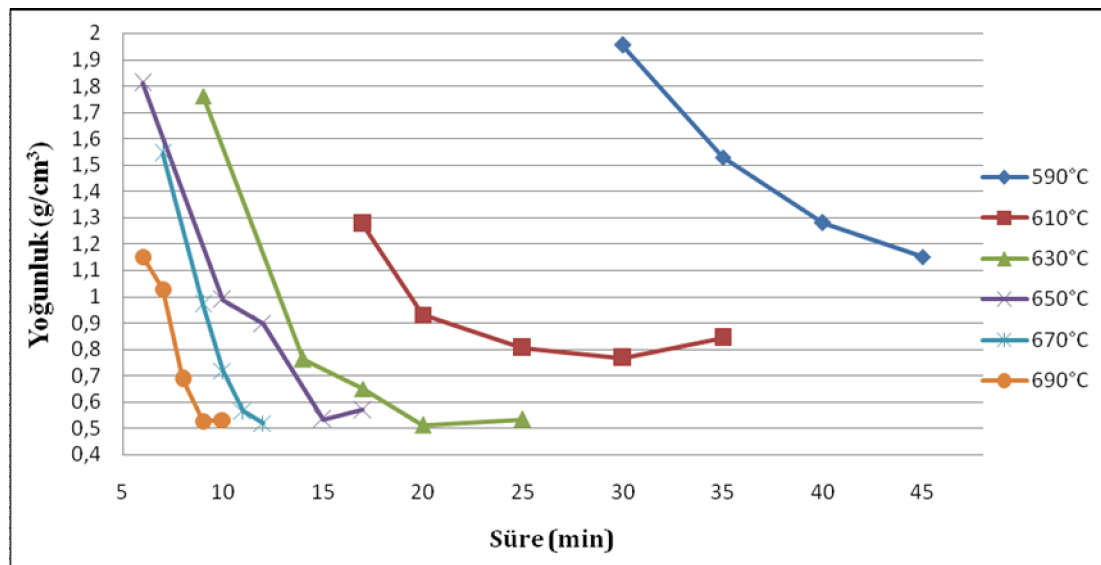
710 °C ve 7 min

Resim 7.2. (Devam) AlSi7 köpüklerin farklı sıcaklıklarda ve en düşük yoğunluklardaki makro fotoğrafları

Fotoğraflar incelendiğinde 650 °C, 670 °C ve 710 °C’de üretilen köpüklerin birbirine oldukça benzer gözenek boyut ve dağılımına sahip olduğu görülmektedir. 610 °C ve 630 °C’de gözenek dağılımının pek homojen olmadığı, 690 °C’de ise ortalandaki gözeneklerin kenarlara göre daha fazla büyüdüğü ve üst kısımlarda kısmen çökmelerin başladığı görülmektedir. Genel olarak artan köpürtme sıcaklığı ile birlikte gözenek şekil, boyut ve dağılımları iyileşmektedir. Artan köpürtme sıcaklığının temel olarak numunelerin daha kısa sürede sıvı faza geçmelerini sağlaması ve sıvı faza geçtiklerinde de sıvının viskozitesini azaltması beklenir. Bu sonuç köpük için kısmen olumludur fakat sıvı – gaz karışımı gibi dinamik bir yapı için tam manası ile belirleyici bir faktör değildir.

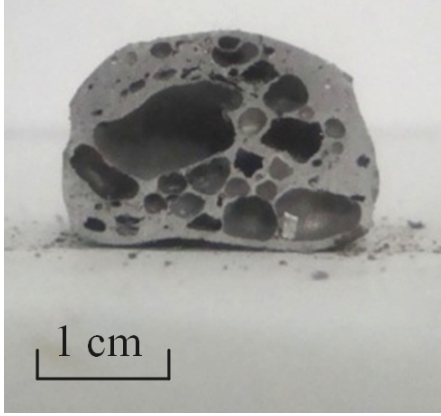
7.1.3. AlSi14 karışımının serbest köpürme davranışı

AlSi14 karışımı AlSi7'ye göre ötektik üstü alaşım olduğundan ergime sıcaklığında fazla bir fark olmamakla birlikte daha düşüktür [54]. Bu sebeple köpürtme işlemine AlSi7 karışımındakine göre daha düşük sıcaklıktan (590 °C) başlanılmıştır. Bu sıcaklıkta artan süre ile birlikte yoğunluğun düştüğü görülmüş fakat bu boyuttaki bir numune için 45 dakika köpürtme işlemi yeterince uzun olduğundan süre daha fazla uzatılmamıştır. Aslında literatürden faz diyagramına bakıldığında AlSi14'ün yaklaşık 577 – 610 °C arasında katı sıvı karışımı bir fazda yani köpürebilir olduğu görülür [54]. Fakat önceki çalışmalar göstermiştir ki atmosfer ortamında 480 °C de 3 saatlik ısıtıl işlem sonrası TiH_2 'ün yüzeyinde 100µm kalınlığında TiO_2 ve Ti_3O oksit tabakaları oluşmaktadır [50]. Ayrıca ergiyik metalin hücre duvarı ve plateau sınırları boyunca drenajını kısıtlayan bir ağ örgüsü şeklinde bulunması sebebi ile avantaj sağlayan oksit fazı aynı zamanda köpüğün genleşmesini de engeller [55]. Bu gibi sebeplerle köpük oluşumu beklenenden daha üst sıcaklıklarda gerçekleşir. En yüksek sıcaklık ise 690 °C olarak alınmıştır. Çünkü bu sıcaklıkta ölçümler bir dakikalık aralıklarla yapılmış ve aşağıdaki şekilde de görüldüğü gibi bariz yoğunluk değişiklikleri ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 7.2'de grafik olarak gösterilmiştir.

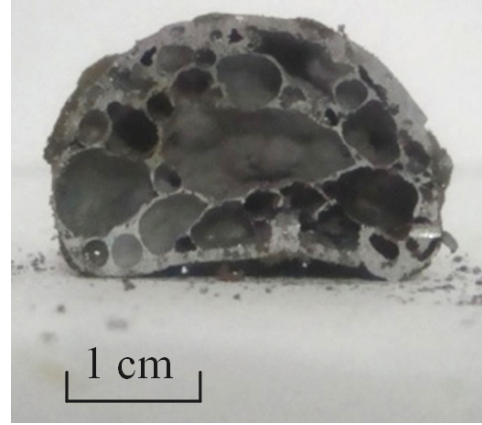


Şekil 7.2. Köpürtme sıcaklık ve süresinin AlSi14 alaşımlı köpüğün yoğunluğuna etkisi

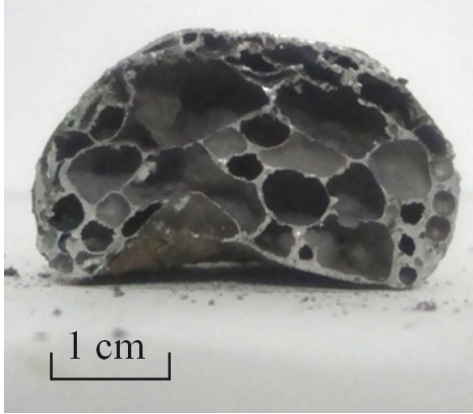
Resim 7.3'te AlSi14 alaşımlı köpüklerin tüm köpürme sıcaklıklarında elde edilen en düşük yoğunluklu numunelerinin makro yapı fotoğrafları gösterilmiştir.



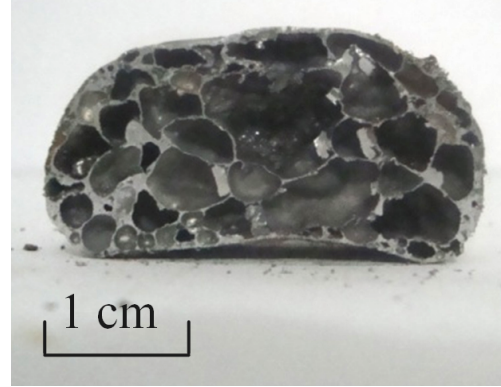
590 °C ve 45 min



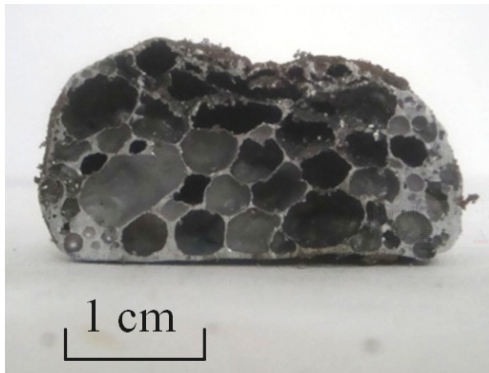
610 °C ve 30 min



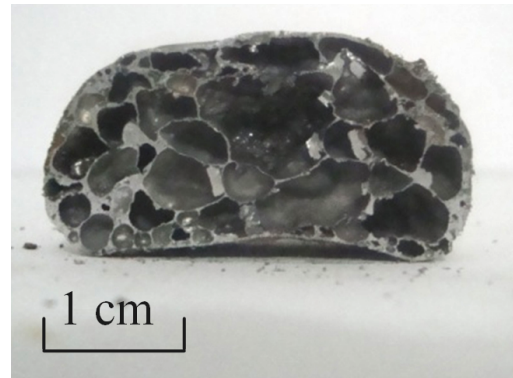
630 °C ve 20 min



650 °C ve 15 min



670 °C ve 12 min



690 °C ve 9 min

Resim 7.3. AlSi14 köpüklerin farklı sıcaklıklarda ve en düşük yoğunluklardaki makro fotoğrafları

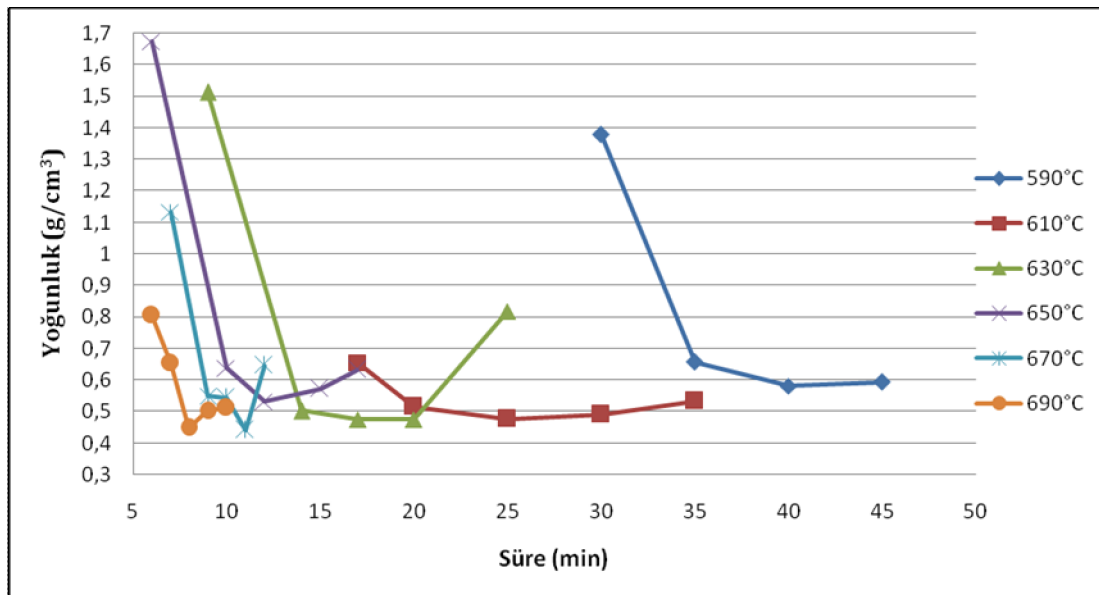
Köpürtmeye genellikle en düşük yoğunluk elde edilip yükselmeye başlayana kadar devam edilmiştir. Fakat 670 °C’de yoğunluğun tekrar yükselmesi beklenmemiştir. Çünkü Resim 7.3’te görüldüğü gibi en düşük yoğunluk anında bariz bir şekilde çökme başlamıştır. Makro yapı görüntüleri incelendiğinde, 590 °C’de elde edilen köpüğün gözeneginin oldukça yetersiz olduğu görülmektedir. En düşük yoğunluk 630 °C’de 20 dakikalık köpürtme süresinde 0,512 g/cm³ olarak elde edilmiştir. Genel olarak gözenek morfolojisinin, yine artan sıcaklık ile iyileştiği görülmektedir. Fakat gözenek yapıları AlSi7 alaşımlı köpüklere kıyasla daha kötüdür. Aynı zamanda en düşük yoğunluk değerleri de AlSi7’den daha düşüktür. Sonuçta sadece bu değerlere bakarak %7’lik ilave silisyumun pek avantajı görülmemektedir.

Literatürde de toz metalurjisi yöntemi ile köpük üretiminde alüminyuma silisyum ilavesinin oldukça iyi etkileri olduğu bildirilmiştir. Ayrıca ağırlıkça %8 Si ilavesinin köpürme ve gözenek morfolojisi yönünden en iyi sonucu verdiği ve artan Si oranı ile bu özelliklerin düştüğü belirtilmiştir ki elde edilen sonuçlar da buna paraleldir [56].

7.1.4. AlSi14Cu4,5 karışımının serbest köpürme davranışı

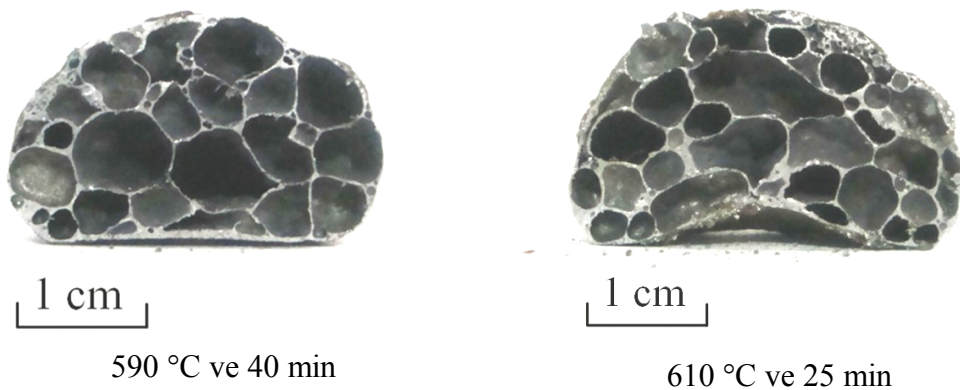
Alüminyum köpüklerde ergime sıcaklığını düşürmek için katılan diğer bir alaşım elementi de bakırdır. Alüminyum bakır faz diyagramlarında ötektik nokta % 33 Cu olarak verilmektedir. Ötektik sıcaklık (548,2 °C) Al-Si alaşımına oranla daha düşüktür [54]. Fakat ilave alaşım elementi çok daha fazladır ve bakırın yoğunluğu köpük için dezavantajdır.

Bu karışımda da 590 °C’de köpürtülmeye başlanmış, fakat 45 dakikalık süre AlSi14’e göre oldukça yeterli gelmiş ve yoğunluğun en düşük değere ulaşip tekrar yükselmesi sağlanmıştır. Bu da katılan % 4,5’lik bakırın alaşım ergime sıcaklığını düşürücü bir etki yaptığını göstermektedir. Üst sıcaklık değeri ise yine kısa sürede değişimlere neden olan 1 dakikalık köpürtme aralıkları sebebi ile 690 °C’de sonlandırılmıştır. Köpürme sıcaklık ve süresinin AlSi14Cu4,5 alaşımlı köpüğün yoğunluğu üzerine etkisi Şekil 7.3’te grafiksel olarak gösterilmiştir.

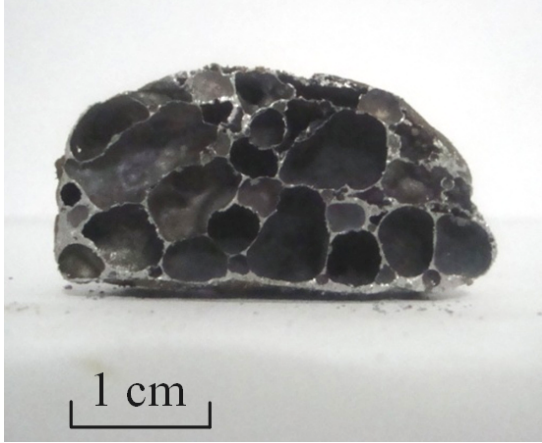


Şekil 7.3. Köpürtme sıcaklık ve süresinin AlSi14Cu4,5 karışımlı köpüğün yoğunluğuna etkisi

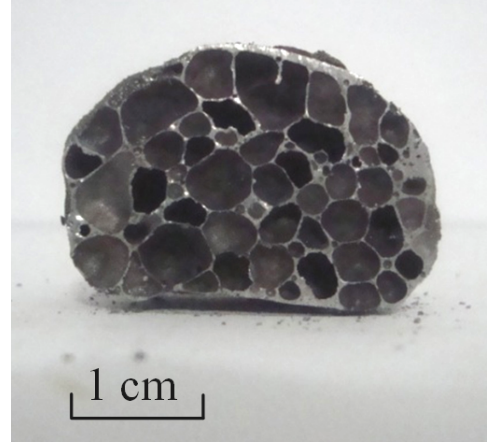
Şekil 7.3'teki grafikte ilave edilen % 4,5 bakırın AlSi14 alaşımına oldukça iyi özellikler sağladığı görülmektedir. Özellikle en düşük köpürtme sıcaklığının (590 °C) yanı sıra diğer sıcaklıklarda da elde edilen en düşük yoğunluğa çok büyük etkileri görülmektedir. Ayrıca ölçülen en düşük yoğunluk değerlerinin birbirine yakınlığı da dikkat çekicidir. Bu karışımda en düşük yoğunluklu köpük 670 °C'de 11 dakikada üretilmiş ve 0,442 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Bu değer AlSi14 karışımına göre düşük fakat AlSi7'ye göre yüksektir. Resim 7.4'te AlSi14Cu4,5 alaşımlı köpük malzemelerin gözenek yapıları görülmektedir.



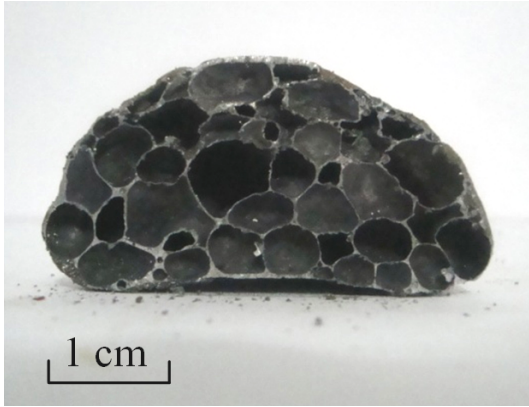
Resim 7.4. AlSi14Cu4,5 köpüklerin farklı sıcaklıklarda ve en düşük yoğunluklardaki makro fotoğrafları



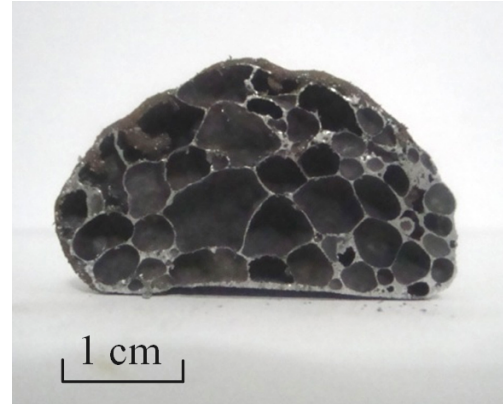
630 °C ve 17 min



650 °C ve 12 min



670 °C ve 11 min

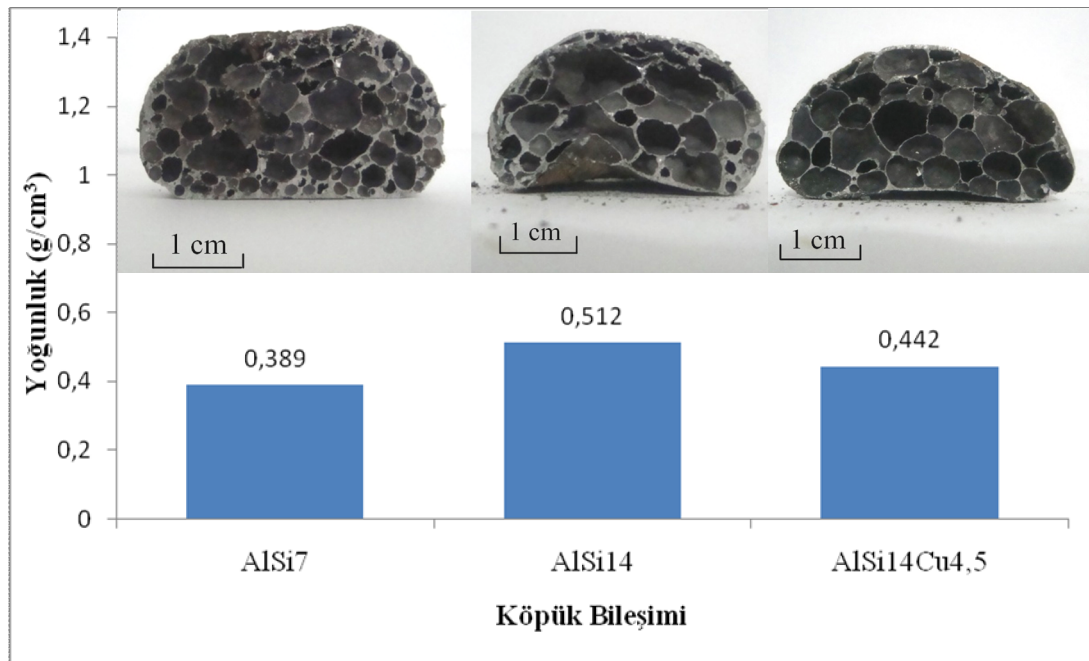


690 °C ve 8 min

Resim 7.4. (Devam) AlSi14Cu4,5 köpüklerin farklı sıcaklıklarda ve en düşük yoğunluklardaki makro fotoğrafları

Köpüklerin makro yapı görüntüleri incelendiğinde yaklaşık her sıcaklıkta kullanıma uygun ve birbirine benzer gözenek yapılarının olduğu görülmektedir. Ayrıca süre biraz uzun olsa da 590 °C'de bile kullanılabilir köpükler üretilmektedir. Bu alüminyum plaka kullanılarak üretilen sandviç köpük için oldukça önemli bir avantajdır. Bunun yanında yüksek sıcaklıklarda da iyi bir gözenek yapısı sergilemekte ve köpürtme süresi kısalmaktadır. Literatürde homojen gözenek dağılımına sahip köpükler üretebilmek için hızlı köpürtme ve hücre duvarı kararlılığının önemli olduğu belirtilmiştir [57]. Bu noktadan bakıldığında ilave bakırın, köpüğün ergime derecesini düşürüp köpük oluşumunu hızlandırmasının morfoloji üzerinde etkisi olması beklenebilir. Ancak köpürtme atmosferindeki gazların bile bariz bir şekilde etkilediği bir deney için sonuçları bir iki faktöre

bağlamak zordur [58]. Ayrıca tüm alaşımlarda literatürde de belirtildiği gibi 0,6 TiH₂ miktarı ile yeterli bir köpürme elde edilmiştir [59]. Şekil 7.4'te AlSi7 (690 °C, 9 min), AlSi14 (630 °C, 20 min) ve AlSi14Cu4,5 (670 °C, 11 min) alaşımlı köpüklerin deney sonrası gözlemlenen en düşük yoğunluk değerleri ve bu değerlerdeki optik görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.4. Farklı alaşımlardaki köpüklerin en düşük yoğunluk değerleri ve optik görüntüleri

7.2. Köpüğün Karakterizasyonu

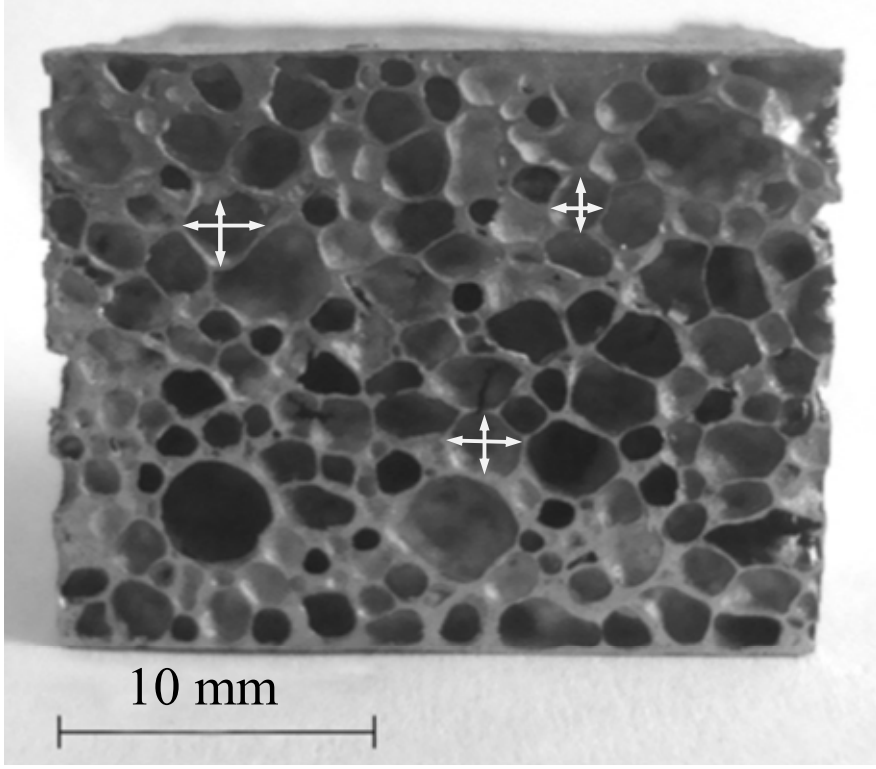
Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi metal köpüklerde gözenegin boyutu, şekli, hücre duvar kalınlığı gibi parametreler malzemenin birçok özelliğini etkilemektedir. Bu sebeple gözeneklerin incelenmesi, köpüğün tanımlanmasında ve bazı özelliklerinin yorumlanmasında önemli bir yere sahiptir. Bu amaç ile sandviçte çekirdek olarak kullanılan alaşımlı köpükler sabit bir kalıp içerisinde köpürtülerek incelemeye tabi tutulmuştur. Yaklaşık eşit boyutta köpürmeye hazır ön malzeme kullanılarak ve eşit boyutta köpükler üretilerek benzer yoğunluklar elde edilmeye çalışılmıştır. Daha sonra bu köpüklerin, ortalama gözenek boyutu, özgül yoğunluğu

ve hücre duvar kalınlığı tespit edilmiştir. Ayrıca serbest köpürtme uygulanarak lineer genleşmeleri de belirlenmiştir.

Literatürde bildirildiği gibi köpüğün büyümesi istatistiksel bir süreçtir ve başlangıç değişkenleri mümkün olduğunca aynı tutulsa bile aynı özellikte iki köpük elde etmek mümkün değildir. Köpürmeye hazır numune içerisindeki tesadüfî toplanmalar, numune ile ısı kaynağı arasındaki önceden tahmin edilemeyen ısı transferi, kullanılan deney düzeneğinin farklı kullanmalarda farklı davranması gibi etkenler buna sebep olarak sayılabilir [28]. Bu sebeple elde edilen karakterizasyon verileri kullanılabilir sabit değerler olarak değil, kıyaslamaya yönelik yorumsal sonuçlar olarak görülmelidir. Ancak sistematik bir fabrikasyon üretime geçilmesi durumunda birbiri ile mukayese edilebilir yapı ve özellikte köpük üretmek mümkün olabilir.

7.2.1. Gözenek yapıları

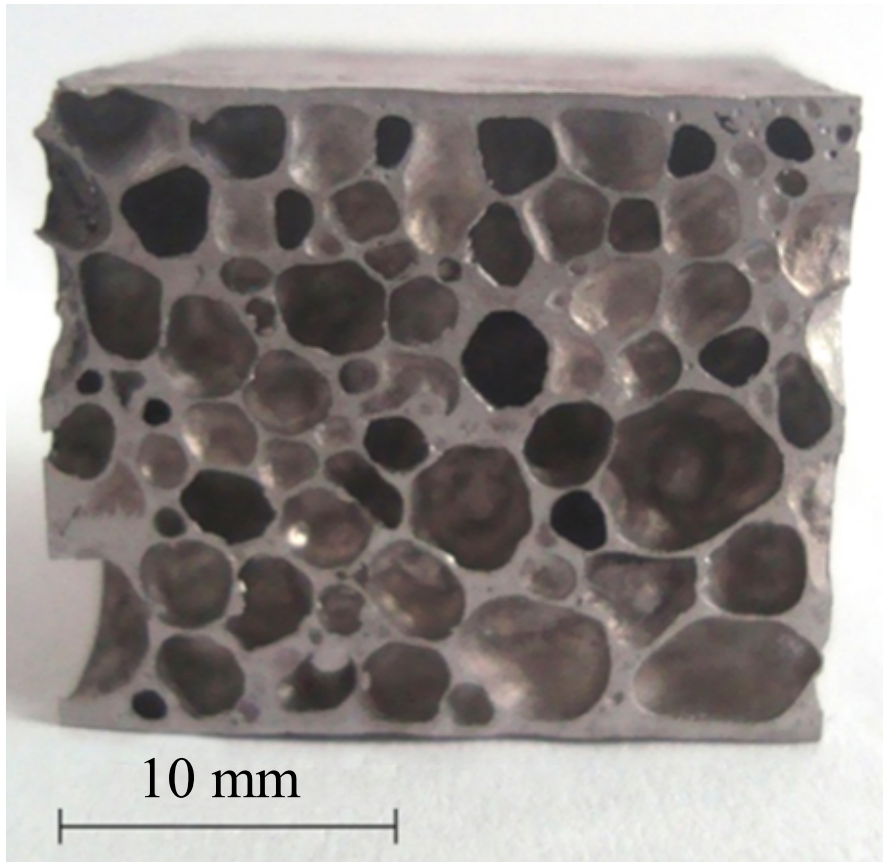
İncelenen numuneler kalıp içerisinde köpürtülmüş ve köpürme eksenine paralel olan bir kenarı kesilmiştir. Köpürme sıcaklıkları daha önce yapılan serbest köpürtme deneyinin sonuçları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Köpürtme süreleri ise kalıbın dolma zamanı olarak belirlenmiştir. Köpüklerin gözenek yapılarını tanımlamak için ortalama boyutlarına, boyut dağılımlarına ve hücre duvarı kalınlıklarına bakılmıştır. Hücre duvar kalınlığının belirlenmesi için numunelerin bilgisayar destekli mikroskop altında ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm yapılırken farklı gözenek duvarları arasındaki aynı zamanda da aynı duvarın çeşitli noktaları arasındaki kalınlık farklılıklarından dolayı ölçüm değerleri kalın ve ince bölge olarak iki guruba ayrılmıştır. Gözenek boyutları ise; çok büyük ve küçük gözenekler hariç tutularak, optik görüntünün on kat büyütme sonrası ölçülmüştür. Ölçümler yapılırken; Resim 7.5'te oklar ile gösterildiği gibi gözeneğin yatay ve dikey olarak uzun kısımları ölçülerek ortalaması alınmıştır. Kalıp içerisinde üretilen AlSi7 alaşımlı köpüğün makro görüntüsü Resim 7.5'te gösterilmiştir.



Resim 7.5. AlSi7 alaşımlı köpüğün optik görüntüsü

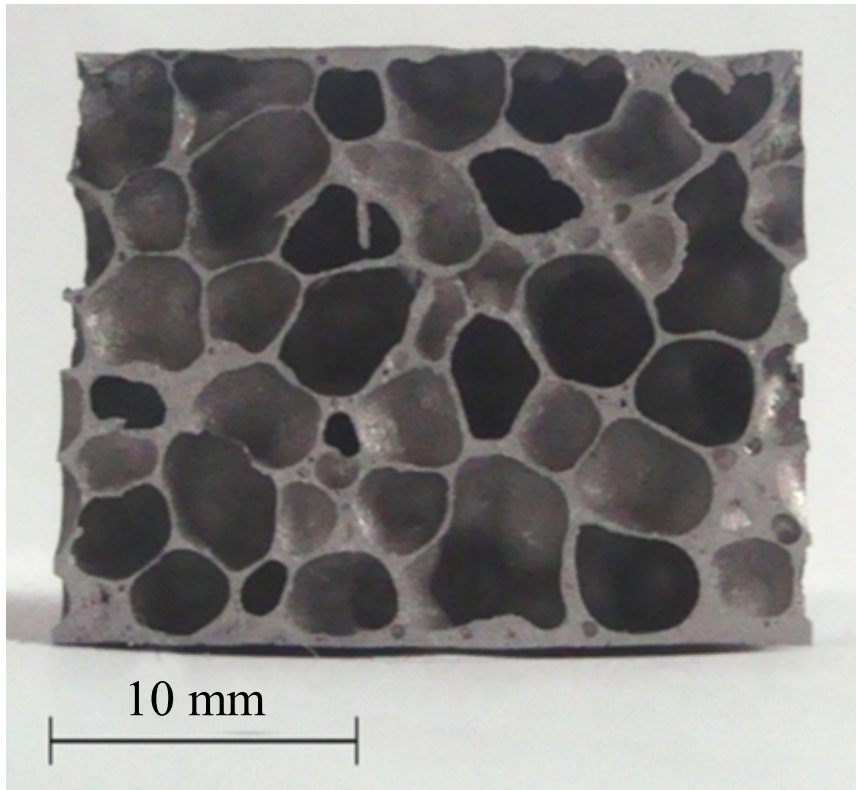
Resim 7.5'te görülen AlSi7 alaşımlı köpük 690 °C'de üretilmiştir. Köpük genel olarak serbest köpürtme deneyinde de gözleendiği gibi kısmen homojen bir gözenek dağılımı göstermektedir. Yapılan ölçümlerde gözenek boyutu ortalama olarak 2,26 mm bulunmuştur. Hücre duvarı kalınlığı ise ortalama olarak kalın bölgelerde 82 μm , ince bölgelerde 57 μm olarak ölçülmüştür.

Aynı amaç için kalıpta hazırlanan AlSi14 alaşımlı köpük, serbest köpürmede elde edilen en düşük yoğunluktan dolayı 630 °C'de üretilmiştir. Bu alaşımdaki numuneler serbest köpürmede genelde homojen bir gözenek dağılımı göstermemesine rağmen Resim 7.6'da görüldüğü gibi kalıp içerisinde köpürmede daha iyi sonuç vermiştir. Aşağıdaki Resim 7.6'da kalıp içerisinde köpürtülerek hazırlanan AlSi14 alaşımlı köpüğün optik görüntüsü verilmiştir.



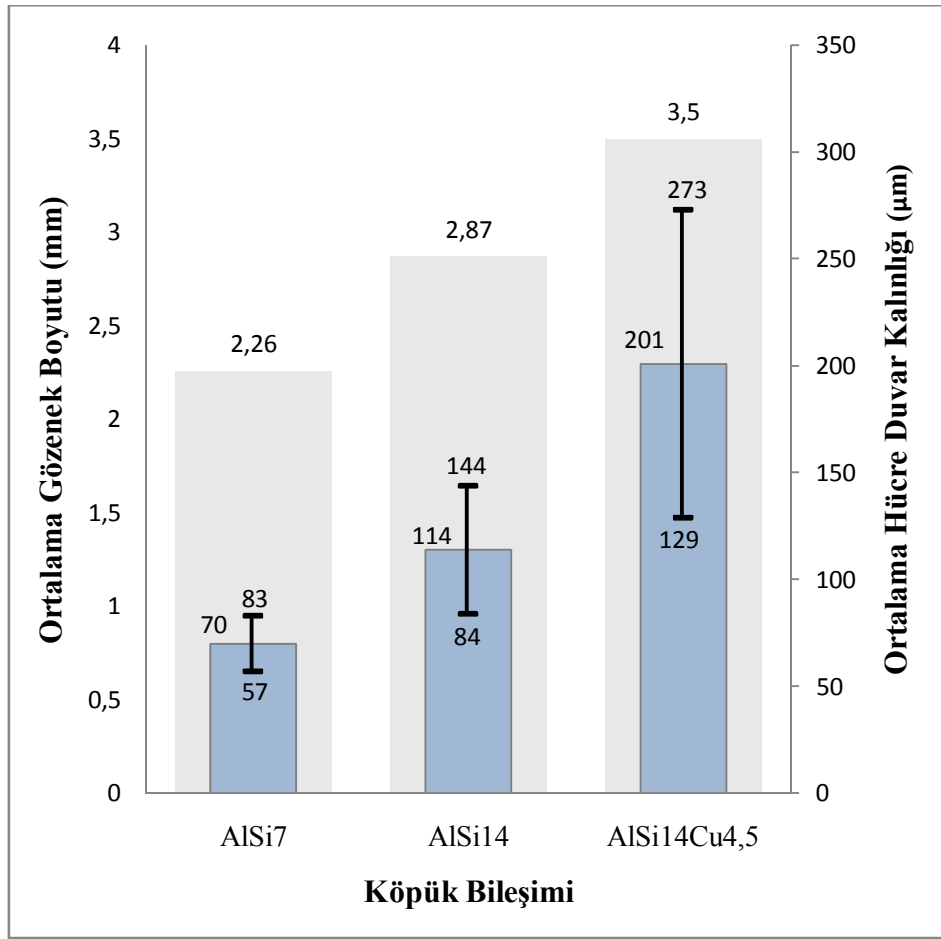
Resim 7.6. AlSi14 alaşımlı köpüğün optik görüntüsü

Resimde de görüldüğü gibi büyük ve küçük gözenekler arasındaki boyut farkı oldukça azdır ve ortalama boyutları ortalama 2,87 mm'dir. Hücre duvarlarının kalınlığı ise ince bölgelerde 84 μm ve kalın bölgelerde 145 μm olarak ölçülmüştür. Bu ölçümleri AlSi7 karışımlı köpük ile kıyasladığımızda hem ortalama hücre boyutunun arttığını hem de hücre duvarlarının kalınlaştığını görülmektedir. Teorik olarak düşünüldüğünde birbirine yakın yoğunluktaki köpüklerde homojen gözenek dağılımlı bir yapıda hücre duvarının kalınlaşması için gözenek boyutunun artması ve sonuçta birim alandaki gözenek ve hücre duvarı sayısının azalması gerekir. Yapılan ölçümlerde de bu etki gözlemlenmiştir. Ayrıca gözenek boyutu ve hücre duvarı kalınlığının köpüğün mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi literatür kısmında kısmen bahsedilmiştir. Aşağıdaki Resim 7.7'de kalıp içerisinde köpürtülen AlSi14Cu4,5 alaşımlı köpüğün optik görüntüsü verilmiştir.



Resim 7.7. AlSi14Cu4,5 alaşımlı köpüğün optik görüntüsü

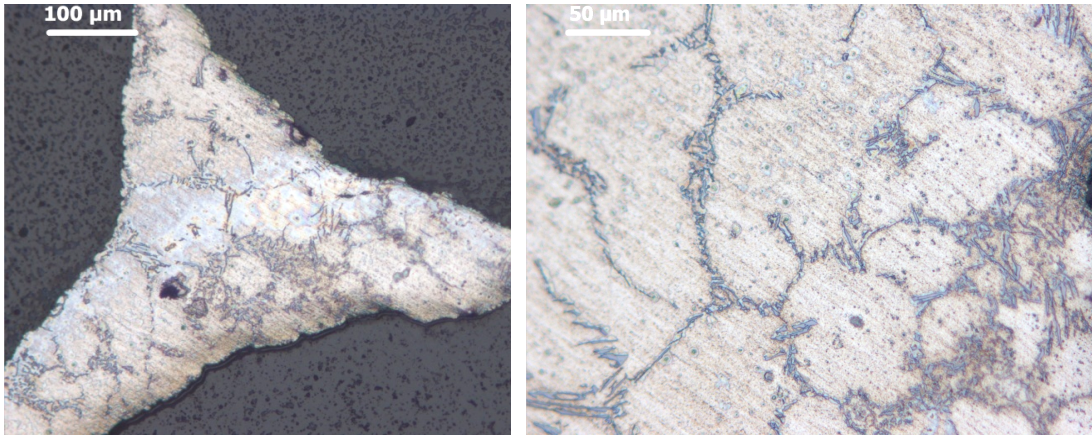
AlSi14Cu4,5 alaşımından oluşan bu köpük de 630 °C’de üretilmiştir. Serbest köpürtmelerde en düşük yoğunluk 670 °C’ de elde edilmiştir. Fakat sandviç köpük üretiminde düşük sıcaklığın avantaj sağlayacağı düşünüldüğünden, köpürtme süresi, köpük yoğunluğu ve gözenek dağılımları göz önünde tutularak köpürtme sıcaklığı 630 °C olarak belirlenmiştir. Gözenek dağılımı, önceki deneyler göz önünde tutulduğunda beklenildiği gibi oldukça homojendir. Yapılan ölçümlerde gözeneklerin ortalama boyutu 3,5 mm ve hücre duvar kalınlıkları da ince kısımlarda 125 μm ve kalın kısımlarda 295 μm olarak belirlenmiştir. Üç farklı karışımdaki köpük içerisinde en büyük gözenek boyutu ve hücre duvarı kalınlığı bu numunede elde edilmiştir. Çalışmada üretilen köpük malzemelerin gözenek boyutu ve hücre duvar kalınlıkları Şekil 7.5’te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.5. Farklı bileşimlerdeki köpüklerin ortalama gözenek boyutu ve ortalama hücre duvar kalınlıkları

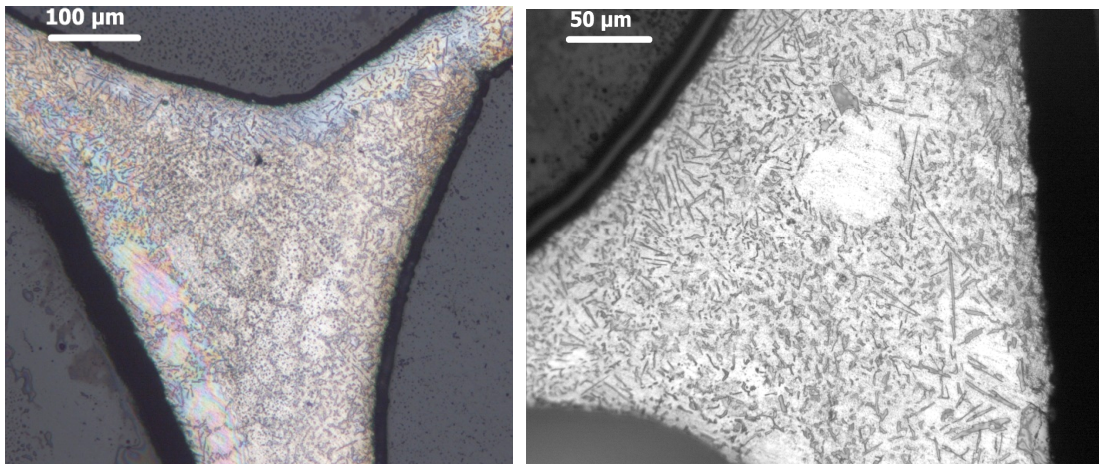
7.2.2. Köpük duvarlarının mikro yapıları

İlave edildiği köpüğün ergime noktası, gözenek morfolojisi, sünekliği gibi birçok özelliğini değiştiren alaşım elementleri bu değişimlere temel oluşturan gözenek mikro yapısını da etkiler. Bu etkiyi görebilmek için üç farklı karışımdan elde edilen köpük, deneysel çalışmalarda anlatıldığı şekilde metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Köpük üretiminde alüminyum içerisine katılan ağırlıkça %7 oranında silisyumun, gözenek mikro yapısına etkisi aşağıdaki fotoğraflarda (Resim 7.8) görülmektedir.

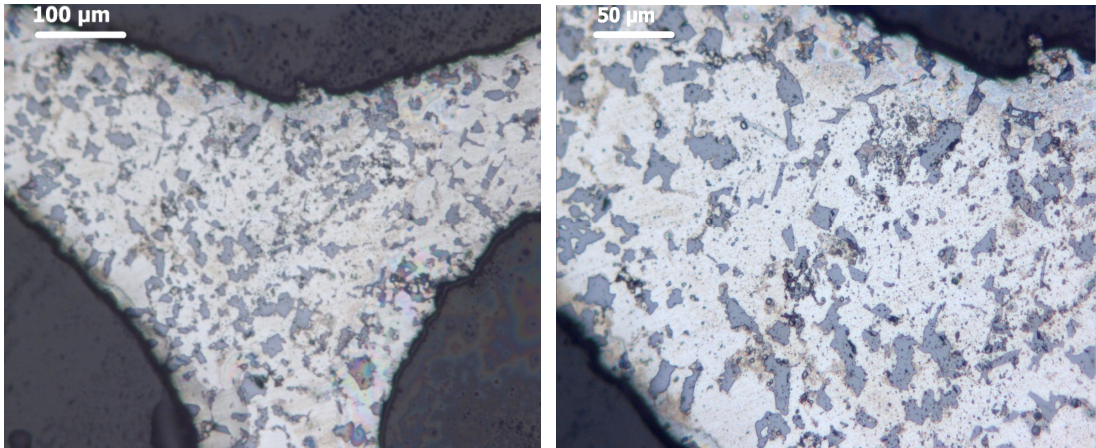


Resim 7.8. 690 °C’de 12 dakikada üretilen AlSi7 alaşımlı köpükte üç hücrenin kesişim noktasının mikro yapı görüntüsü

Mikro yapı fotoğraflarında büyük beyazlıklar olarak göze çarpan birincil alfa (α) alüminyumun, iğnemsil silisyum ve alüminyum heterojen bölgesi tarafından çevrelendiği görülmektedir. Gözlemlenen yapı tipik döküm Al-Si alaşımının mikro yapısı ile benzerlik göstermektedir. İğnemsil silisyumca zengin fazın durumu soğuma hızı ve impurite gibi çeşitli etkilere göre değişebilir. Ötektik üstü AlSi14’te (Resim 7.9) iğnemsil silisyum ve alüminyumun oluşturduğu heterojen yapı neredeyse tamamını kaplamıştır. Sadece bazı kısımlarda birinci α -Al dentritleri görülmektedir [60, 61, 28].



Resim 7.9. 630 °C’de 22 dakikada üretilen AlSi14 alaşımlı köpükte üç hücrenin kesişim noktasının mikro yapısı



Resim 7.10. 630 °C’de 20 dakikada üretilen AlSi14Cu4,5 alaşımlı köpükte üç hücrenin kesişim noktasının mikro yapısı

Diğer karışımlardan farklı olarak içerisinde ağırlıkça %4,5 oranında bakır bulunduran köpüğün mikro yapısı incelendiğinde (Resim 7.10) ilk fark edilen iğnemsî Si fazının ortadan kaybolmasıdır. Bunun yeni çökeltilerin oluşması ile gerçekleştiği düşünülmektedir. Literatürde içerisine %4 Cu ilave edilmiş 6061 alüminyum alaşımı kullanılarak köpük üretilmiş ve SEM görüntüleri üzerinde EDS analizi yapılmıştır. XRD sonuçlarından da yararlanarak yapıda; Al_4Cu , $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ gibi intermetalikler ve hücre duvarlarında da Al_2O_3 parçacıkları gözlemlenmiştir. Al_4Cu intermetalığının köpük yapısının stabilizasyonunda önemli bir etkisi olduğundan bahsedilmiş ve hücre duvarlarında rastlanan Al_2O_3 parçacıklarına hücre duvarı matrisinde rastlanılmamıştır [62].

Mikro yapılar genel olarak değerlendirildiğinde Al, Si ve Cu’nun saf tozlarından, alaşımlı köpük sorunsuz bir şekilde üretilmektedir. Çünkü köpürtme esnasında alaşım elementleri hızlıca yerlerini almakta ve kısa bir süre sonrada homojen bir mikro yapı gözlenmektedir. Bu sonuç alaşımlı köpük üretiminde maliyet verimliliği yönünden oldukça önemlidir [28].

7.2.3. Göreceli yoğunluk ve lineer genleşme

Metal köpükleri karakterize eden özelliklerden birisi de göreceli yoğunluktur. Göreceli yoğunluk (ρ^*/ρ_s) köpük malzemenin yoğunluğunun (ρ^*) hücre duvarını oluşturan malzemenin yoğunluğuna (ρ_s) oranı ile ifade edilir. Metal köpükleri tanımlarken göreceli yoğunluğun kullanılması ile farklı alaşımlardaki alüminyum köpükler kendi aralarında veya kurşun köpük, titanyum köpük gibi gerçek yoğunlukları birbirinden farklı köpükler ile kıyaslanabilir. Hücre duvarını oluşturan malzemenin teorik yoğunluğunu (Eş. 7.1) belirlemek için; köpüğü oluşturan malzemenin yoğunluğu (d_k), karışımı oluşturan malzemelerin kütleleri toplamının ($m_1+m_2+m_n$) hacimleri ($v_1+v_2+v_n$) toplamına bölünmesi ile elde edilir;

$$d_k = (m_1 + m_2) / (v_1 + v_2) \quad (7.1)$$

$$d(\text{AlSi7}) = 93 + 7 / [(93 / 2,698) + (7 / 2,33)] = 2,66 \text{ g/cm}^3$$

$$d(\text{AlSi14}) = 86+14 / [(86/2,698) + (14/2,33)] = 2,64 \text{ g/cm}^3$$

$$d(\text{AlSi14Cu4,5}) = 81,5+14+4,5 / [(81,5/2,698) + (14/2,33)+(4,5/8,92)] = 2,724 \text{ g/cm}^3$$

İkinci işlem olarak köpüğün yoğunluğu tespit edilir. Bunun için köpürtme sonrası Arşimet prensibi temel alınarak uygulanan, yoğunluğu bilinen sıvı içerisinde ve kuru olarak tartma yöntemi kullanılır. Bu yöntem ile ölçülen yoğunlukların ortalama değeri; AlSi7: 0,523 g/cm³, AlSi14: 0,645 g/cm³, AlSi14Cu4.5: 0,620 g/cm³ Bunlara göre Eş. 7.2' deki formüle göre göreceli yoğunluklar;

$$\rho = \rho^*/\rho_s \quad (7.2)$$

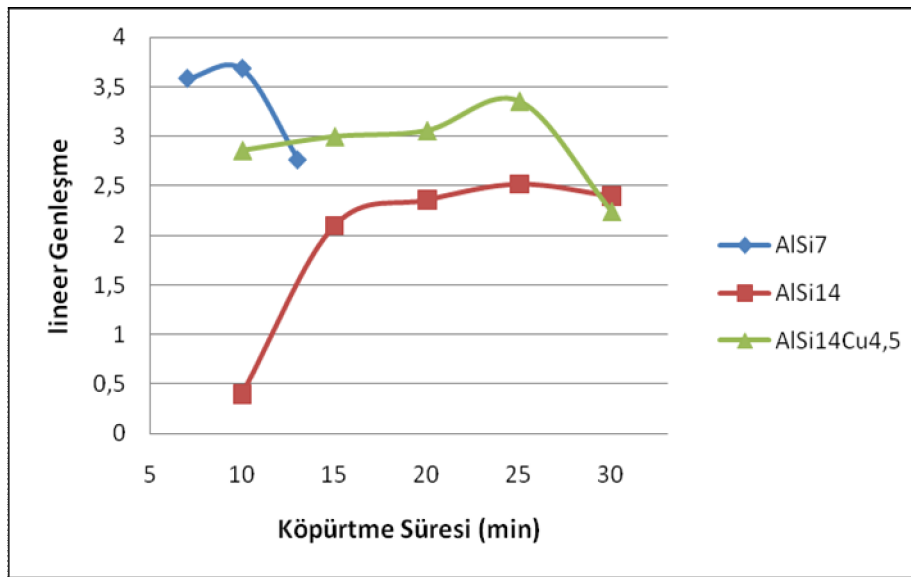
$$\rho(\text{AlSi7}) = 0,523 / 2,66 = 0,196$$

$$\rho(\text{AlSi14}) = 0,645 / 2,64 = 0,244$$

$$\rho(\text{AlSi14Cu4,5}) = 0,62 / 2,724 = 0,227$$

Hesaplanan değerler göz önüne alındığında en düşük göreceli yoğunluk AlSi7 alaşımında elde edilmiştir. Ayrıca AlSi7 ve AlSi14Cu4,5 alaşımlı köpüklerin üretildikleri karışım tozlarının yoğunluk farkından dolayı, aralarındaki 0,1 g/cm³'lük

yoğunluk farkı göreceli yoğunlukta 0,03'e düşmüştür. Bu da göstermektedir ki değerlendirme yapılırken sadece köpük yoğunluğuna bakmak yanlış bir yaklaşımdır. Lineer genleşme köpüğün yükseklik değişiminin ilk yüksekliğine oranını ifade eder. Aşağıdaki Şekil 7.6'da üç farklı köpüğün daha önce belirlenen sıcaklıklarda (690 °C, 630 °C ve yine 630 °C) köpürtme süresinin lineer genleşmeye etkisi, grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.6. Farklı bileşimdeki köpüklerde köpürtme süresinin lineer genleşmeye etkisi.

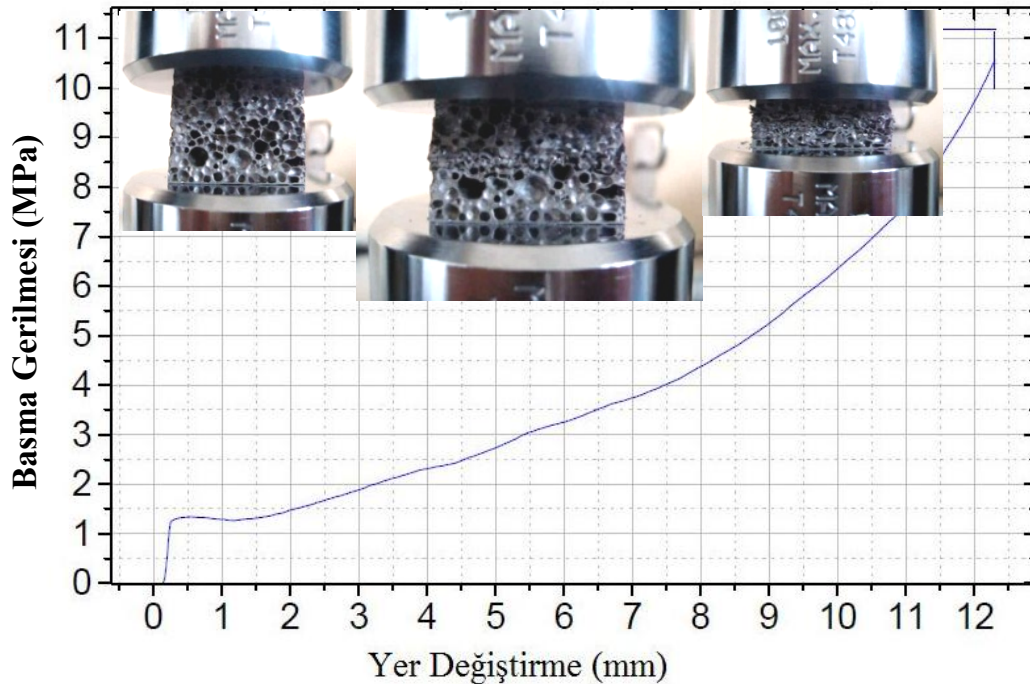
Lineer genleşme verilerine göre en yüksek değerin AlSi7 en düşük ise AlSi14 alaşımında elde edildiği görülmektedir. Bu sonuç özgül yoğunluk değerleri ile de uyusmaktadır. Çünkü genelde yüksek lineer genleşme yüksek köpürmeyi, yüksek miktarda köpürmede düşük yoğunluğu gerektirir.

7.3. Basma ve Mikro Sertlik Testi

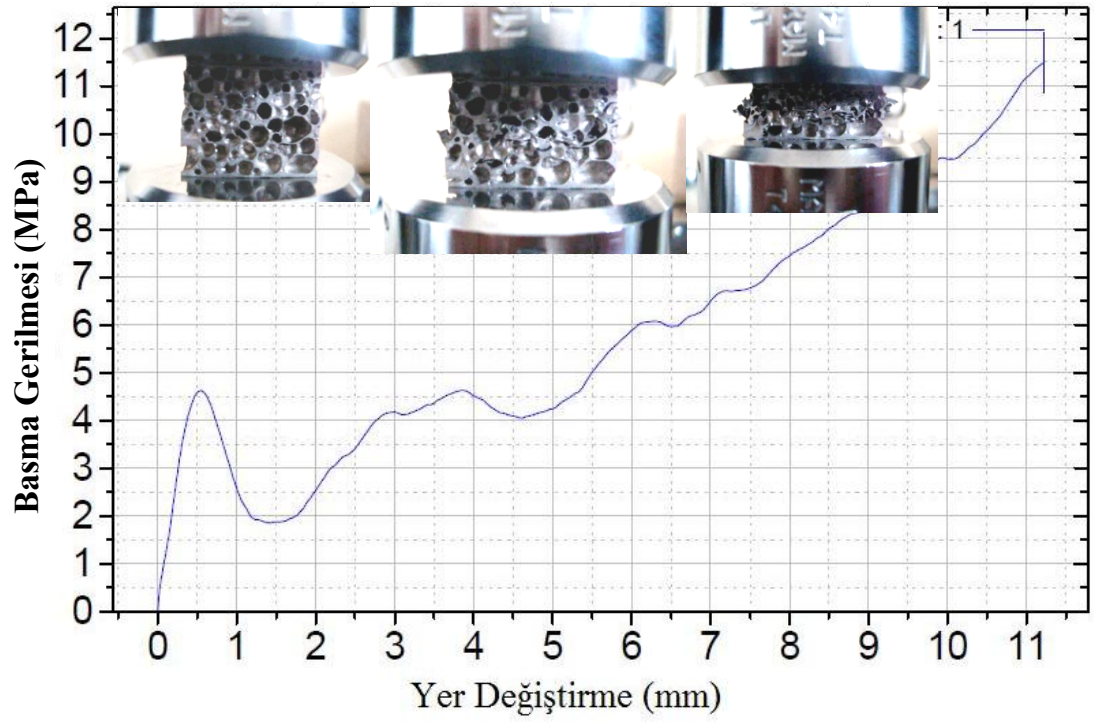
7.3.1. Basma testi

Basma testleri metal köpüklerin deforme olmadan dayanabilecekleri kuvveti ve deforme olduğunda da önceki bölümlerde bahsedildiği gibi absorbe edebileceği enerjiyi belirlemede önemli bir referanstır. Bunun yanı sıra ölçümler çoğu köpük

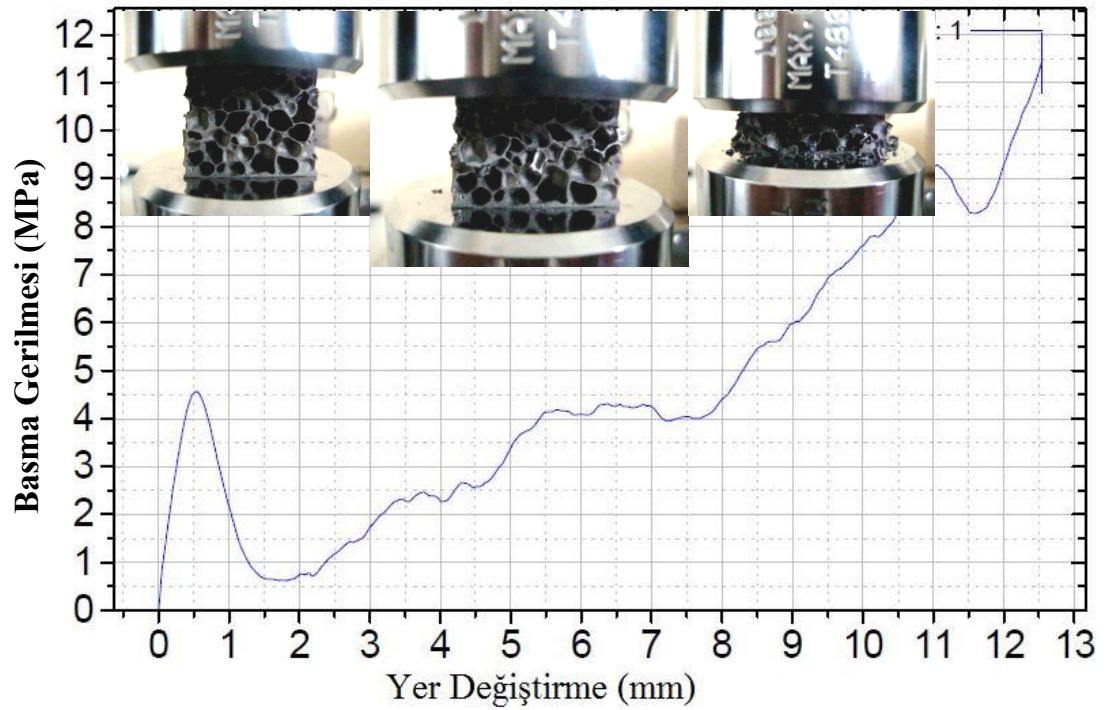
türünü tanımlamada sabit veriler değil daha önce bahsedildiği gibi referans olabilir. Çünkü çoğu üretim yöntemi ile elde edilen metal köpükler standart değildir. Özellikle deneyde kullanılan numune tarzında ufak numunelerde veriler en ufak farklılıklardan bile etkilenirler. Daha önceki çalışmalarda metal köpüklere uygulanan tek eksenli basma testlerinde köpüğün yoğunluğunun ve uygulanan kuvvet yönündeki dış duvar kalınlıklarının önemli oranda, köpürme yönünün ise düşük oranda basma değerlerini etkilediği belirtilmiştir [63,64,65]. Bu sebeple numuneler basmaya tabi tutulmadan önce bütün yan duvarlar kesilerek ayrılmış ve köpürme yönünde basmaya tabi tutulmuştur. Aşağıda Şekil 7.7, 7.8 ve 7.9'daki grafiklerde AlSi7, AlSi14 ve AlSi14Cu4,5 alaşımlı köpüklerin basmaya karşı sıkışma (yer değiştirme) davranışı görülmektedir. Grafiklerin üst kısımlarına köpük numunelerin; basmaya başlarken, kısmen deforme olmuş ve sıkışmış haldeki fotoğrafları eklenmiştir. Grafiklerde plato yüksekliği de denilen (basmaya karşı yer değiştirmenin aniden arttığı nokta) elastik limitler yapılan testlerde değişiklik göstermiştir. Bu deneylerde elde edilen ortalama değer AlSi7 için 1,68 AlSi14 için 4,02 ve AlSi14Cu4,5 için de 4,1 olarak tespit edilmiş ve grafiklerde de belirtilmiştir.



Şekil 7.7. AlSi7 alaşımlı köpüğün basma, yer değiştirme grafiği



Şekil 7.8. AlSi14 alaşımlı köpüğün basma, yer değiştirme grafiği



Şekil 7.9. AlSi14Cu4,5 köpüğünün basma, yer değiştirme grafiği

Grafikler incelendiğinde aralarındaki en belirgin farklar elastik limitlerde ve bu noktadan sonra grafiğin ilerleyişindedir. Grafikler bu yönden kıyaslandığında AlSi14 ve AlSi14Cu4,5'in (Şekil 7.8 ve 7.9) benzerlikler gösterdiği, AlSi7'nin ise bunlardan tamamen ayrıldığı gözlenmektedir. AlSi7'nin ortalama elastik limiti daha düşüktür ve bu noktadan sonra dalgalanma oluşturmada basmaya karşı orantılı bir sıkışma sergilemektedir. Bunun süneklik ile bağlantılı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Literatürde AlSi7 ve farklı alaşımlarda köpüklerin basma testleri yapılmış ve bu çalışmada ortaya konulan sonuçlara benzer değerler elde edilmiş. Grafikteki düzgün akışa sebep olarak ise AlSi7'nin sünekliği ve boşluk dağılımı gösterilmiştir. Ayrıca aynı çalışmada köpüğün mikro yapı ve boşluk heterojenliği azaltılabilirse darbe esnasındaki kararlılığının artacağı belirtilmiş ve bunun için de üretim parametrelerinin optimizasyonunun gerekliliği vurgulanmıştır [61].

Diğer iki alaşımda ise elastik limitlerinin ortalamaları yaklaşık aynıdır. Yani önemli ölçüde deforme olmadan karşılayabilecekleri kuvvetler benzerdir. Bu noktadan sonraki grafiğin akışı da yine benzer şekilde dalgalıdır. Bu da her ikisinin de gevrek bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. AlSi14Cu4,5 alaşımlı köpüğün elastik limit noktasından sonra daha fazla düşüş gösterdiği ve devamında basma yer değiştirme eğrisinin daha düzensiz olduğu göz önüne alındığında daha gevrek bir yapıya sahip olduğu sonucu çıkarılabilir.

Tüm basma test verileri değerlendirildiğinde temel deformasyon mekanizmasının hücre duvarlarının bükülmesi ya da kırılmasından oluştuğu görülmüştür. Bu fark basma grafiklerindeki plato bölgesinde kendini göstermektedir. Hücre duvarları bükülerek deforme olanlar dalgalanmasız bir akış sergilerken, kırılanlar hücre boyutu gibi etkenlere de bağlı olarak değişen dalgalanmalar göstermektedir. Yani bu durumda plato bölgesini etkileyen ana etkenler hücre duvarının sünekliği, mekanik özellikleri ve hücre boyut dağılımıdır. Literatürde hücre duvarı mekanik özelliklerinin intermetaliklerin, oksitler parçacıklarının ve hücre duvarlarının içerisindeki mikro gözeneklerin varlığı ile değişim göstereceği belirtilmiştir [62].

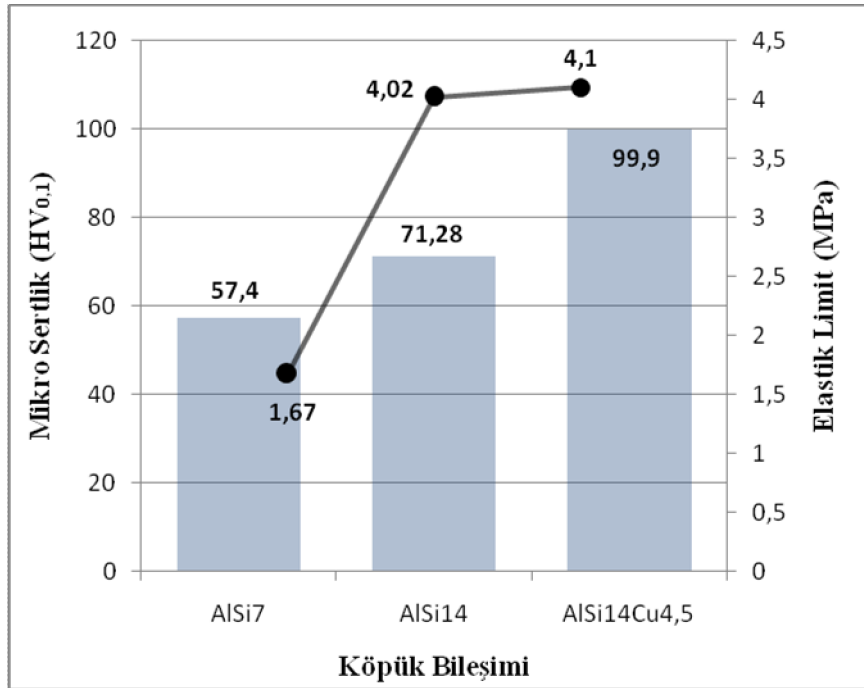
Köpüklerdeki gözenek boyutu ve düzensizliklerinde hücre duvarları ve hücre kenarları farklı kalınlıklardadır. Bu fark gerilmelerin belli bölgelerde yoğunlaşmasına sebep olur ve bu da deformasyonun belli bölgelerde kolayca gerçekleşmesine neden olur [66]. En zayıf gözenekte başlayan deformasyon etrafına yayılarak devam eder. O kısım yoğunlaştıktan sonra diğer zayıf gözenek deforme olur ve bu şekilde deformasyon birbirini izleyen bantlar şeklinde devam eder [67]. Bu sebeple farklı gözenek boyutları ya da hücre duvar kalınlıkları köpüğün deformasyon davranışını doğrudan etkilemesi beklenir.

Sonuç olarak AlSi7 alaşımlı köpüğün basma yüklerine karşı daha mukavemetsiz olduğu fakat sünek bir davranış sergilediği görülmektedir. Diğer alaşım türlerinde ise elde edilen veriler birbirleri ile benzerlik göstermekte ve AlSi7'nin aksine bir davranış sergilemektedir. Literatürde köpüğün yüksek düzeyde enerji absorpsiyonu için basma grafiğinde plato bölgesinin oldukça yatay ve dalgalanmasız olması gerektiği belirtilmektedir. Bu bağlamda sünek matrisli malzemelerin basma grafiği incelendiğinde yüksek enerji absorpsiyonu için tam olarak yeterli olmadığı vurgulanmıştır [68].

7.3.2. Mikro sertlik testi

Üretilen metal köpükler boşluklardan oluştuğundan dolayı hücre duvar ve kesişim noktalarından ölçümler alabilmek için mikro sertlik testi (Vickers) uygulanmıştır. Köpüğün sertlik değeri belirlenirken çeşitli noktalardan ölçümler yapıp ortalamaları alınmıştır. Yapılan ölçümlerde belli noktalarda bariz sertlik değişimleri olmadığı gözlemlenmiştir. Ölçümler sonrasında sertlikler, AlSi7; 57,4, AlSi14; 71,28 ve AlSi14Cu4,5'te 99,9 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar basma testi ile de kısmen uyum içerisindedir (Şekil 7.10). Fakat basma testlerinde benzer sonuçlar gösteren AlSi14 ile AlSi14Cu4,5 arasında sertlik farkı görülmüştür. Literatürde döküm yöntemi kullanılarak Al – Si ötektik alaşımına %5'e kadar çeşitli oranlarda Cu ilave edilmiş ve sonuçta ilave bakırın tane sınırlarında ikincil fazların oluşumunu sağladığı, artan Cu oranı ile sertliğin de arttığı tespit edilmiştir [69]. Sonuçta daha önce mikro yapı görüntülerinde de belirtildiği gibi ilave edilen bakır, köpüğün mikro

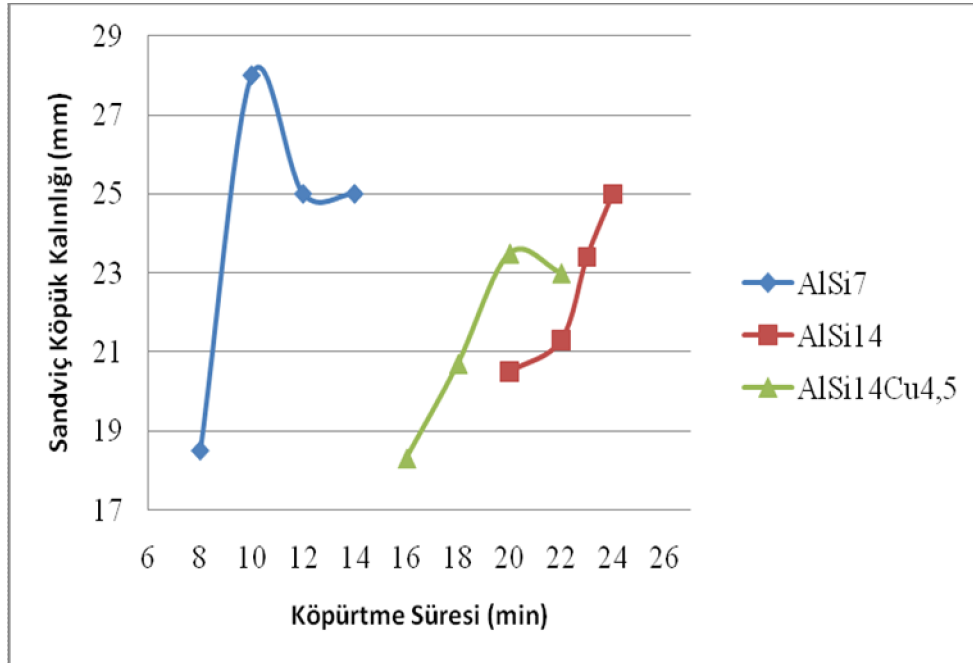
yapısında önemli değişimlere sebep olmuş ve sertliğini yükseltmiştir. Ayrıca sadece bu sonuç yönünden bakıldığında; hücre duvarı sertliğinin köpüğün basma dayanımını belirlemede tek etken olmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 7.10’da test edilen köpüklerin ortalama mikro sertlikleri ve elastik limitleri grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.10. Farklı bileşimlerdeki köpüklerin ortalama mikro sertlikleri ve elastik limitleri

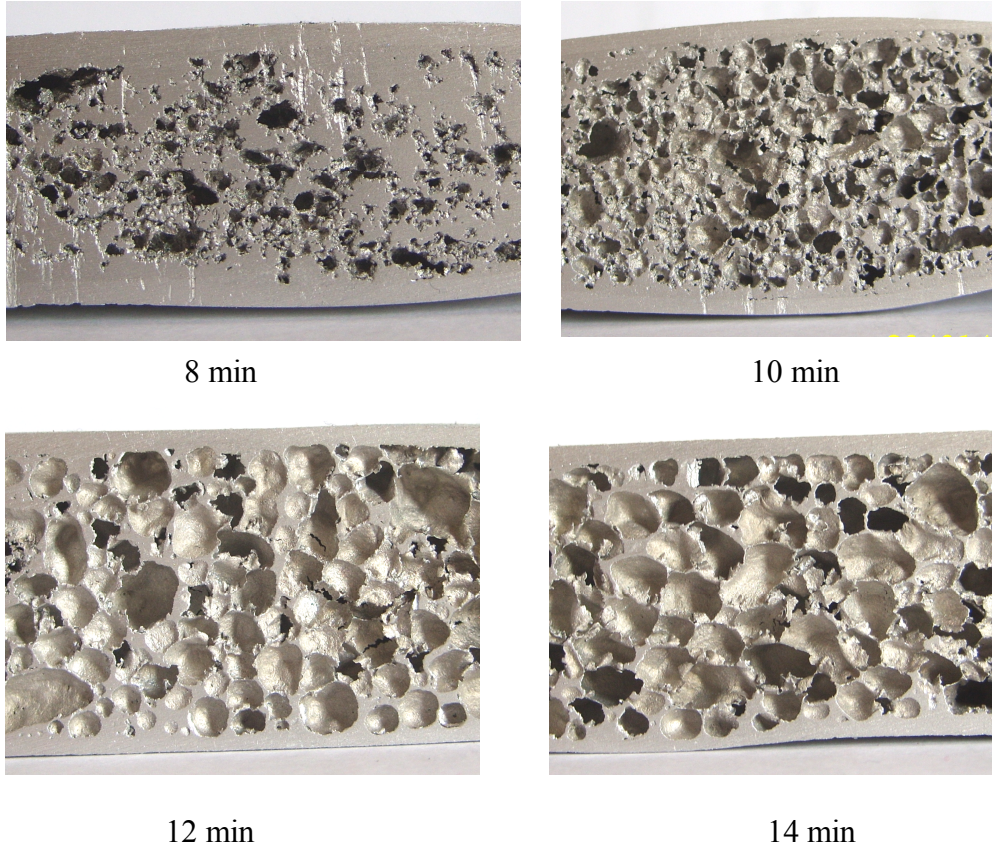
7.4. Sandviç Köpük Üretimi ve Mikro Yapıları

Serbest köpürtme deneylerinde farklı karışımlardaki köpüklerin çeşitli sıcaklık ve sürelerdeki köpürme özellikleri incelenmiştir. Fakat sandviç köpük üretiminde köpürmeye hazır malzemenin yüzeyindeki levha hem ısı iletimini hem de yüzey gerilimini etkiler. Ayrıca ergime riskinden dolayı köpürtme süresini sınırlandırır. Bu gibi sebeplerle sandviç köpük üretiminde önceki deneyler de göz önünde bulundurularak köpürtme sıcaklıkları AlSi7 için 690 °C, AlSi14 ve AlSi14Cu4,5 için ise 630 °C olarak seçilmiş ve köpürtme süresini belirlemek için başka bir deney yapılmıştır. Yapılan köpürtme işlemi sonrası farklı sandviç yapıların yüksekliklerinin köpürtme süresine bağlı olarak değişimi grafiksel olarak Şekil 7.11’de gösterilmiştir.



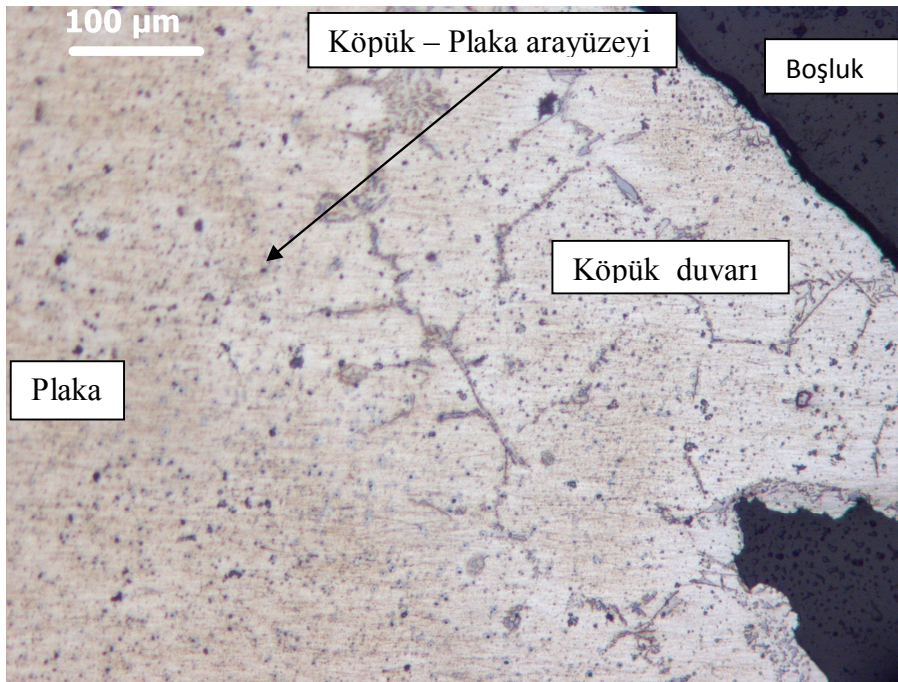
Şekil 7.11. Farklı karışımlara sahip sandviç köpüklerde köpürtme süresinin sandviç yüksekliğine etkisi

Grafiğe bakıldığında AlSi7 köpük kullanılan sandviç yapının hem maksimum yükseklik hem de köpürtme süresi bakımından diğerlerinden ayrıldığı görülmektedir. Köpürme süresindeki fark diğerlerine göre yüksek olan köpürtme sıcaklığından kaynaklanmaktadır. Maksimum yükseklik ise kullanılan karışımın köpürebilirlik özelliğine göre değişir. Sandviç köpük üretimi esasında yükseklikten daha önemli olan, sandviç levhası ergimeden arada kullanılan köpüğün kullanılabilinecek yeterliliğe ulaşmasıdır. Bunu belirlemek için hazırlanan sandviç köpükler kesilerek gözenek yapıları incelenmiştir. Ayrıca köpürme sonrası levha yüzeylerine bakılarak levhaların yaklaşık ergime miktarı hakkında yaklaşımda bulunulmuştur. Resim 7.11'de AlSi7 kullanılarak üretilen sandviç köpüğün farklı sürelerdeki makro görüntüleri verilmiştir.



Resim 7.11. AlSi7 karışım tozu kullanılarak üretilen sandviç köpüğün süreye bağlı olarak değişimi

Verilen sandviç resimlerinde 8 ve 10 dakikalık köpürtmelerde köpük oluşumunun yetersiz olduğu, 12 dakikalık köpürtme süresinde gözeneklerin yeterli boyuta ulaştığı ve homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. 14. dakikada ise gözeneklerin biraz daha büyümüş fakat sandviçin alt plakası yaklaşık %50 oranında ergimiştir. Bu sebeple kullanılabilir olarak görülmemiştir. Sonuç itibari ile AlSi7 alaşımından 690 °C’de iyi derecede alüminyum alaşımlı sandviç köpükler üretilebilmiştir. Literatürde AlSi7 karışımı ile sandviç köpükler üretilip çeşitli durumlar için değerlendirilmesi yapılmış ve sonuçta üretim için 700 °C civarındaki sıcaklıkların en uygun olduğu tespit edilmiştir [31]. Resim 7.12’de AlSi7 karışım tozu kullanılarak üretilen sandviç yapının köpük plaka ara yüzeyi görülmektedir.



Resim 7.12. AlSi7 alaşımlı köpük kullanılan sandviçte köpük-plaka ara yüzeyi ve köpük malzemenin orta kısımlarından görüntü

Aşağıdaki Resim 7.13'te AlSi14 köpük kullanılarak 630 °C'de üretilen sandviç köpüğün çeşitli sürelerde köpürme görüntüleri verilmiştir. Üretilen sandviç yapılarda serbest köpürme deneyinde de gözlemlendiği gibi artan köpürtme süresi ile gözenek yapısının iyileştiği görülmektedir. 20 ve 24 dakika gözenek boyutu yönünden uç noktalarda bulunmakta, 22 ve 23 dakikada ise gözenek dağılımı yeterli seviyededir.

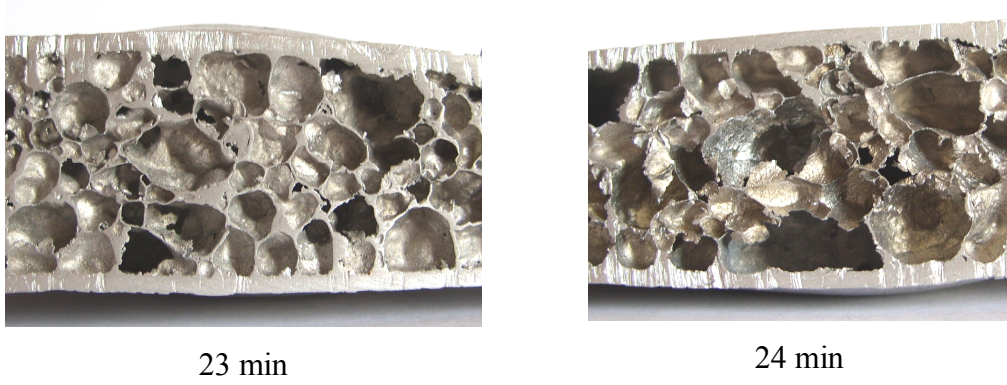


20 min



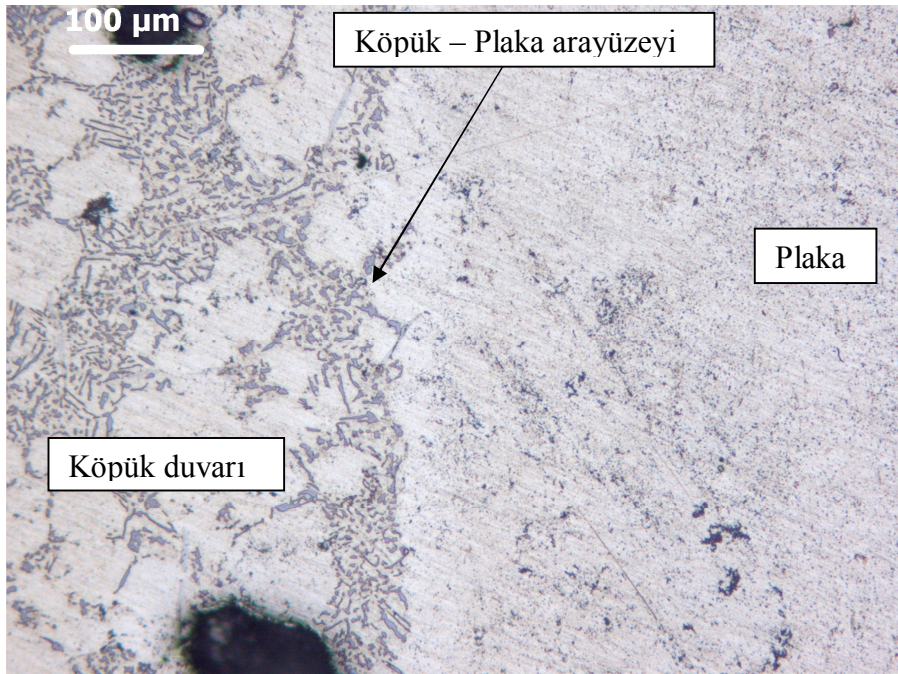
22 min

Resim 7.13. AlSi14 karışım tozu kullanılarak üretilen sandviç köpüğün süreye bağlı olarak değişimi



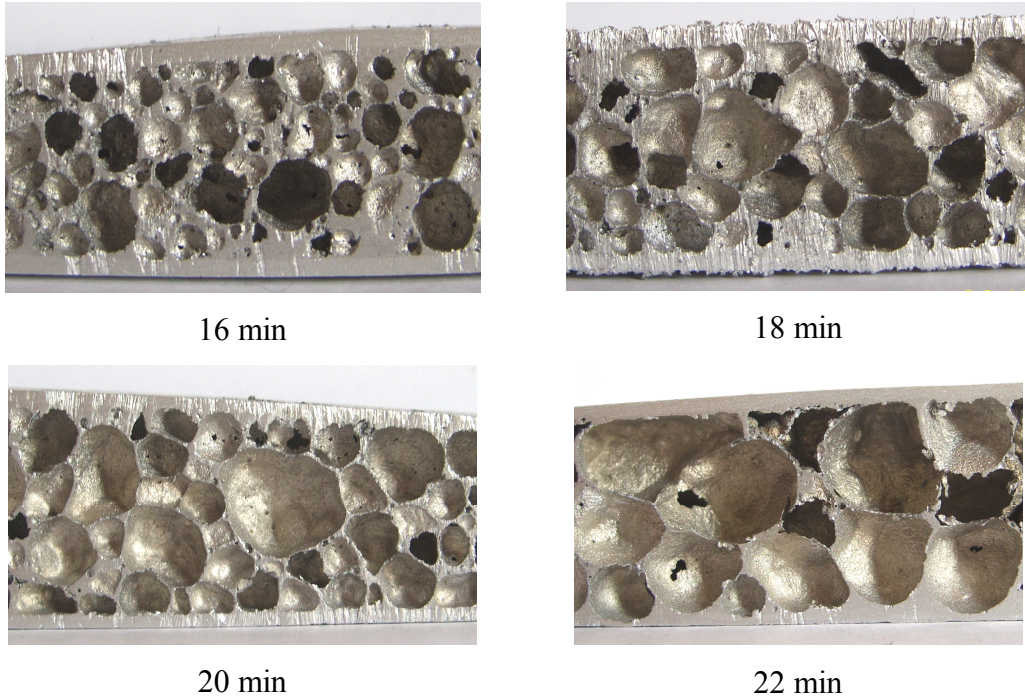
Resim 7.13. (Devam) AlSi14 karışım tozu kullanılarak üretilen sandviç köpüğün süreye bağlı olarak değişimi

22 dakikalık üretimde gözenek boyutlarının oldukça büyüdüğü ve alt plakanın yaklaşık % 25 oranında ergidiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple en uygun köpürtme süresi olarak 23 dakika seçilmiştir. Aşağıdaki Resim 7.14'te köpük ile yüzey plakasının birleşme noktası görülmektedir. Resme bakıldığında difüzyonun gerçekleştiği köpük plaka ara yüzeyi açık bir şekilde görülmektedir.



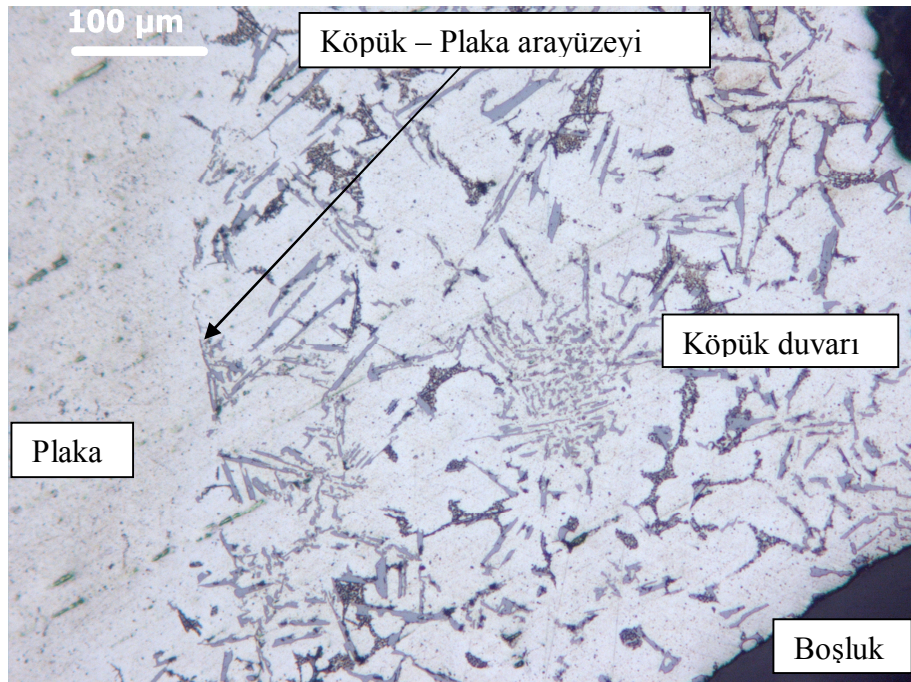
Resim 7.14. AlSi14 karışımlı köpük kullanılan sandviçte köpük - plaka ara yüzeyi

Son olarak AlSi14Cu4,5 karışımı köpük ile 630 °C’de sandviç yapı üretilmiştir. Çeşitli sürelerde üretilen yapıların tamamında gözenekler genel olarak yeterli boyutlardadır. Diğerlerinde olduğu gibi artan süre ile gözenek yapısı irileşmektedir. Resim 7.15’te köpürme süresinin gözenek boyutuna etkisi görülmektedir.



Resim 7.15. AlSi14Cu4,5 karışım tozu kullanılarak üretilen sandviç köpüğün süreye bağlı olarak değişimi

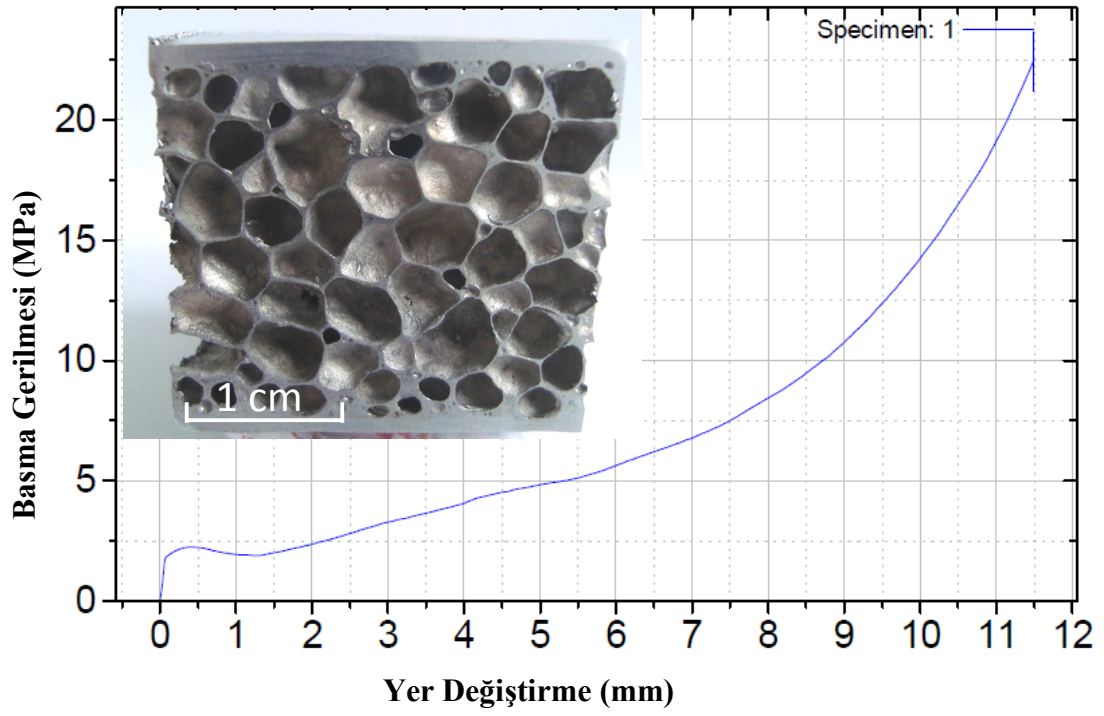
Üretilen sandviç yapılara baktığımızda 22 dakikalık köpürtme süresinde alt plaka tamamen ergimiş, diğerlerinde ise herhangi bir ergime oluşmamıştır. Gözenek yapıları da dikkate alındığında diğer üç sürede de sandviç yapı üretilebilir seviyededir. Fakat hem gözenek kalitesi hem de süre kontrolünden kaynaklanan üretim kolaylığından dolayı 18 dakikalık üretim süresi daha uygun görülmüştür. Köpük ve yüzey plakası birleşme noktasının mikro yapı görüntüleri aşağıdaki Resim 7.16’da verilmiştir. Bütün ara yüzey mikro yapılarında olduğu gibi bu görüntüde de ara yüzey bariz bir şekilde görülmektedir. Literatürdeki benzer bir çalışmada; köpüğün yapısındaki ötektik fazın difüzyon mekanizması ve yüzey levhası alaşımları ile bölgesel olarak karışması ile levha malzemesine doğru büyüdüğü ve bu sebeple köpük ile levha arasında sağlam bir bağ oluştuğu belirtilmiştir [31].



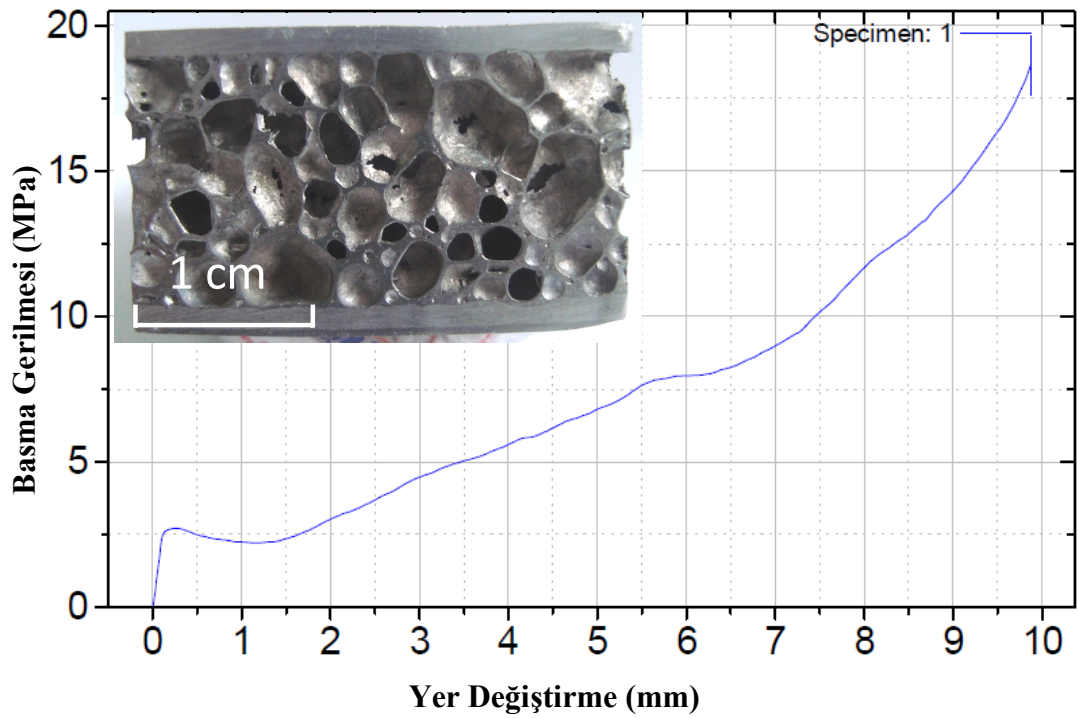
Resim 7.16. AlSi14Cu4,5 karışımlı köpük kullanılan sandviçte köpük - levha ara yüzeyi

7.5. Sandviç Köpüklerin Basma Testi

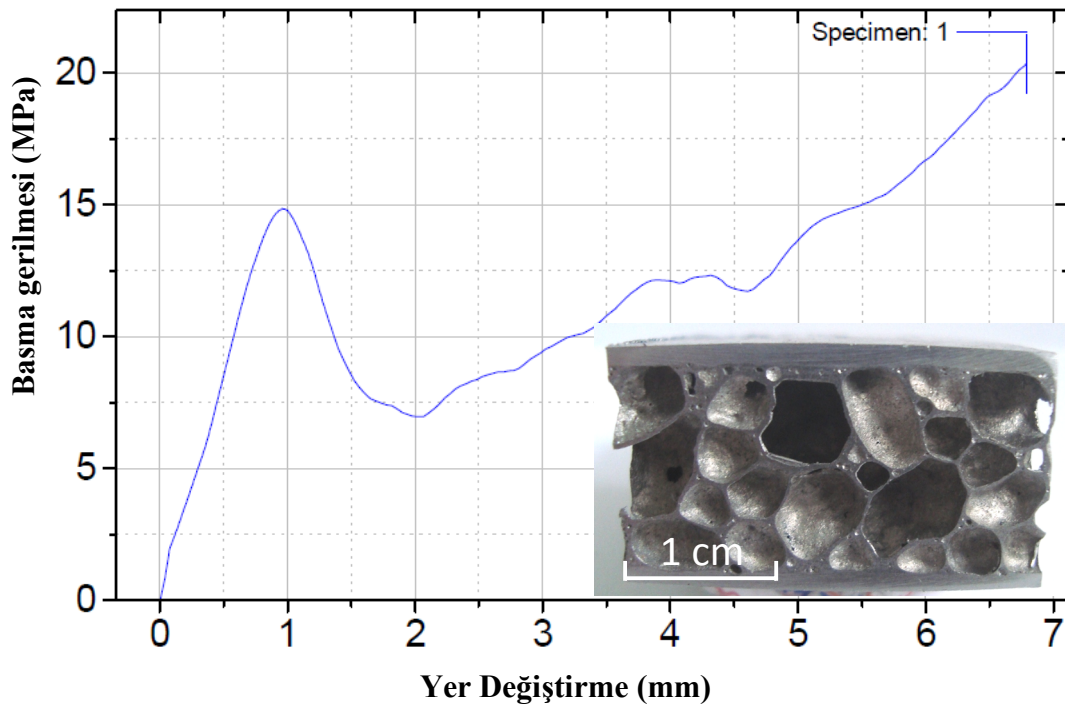
Son işlem olarak basma testi için tekrar sandviç köpükler hazırlanmıştır. Köpürmeye hazır numuneler öncekilere benzer parametreler kullanılarak üretilmiştir. Köpürtme sıcaklığı olarak da daha önceki sandviç köpük üretiminde kullanılan (AlSi7 için 690 °C, AlSi14 ve AlSi14Cu4,5 için ise 630 °C) sıcaklıklar seçilmiştir. Köpürtme süresi olarak ise numuneler basma testi için kullanılacağından belirli bir yükseklikte üst kısımları sınırlandırılıp, eşit yükseklikte üretilmesi planlanmıştır. Fakat AlSi7 alaşımı dışındaki köpükler istenen yüksekliğe kadar köpürememiştir. Bu sebeple sandviç köpükler gözlemlenerek en fazla yüksekliğe ulaştıklarında köpürtme işlemi sonlandırılmıştır. Tahmin edilebileceği gibi bekleme süresi numunelerin gözenek boyutlarını doğrudan etkilemiştir. Bu sebeple her alaşım türünden üç tane test numunesi hazırlanmıştır. Test numunelerinin ortalama elastik limitleri AlSi7 için 1,63MPa AlSi14 için 1,7MPa ve AlSi14Cu4,5 için de 13MPa bulunmuştur. Şekil 7.12’de AlSi7, Şekil 7.13’te AlSi14 ve Şekil 7.14’te AlSi7Cu4,5 alaşımlı sandviç köpüklerin fotoğrafları ve basma grafikleri verilmiştir.



Şekil 7.12. AlSi7 alaşımlı sandviç köpüğün basma - yer değiştirme grafiği



Şekil 7.13. AlSi14 alaşımlı sandviç köpüğün basma - yer değiştirme grafiği



Şekil 7.14. AlSi14Cu4,5 alaşımlı sandviç köpüğün basma - yer değiştirme grafiği

Verilen grafiklerin üzerlerindeki basma numunelerine bakıldığında; levhalar ergimeden uygun gözenek yapısına sahip sandviç köpüklerin üretildiği görülmektedir. AlSi14 alaşımlı köpük dışındakilerde hücre duvarları deforme olmamış şekildedir. AlSi14 alaşımlıda ise muhtemelen uzun köpürtme süresinden dolayı hücre duvarları tahrip olmuştur. Bu açıdan bakıldığında AlSi14 alaşımına katılan ilave bakırın olumlu etkisi görülmektedir.

Basma grafiklerine bakıldığında Şekil 7.12'deki AlSi7 alaşımlı sandviç köpüğün elastik limitinin, aynı alaşımlı kalıpta hazırlanan köpüğün (Bkz. Şekil 7.7) değerleri ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Şekil 7.13'deki AlSi14 alaşımlı sandviç köpük ise kalıpta hazırlanana (Bkz. Şekil 7.8) göre daha düşük dayanım göstermiştir. Grafiğin üzerindeki sandviç köpük resminde görüldüğü gibi köpürtme esnasında tahrip olan hücre duvarlarının buna sebep olduğu düşünülmüştür. Şekil 7.14'teki AlSi7Cu4,5 alaşımlı sandviç köpük ise kalıpta köpürtülerek hazırlanmış basma numunesine göre (Bkz. Şekil 7.9) oldukça yüksek mukavemet göstermiştir. Buna sebep olarak ise ilk akla gelen değişken köpürtme süresi ve buna bağlı gözenek boyutu ve hücre duvar kalınlığındaki değişimdir. Fakat mikro yapıdaki değişimler de

mukavemet artışını sağlamış olabilir. Literatürde içerisinde farklı oranlarda Si, Cu ve Mg içeren alüminyum alaşımlı köpüklerin mekanik testleri yapılmış, yapılan testler sonucunda köpürtme süresinin hücre duvarı sertliğini arttırdığı fakat elastik modülü etkilemediği belirtilmiştir [70]. Ayrıca hücre duvarı içerisindeki intermetaliklerin, oksit parçacıklarının ve mikro gözeneklerin de köpüğün mekanik özelliklerini değiştirebileceği belirtilmiştir [62]. Bu sebeplerle sandviçin mikro yapısı detaylı olarak analiz edilmeden sebeplerinin bilinmesi mümkün değildir. Sonuçta büyük malzemelerde üzerine gelen bölgesel basma yüklerini yapıya dağıttığı için sandviç köpüğün, serbest haline göre daha iyi bir dayanım göstereceği tahmin edilebilir. Deney numunelerinde ise gelen yük tüm malzemeye uygulandığından, köpüğün sandviç yapı olmasının mukavemete pek katkısı beklenmez. Yapılan deneylerde de oluşan mukavemet farklılıklarının köpürtme süreleri ve buna bağlı yapı değişikliklerine bağlı olarak oluştuğu düşünülmüştür.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada alüminyum levha ve çeşitli alüminyum alaşımlarından oluşan metal köpükler ile ara bağlayıcı kullanılmadan sandviç yapı üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunun için AlSi7, AlSi14 ve AlSi14Cu4,5 bileşiminde üç farklı köpük üretilmiş ve sandviç yapı için hangisinin daha uygun olduğu konusunda çeşitli yönlerden birbirleri ile kıyaslanmıştır. Son olarak yine aynı üç karışım ile farklı sürelerde sandviç yapı üretilmiş, mikro yapıları değerlendirilmiş ve basma testi uygulanmıştır. Yapılan tüm deneyler sonucunda;

1. Farklı karışımların serbest köpürtülmesi sonrasında, farklı köpürtme sıcaklıklarındaki köpüklerin en düşük yoğunlukları sırası ile AlSi7, AlSi14Cu4,5 ve AlSi14 için; 0,389 g/cm³, 0,442 g/cm³, 0,512 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Bu sıralama test edilen tüm sıcaklıklardaki ortalama yoğunluk değerleri için geçerlidir.
2. Aynı deneyde AlSi14Cu4,5 karışımından başta düşük sıcaklıklar olmak üzere çalışma yapılan her sıcaklık değerinde (590 °C – 690 °C) gözenek yapısı olarak oldukça yeterli köpükler üretilbildiği görülmüştür. 590 °C gibi düşük sıcaklıklarda bile düzgün gözenek morfolojisine sahip köpük üretebilmek sandviç üretimi için önemli bir avantajdır
3. Üretilen köpüklerin hücre duvarı kalınlıkları ve dolaylı olarak gözenek boyutları küçükten büyüğe doğru; AlSi7, AlSi14 ve AlSi14Cu4,5 olarak ölçülmüştür.
4. Köpüklere uygulanan basma testi sonrasında AlSi7 karışımının en düşük mukavemet değerlerine sahip olduğu, fakat sünek bir davranış sergilediği görülmüştür. AlSi14 ve AlSi14Cu4,5 karışımlı köpüklerin ise birbirine yakın mukavemet değerlerine sahip olmasına karşın bakır ilaveli olanın daha mukavemetli olduğu, fakat daha gevrek davrandığı görülmüştür.

5. Sandviç köpük üretiminde en uygun süreler; 690 °C’de AlSi7 için 12 dakika, 630 °C’de AlSi14 için 23 dakika ve 630 °C’de AlSi14Cu4,5 için ise 18 dakika olarak belirlenmiştir.
6. Tüm sandviç köpüklerde levha – köpük ara yüzeyi mikroskopta incelenmiş ve tamamında iyi bir difüzyon gerçekleştiği görülmüştür.
7. Her üç karışım ile ara bağlayıcıya gerek kalmadan rahatlıkla alüminyum sandviç köpük üretilmiş ve birbirlerinden oldukça farklı mekanik ve morfolojik özellikler elde edilmiştir. Bu sebeple sandviç yapıdan beklenen mekanik ve fiziksel özelliklere göre üretimde üç alaşım grubunun da kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.
8. Sandviç numunelerin basma değerleri genel olarak serbest haldeki köpüklere yakın çıkmıştır. Fakat AlSi14Cu4,5 alaşımlı köpük kullanılan sandviç malzeme muhtemel köpürtme süresinden dolayı aynı alaşımın serbest haldeki köpüğüne oranla yüksek mukavemet göstermiştir.
9. Aşağıdaki çizelgede bu çalışmada kullanılan üç farklı alaşımlı köpüğün çeşitli özellikler bakımından kıyaslaması verilmiştir.

Çizelge 8.1. Farklı alaşımlardaki köpüklerin çeşitli kriterlere göre kıyaslaması

İncelenen Kriter	AlSi7	AlSi14	AlSi14Cu4,5
En düşük yoğunluk değeri	düşük	orta	yüksek
Göreceli yoğunluk değeri	düşük	orta	orta
Ortalama hücre duvar kalınlığı	düşük	orta	yüksek
Ortalama gözenek boyutu	düşük	orta	yüksek
Basma gerilmesindeki akma noktası	düşük	orta	orta
Sandviçin basma gerilmesindeki akma noktası	düşük	orta	yüksek

Çizelge 8.1. (Devam) Farklı alaşımlardaki köpüklerin çeşitli kriterlere göre kıyaslaması

Mikro sertlikler	düşük	orta	yüksek
Süneklik	yüksek	düşük	düşük
En düşük köpürtme sıcaklığı	yüksek	orta	düşük
Üretilen sandviç kalınlıkları	yüksek	orta	orta

Yapılan bu deneylerin yanı sıra ileriki çalışmalarda;

1. Ara bağlayıcı kullanarak ve kullanmadan sandviç köpük üretilip mekanik testlere tabi tutularak kıyaslanabilir.
2. Farklı bileşimler ile üretilen sandviç köpüklerin ısı, ses, elektrik iletimi gibi çeşitli fiziksel özellikleri incelenebilir.
3. Sandviç köpük farklı bileşimdeki ve kalınlıktaki köpük ve levhalar kullanılarak üretilir. Üretilen sandviçler çeşitli yönlerden kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

1. Herrmann, A. S., Zahlen, P. C. And Zuardy, I., “Sandwich structures technology in commercial aviation”, Sandwich Structures 7, **Airbus Deutschland GmbH**, Netherlands, 13–26 (2005).
2. Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W. And Wadley, H.N.G. “Metal Foams: A Design Guide”, **Butterworth-Heinemann**, Boston, 1, 113-114, 158, 173–175 (2000).
3. Chang, S., Hong, D., Chiang, F.P., “Macro and micro deformations in a sandwich foam core”, **Composites: Part B**, 35: 503–509 (2004).
4. Simancik F., “Introduction: The Strange World of Cellular Metals”, Handbook of Cellular Metals, Degischer H.P. And Kriszt B., **Wiley-VCH Verlag GmbH**, Weinheim 1–4 (2002).
5. Yu, J., Wang, E., Li, J., Zheng, Z., “Static and low-velocity impact behavior of sandwich beams with closed-cell aluminum foam core in three-point bending”, **International Journal of Impact Engineering**, 1–26 (2008).
6. Lefebvre, L. P., Banhart, J., Dunand, D.C., “Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments”, **Advanced Engineering Materials** 10 (9): 775–787 (2008).
7. Banhart J., Baumeister J., Weber M., “Powder Metallurgical Technology for the Production of Metallic Foams”, **Proceedings of the European Conference on Advanced PM Materials**, Birmingham, 201–208 (1995).
8. Baumgärtner F., Duarte I. And John Banhart J., “Industrialization of Powder Compact Foaming Process”, **Advanced Engineering Materials** (4): 168–174 (2000).
9. Koerner C. “Integral Foam Molding of Light Metals”, **Springer – Verlag**, Berlin, 10 (2008).
10. Ashby, M.F., “The Mechanical Properties of Cellular Solids”, **Metallurgical Transaction A**, 14A: 1769–1775 (1983).
11. Maine, E.M.A., Ashby, M.F., “Applying the investment methodology for materials (IMM) to aluminium foams”, **Materials and Design**, 23: 307–319 (2002).
12. Gibson, L.J., Ashby, M.F., “Cellular Solids 2nd ed.” **Cambridge University Press**, United Kingdom, 357 (1997).

13. Banhart, J., “Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams”, *Progress in Materials Science*, 46: 559–632 (2001).
14. Montanini, R., “Measurement of strain rate sensitivity of aluminium foams for energy dissipation”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47: 26–42 (2005).
15. Vogel, J., Keller, J., Sviridov, A., Feige, H.J., Kreyssig, K., Auersperg, J., Plass, P., Walter, H., “Characterization of Strength Behavior of Aluminium Foam Sandwiches Under Static Load”, *The Authors. Journal compilation*, 1–9 (2009).
16. Jackson, K.P., Allwood, J.M., Landert, M., “Incremental forming of sandwich panels”, *Journal of Materials Processing Technology*, 1–14 (2008).
17. Internet: Alulight international GmbH “Sandwich data sheet” <http://www.alulight.com/en/downloads/afs-en.pdf> (2007).
18. Daniel Gay, D., Hoa S. V., Tsai S. W., “Composite Materials Design And Applications”, *CRC Press*, United States of America (2003).
19. Vinson, J. R., “Sandwich Structures: Past, Present, And Future”, *Sandwich Structures 7*, *Springer*, Netherlands, 3–12 (2005).
20. Banhart, J., Seeliger, H., “Aluminium foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and applications”, *Advanced Engineering Materials*, 9: 793–802 (2008).
21. Banhart, J., Weaire, D., “On the road again - metal foams find favor” *Pyhsics Today*, 55: 37–42 (2002).
22. Korner, C., Singer, R. F., “Foaming Processes for Al”, Handbook of Cellular Metals, Degischer H.P. And Kriszt B., *Wiley-VCH Verlag GmbH*, Weinheim 8-14 (2002)
23. LI, K., XIE, M., LIU, H., “Numerical study of macroscopical drainage process in fabricating foamed aluminum using microscopical method” *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 30 (12): 1547–1558 (2009).
24. Banhart, J., “Manufacturing Routes for Metallic Foams”, *Journals of Materials*, 52: 22–27 (2000).
25. Gergely, V., Curran, D.C., Clyne, T.W. “The FOAMCARP process: foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors”, *Composites Science and Technology*, 63: 2301–2310 (2003).

26. Miyoshi, T., Itoh, M., Shigeru, A., Kitahara, A., “ALPORAS aluminum foam: Production Process, Properties and applications”, *Advanced Engineering Materials*, 4: 179–183 (2000).
27. Gergely, V., ve Clyne, B., “The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors”, *Advanced Engineering Materials*, 4: 175–178 (2000).
28. Duarte, I., Banhart, J., “A Study Of Aluminium Foam Formation Kinetics And Microstructure”, *Acta Materialia*, 48: 2349–2362 (2000).
29. Banhart, J., “Metal Foams: Production and Stability”, *Advanced Engineering Materials*, 8: 781–794 (2006).
30. Stöbener, K., Baumeister, J., Lehmhus, D., Stanzick, H., Zöllmer, V., “Composites based on metallic foams: phenomenology, production, properties and principles”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Slovakia, 281–286 (2003).
31. Banhart, J., Stanzick, H., Helfen, L., Baumbach, T., Nijhof, K., “Real-time X-ray Investigation of Aluminum Foam Sandwich Production”, *Advanced Engineering Materials*, 6: 407–411 (2001).
32. Simančík, F., “Metallic foams – ultra light materials for structural applications” *Inżynieria Materiałowa*, 5: 823–828 (2001).
33. Mohan, K., Yip, T.H., Sridhar, I., Seow, H. P., “Effect of face sheet material on the indentation response of metallic foams”, *J Mater Sci* 42: 3714–3723 (2007).
34. Ruan, D., Lu, G., Wong, YC., “Quasi-static indentation tests on aluminium foam sandwich panels”, *Composite Structures*, 92: 2039–2046 (2010).
35. Sevostianov, I., Kovacik, J., Simancik, F., “Elastic and electric properties of closed-cell aluminum foams Cross-property connection”, *Materials Science and Engineering A*, 420: 87–99 (2006).
36. Feng, Y., Zheng, H., Zhu, Z., Zu, F., “The Microstructure and electrical conductivity of aluminium alloy foams”, *Material Chemistry and Physics*, 78: 196–201 (2002).
37. Pippan, R., “Material Properties”, Handbook of Cellular Metals, Degischer H.P. And Kriszt B., *Wiley-VCH Verlag GmbH*, Weinheim 179–243 (2002).
38. Yu, H., Yao, G., Wang, X., Liu, Y., Li, H., “Sound insulation property of Al–Si closed-cell aluminum foam sandwich panels”, *Applied Acoustics*, 68: 1502–1510 (2007).

39. Seitzberger, M., Rammerstorfer, F.G., Degiseher, H. P., Gradinger, R., “Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam”, *Acta Mechanica*, 125: 93–105 (1997).
40. Banhart, J., “Metal Foams—from Fundamental Research to Applications”, *Frontiers in the Design of Materials*, 279–289 (2007).
41. Gama, B.A., Bogetti, T.A., Fink, B.K., Yu, C.J., Claar, T.D., Eifert, H.H., Gillespie, J.W., “Aluminum foam integral armor: a new dimension in armor design” *Composite Structures*, 52: 381–395 (2001).
42. Schaeffler, P., Rajner, W., Claar, D., Trendelenburg, T., Nishimura, H., “Production, Properties, and Applications of Alulight Closed-Cell Aluminum Foams”, *The Fifth International Workshop on Advanced Manufacturing Technologies*, London, 1–6 (2005).
43. Pinnoji, P.K., Bourdet, N., Mahajan, P., Willinger, R., “New motorcycle helmets with metal foam shell”, *IRCOBI Conference*, Bern (Switzerland) 449–452 (2008).
44. Seeliger, H.W., “Aluminium Foam Sandwich (AFS) Ready for Market Introduction”, *Advanced Engineering Materials*, 6: 448–451 (2004).
45. Schwingel, D., Seeliger, H.W., Vecchionacci, C., Alwes, D., Dittrich, J., “Aluminium foam sandwich structures for space applications”, *Acta Astronautica*, 61: 326–330 (2007).
46. Mu, Y., Yao, G., Luo, H., “Anisotropic damping behavior of closed-cell aluminum foam”, *Materials and Design*, 31: 610–612 (2010).
47. Guden, M., Yuksel, S., “SiC-particulate aluminum composite foams produced from powder compacts: foaming and compression behavior”, *J MATER SCI*, 41: 4075–4084 (2006).
48. German, R. M., “Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Ankara, 299–324 (2007).
49. Malachevsky, M.T., D’Ovidio, C.A., “Thermal evolution of titanium hydride optimized for aluminium foam fabrication”, *Scripta Materialia* 61: 1–4 (2009).
50. Matijasevic, B., Banhart, J., Fiechter, S., Görke, O., Wanderka, N., “Modification of titanium hydride for improved aluminium foam manufacture”, *Acta Materialia* 54: 1887–1900 (2006).
51. Uzun, A., “TM yöntemi ile alüminyum esaslı küresel şekilli metalik köpük üretimi ve üretim parametrelerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 39 (2009).

52. Cinici, H., Türker, M., “TM yöntemi ile üretilen al esaslı metalik köpüğe deformasyon miktarının etkisinin araştırılması”, **13th International Metallurgy & Materials Congress**, 854–860 (2006).
53. Çinici, H., “Toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretimi” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 71 (2004).
54. Baker, H., “ASM Handbook Volume 3”, **ASM International**, USA, 3. Ed. 2.44, 2.51 (1999).
55. Asavavisithchai, S., Kennedy, A.R., “Effect of powder oxide content on the expansion and stability of PM-route Al foams”, **Journal of Colloid and Interface Science** 297: 715–723 (2006).
56. Uzun, A., Gökmen, U., Türker, M., “Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen alüminyum esaslı metalik köpükte Si ilavesinin köpürmeye etkisi”, **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu**, Karabük (2009).
57. Gergely, V., Clyne, T.W., “Drainage in standing liquid metal foams: modelling and experimental observations”, **Acta Materialia**, 52: 3047–3058 (2004).
58. Dudka, A., Garcia-Moreno, F., Wanderka, N., Banhart, J., “Structure and distribution of oxides in aluminium foam”, **Acta Materialia**, 56: 3990–4001 (2008).
59. Uçak, T., “The effects of process parameters on the cell morphology of the aluminum foam” Master Thesis, **Graduate Program in Mechanical Engineering Bogaziçi University**, İstanbul, 48 (2007).
60. Mills, K., “ASM Handbook Volume 9”, **ASM International**, USA, 9. Ed. 374 (2000).
61. Campana, F., Pilone, D., “Effect of wall microstructure and morphometric parameters on the crush behaviour of Al alloy foams”, **Materials Science and Engineering**, A 479: 58–64 (2008).
62. Raj, R.E., Daniel, B.S.S., “Structural and compressive property correlation of closed-cell aluminum foam”, **Journal of Alloys and Compounds**, 467: 550–556 (2009).
63. Banhart, J., Baumeister, J., “Deformation characteristics of metal foams”, **Journal Of Materials Science**, 33: 1431–1440 (1998).
64. Simancik, F., “Reproducibility of aluminium foam properties”, **Int. Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures**, Bremen, 235–240 (1999).

65. Aly, M.S., “Behavior of closed cell aluminium foams upon compressive testing at elevated temperatures: Experimental results”, *Materials Letters*, 61: 3138–3141 (2007).
66. Motz, C., Pippan, R., “Fracture behaviour and fracture toughness of ductile closedcell metallic foams”, *Acta Materialia*, 50: 2013–2033 (2002).
67. Ruan, D., Lu, G., Chen, F.L., Siores, E., “Compressive behaviour of aluminium foams at low and medium strain rates”, *Composite Structures* 57: 331–336 (2002).
68. Lehmhus, D., Banhart, J., “Properties of heat-treated aluminium foams”, *Materials Science and Engineering*, A349: 98–110 (2003).
69. Zeren, M., Zor, S., Karakulak, E., Özkazanç, H., “Al-Si ötektik alaşımlarına Cu ilavesinin etkisi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük (2009).
70. Hasan, M.A., Kim A., Lee H.J., “Measuring the cell wall mechanical properties of Al-alloy foams using the nanoindentation method”, *Composite Structures*, 83: 180–188 (2008).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DEMİRTAŞ, Hüseyin
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 25.10.1984 Bursa
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (370) 433 84 46
Faks :
e-posta : hsyndmrts@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Metal Eğitimi Bölümü	2010
Lisans	Gazi Üniversitesi / Metal Öğretmenliği	2006
Lise	STFA Anadolu Teknik Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009 -	Karabük Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce