

VAKUM DÖKÜM YÖNTEMİ İLE AÇIK GÖZENEKLİ ALÜMİNYUM

KÖPÜK ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf KALKAN

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Ağustos 2012

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS

**VAKUM DÖKÜM YÖNTEMİ İLE AÇIK GÖZENEKLİ
ALÜMİNYUM KÖPÜK ÜRETİMİ**

Yusuf KALKAN

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Ağustos 2012

TEZ ONAY SAYFASI

Yusuf KALKAN tarafından hazırlanan “Vakum Döküm Yöntemi ile Açık Gözenekli Alüminyum Köpük Üretimi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 27/08/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metal Eğitimi Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

Başkan : Prof. Dr. İsmail DEMİR İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi,

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇAKMAKKAYA İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede ve başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

04/09/2012

Yusuf KALKAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

VAKUM DÖKÜM YÖNTEMİ İLE AÇIK GÖZENEKLİ ALÜMİNYUM

KÖPÜK ÜRETİMİ

Yusuf KALKAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

Bu çalışmanın temel amacı vakum döküm yöntemi ile açık gözenekli alüminyum köpük üretim parametrelerini incelemektir. Üretilen köpüklerin özelliklerinin belirlenmesi çalışmanın diğer bir amacıdır. Bu amaçla düşük vakum basınçlı döküm sistemi tasarlanmıştır. NaCl taneleri boşluk tutucu malzeme olarak kullanılmış ve daha sonra çözündürme tekniği kullanılarak alüminyum metalinin içinde hücre oluşumu sağlanmıştır. Değişen NaCl tane boyutuna bağlı olarak metalik köpük özelliklerindeki değişimler belirlenmiştir. Yoğunluk-mukavemet ilişkisi değişen NaCl tane boyutuna göre belirlenmiştir. Köpüklerin statik yükleme şartları altındaki davranışları basınç mukavemeti testi ile belirlenmiştir. NaCl taneleri arasına sıvı metalin infiltrasyonu ile başarılı metalik köpük üretmek için gerekli uygun vakum ve üretim şartları belirlenmiştir. Sonuç olarak, vakum döküm yöntemini boşluk tutucu ve çözündürme tekniği ile birleştirerek açık gözenekli alüminyum köpükleri üretilmiştir. Önerilen üretim yolu metalik köpüklerin önemli bir sorunu olan belirsiz hücre yapısının çözümü için önemli potansiyele sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

2012, xi + 54 sayfa

Anahtar Kelimeler: Alüminyum köpük, Vakum döküm, Boşluk tutucu malzeme, Yoğunluk-mukavemet ilişkisi

ABSTRACT

M.Sc Thesis

PRODUCTION OF OPEN CELL ALUMINUM FOAM BY VACUUM CASTING METHOD

Yusuf KALKAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Metal Education

Supervisor: Asist. Prof. Dr. M. Serhat Başpınar

The main objective of this study is to produce and investigate production parameters open cell aluminum foams by vacuum casting method. Another important aim is to characterize the produced foams. For this purpose low vacuum casting setup was designed. NaCl as a space holder material and dissolution technique was used for foaming of the aluminum metal. By changing the NaCl particle size change in the foam properties was investigated. Density-strength relations were determined depending on the NaCl particle size. Compression test was used to evaluate the foam behaviour under static loading. Optimum vacuum conditions for the successful foam production by infiltrating the liquid melt between the NaCl particles were determined. It was concluded that, vacuum casting can be used to produce open cell aluminum foam by integrating of NaCl dissolution process. Proposed production route have great potential to solve the problem of undetermined cell shape of metallic foam productions.

2012, xi + 54 page

Key Words: Aluminum foams, Vacuum casting, Space holder technique, Density-strength relation.

TEŞEKKÜR

Tez konusu seçiminde, araştırma ve deneysel çalışma aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR' a teşekkür eder, saygı ve Őükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışma aşamasında yardımları bulunan Metalografi laboratuvarı sorumlusu Sayın Birol EROL'a ve Metal Eğitimi atölye sorumlusu Ersin DURAK'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışması boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Yusuf KALKAN

AFYONKARAHİSAR, 2012

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. METALİK KÖPÜKLER	2
2.1 Metalik Köpüklerin Tanımı	2
2.2 Hücre Yapısına Göre Metalik Köpüklerin Çeşitleri	4
2.2.1 Açık Hücreli Metalik Köpükler	4
2.2.2 Kapalı Hücreli Metalik Köpükler	5
2.3 Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri	6
2.4 Açık Hücreli Köpük Metal Üretim Yöntemleri	8
2.4.1 Polimer Köpük ile Hassas Döküm	8
2.4.2 Boşluk Tutucu Malzemelerin Etrafına Hassas Döküm	10
2.5 Boşluk Tutucu Malzeme Olarak NaCl Kullanımı	11
2.5.1 Toz Metalurjisi ve Boşluk Tutucu Malzeme Kullanımı ile Köpük Üretimi	11
2.5.2 Eriyik İnfiltrasyonu ve Boşluk Tutucu Malzeme Kullanımı İle Köpük Üretimi	12
2.6 Metalik Köpüklerin Uygulamaları	13
2.6.1 Köpük Metallerin Yapısal Uygulamaları	14
2.6.1.1 Otomotiv Endüstrisi	14
2.6.1.2 Hafif Yapılar	14
2.6.1.3 Çarpışma Enerjisi Emilimi	15
2.6.1.4 Gürültü Kontrolü	18
2.6.1.5 Hava ve Uzay Endüstrisi	18
2.6.1.6 Gemi Yapım Endüstrisi	19

2.6.1.7	Yapı Endüstrisi	19
2.6.2	Köpük Metallerin Fonksiyonel Uygulamaları.....	19
2.6.2.1	Isı Değiştiriciler (Eşanjör.....	19
2.6.2.2	Su Arıtıcılar	21
2.6.2.3	Susturucular	21
2.6.2.4	Alüminyum Köpük Metallerin Dekorasyon ve Sanatsal Uygulamaları.....	22
2.7	Alüminyum Köpüklerin Ekonomisi Kapsamında Yeni Yaklaşımlar.....	22
3.	MATERYAL ve METOT	23
3.1	Deneyleerde Kullanılan Malzemeler.....	23
3.2	Vakum Döküm Sistemi	25
3.3	Deney Serilerin Tanıtımı ve Metalik Köpüklerin Hazırlanması	26
3.4	Deney Numunelerine Uygulanan Testler	33
3.4.1	Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi	33
3.3.2	Basınç Dayanımı Testi	34
3.3.3	Metalografik İncelemeler	34
4.	BULGULAR	35
4.1	Numune Kesitleri.....	35
4.2	Basınç Dayanımı-Yoğunluk İlişkisi ve Ölçümlerin Sonuçları	37
4.3	Hücre Duvarlarının İç Yapılarının Metalografik Değerlendirmesi	42
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	47
6.	KAYNAKLAR.....	50
	ÖZGEÇMİŞ.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

θ	Derece
E	Young'smodülü
ρ^*	Hücrese malzemelerin yoğunluğu
ρ_k	Duvarlardan meydana gelen hücrese malzemenin yoğunluğu
p_r	Göreceli köpük yoğunluğu
σ_{pl}	Plastik Yıkım Gerilimi

Kısaltmalar

Al_2O_3	Alüminyum oksit
TiH_2	Titanyum hidrür
CO_2	Karbon dioksit
P/M	Toz metalürjisi
$NaCl$	Sodyum klorür

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Köpüklerin kullanım alanları.....3
Şekil 2.2	Temsili açık hücre ve DOUCEL yöntemiyle üretilmiş açık hücreli bir alüminyum köpüğün yapısı4
Şekil 2.3	Temsili kapalı hücre ve kapalı hücreli bir alüminyum köpüğün yapısı.....5
Şekil 2.4	Hassas döküm metodu.....8
Şekil 2.5	Polimer köpük kullanılarak hassas döküm yöntemi.....8
Şekil 2.6	Hassas döküm yöntemi (DUOCEL Yöntemi).....9
Şekil 2.7	Boşluk tutucu kullanılan üretim yöntemi.....10
Şekil 2.8	Toz metalurjisi ile uygulanan Sinterleme-Çözündürme tekniğinin akım şeması.....12
Şekil 2.9	Otomotiv alanında yapısal uygulamalar.....14
Şekil 2.10	Çarpışma kutusu kullanımı.16
Şekil 2.11	Tramvaylar için çarpışma emici yapı.....17
Şekil 2.12	Açık hücreli köpük metal boyunca basınçlı devir daim ile soğutulan çoklu-çip parça dizaynı.....20
Şekil 3.1	Numune üretim akım şeması.....29
Şekil 3.2	Al-Si Denge diyagramı.30
Şekil 3.3	Plastik yıkım geriliminin ölçülmesi için temsili bir basma deney grafiği..34
Şekil 4.1	Metalik köpüklerin basınç gerilmesi altındaki davranışı.....37
Şekil 4.2	D serisinin basma grafikleri: (a) D1, (b) D2, (c) D.....38
Şekil 4.3	DS serisinin basma grafikleri: (a) DS1, (b) DS2, (c) DS3.....39

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Metalik köpüklerin ve köpüklüyapıların ana üretim teknikleri... ..7	7
Çizelge 3.1 Etial-5 ve Al-12Si külçelerin spektral analizleri.....23	23
Çizelge 3.2 Deney gruplarının içerikleri27	27
Çizelge 3.3 Deney numunelerinin üretim parametreleri.....31	31
Çizelge 4.1 Numunelerin mukavemet-yoğunluk ilişkileri.....41	41

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim2.1 İnfiltrasyonunda kullanılan NaCl preformlar (a) ve çözündürme sonrası hücre yapısı (b)..... 13	13

Resim 2.2	Alüminyum hafif-ağırlıklı sandviç panel örneği.....	15
Resim2.3	Alüminyum sandviç panelden yapılmış bir kaldırma kolu	15
Resim2.4	Çarpışma kutusu örnekleri	16
Resim 2.5	Motor bloğu montaj parçaları, soldan sağa; boş döküm, alüminyum köpük çekirdek içeren yekpare parça, kesit görüntü	17
Resim 2.6	Köprü yapılarında altında ses sönümleyici levha yapı	18
Resim2.7	Köpük metal ısı değıştirici	20
Resim 2.8	Alüminyum köpükten yapılmış susturucular	21
Resim 3.1	Kırma işlemi öncesi kayaç halindeki NaCl.....	23
Resim3.2	Kırılan NaCl tanelerinin elek ile sınıflandırılması (a) ve boyut grupları (b).....	24
Resim3.3	Kurutma işleminde kullanılan vakumlu etüv	25
Resim 3.4	Vakum döküm sistemi (a) ve kalıbı (b)	26
Resim 3.5	D1 numunesi için farklı vakum değerlerinin kalıp doldurma etkinlikleri. (a:-0,4 bar, b: -0,6 bar, c: -0,8 bar)	28
Resim 3.6	Ergitme işleminin yapıldığı fırın ve pota (a). Sıcaklık ölçümünde kullanılan daldırma tip termokupl (b) ve kalıp sıcaklığını ölçmek için kullanılan optik pirometre (c)	32
Resim 3.7	Tuz çözündürme düzeneği	33
Resim 4.1	Döküm sonrası elde edilen numunelerin kesitleri ve hücre yapıları (a: D1,b:D2, c:D3).....	35
Resim 4.2	Yapı içerisinde çözünmeyen tuz dışındaki mineral maddeler.....	36
Resim4.3	Numunelerin ölçüm için işlenmesi (a.) ve yoğunluk için kullanılan	

numuneler (b).	36
Resim 4.4 D ve DS serilerinin basma deneyi sonundaki farklı deformasyon şekilleri.....	40
Resim4.5 DS grubu numunelerde hücre duvarındaki gaz boşlukları.....	43
Resim 4.6 D grubu numunede farklı hücre duvar kalınlıklarındaki alüminyum tane yapısı (a.Kalın hücre duvarı, b. İnce hücre duvarı).....	44
Resim 4.7 D grubu numunede köpük malzemenin hücre duvarına uzak bölgede tane yapısı	44
Resim 4.8 DS serisi numunelerde gözlenen hücre duvarındaki gözenekler	45
Resim 4.9 DS serisi numunelerde kalın hücre duvarındaki iç yapı görüntüsü	45
Resim 4.10 DS serisi numunelerde ince hücre duvarındaki iç yapı görüntüsü.....	46

1. GİRİŞ

Son yıllarda metalik köpüklerin endüstriyel uygulamalarda kullanımında önemli artışlar olmuştur. Sıklıkça kullanılan alüminyum esaslı metalik köpükler, çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir. Metalik köpüklerin birçok alanda kullanılmasının en önemli nedeni diğer özellikleri ile birlikte hafif olmasından kaynaklanmaktadır. Metalik köpük malzemelerin kullanım alanlarını 2 ana grupta toplamak mümkündür; yapısal uygulamalar ve fonksiyonel uygulamalar. Alüminyum köpükler, sahip oldukları avantajlı yoğunluk-mukavemet oranıyla, darbe enerjisini plastik enerjiye dönüştürebilmekte ve birçok metalden daha fazla enerji absorbe edebilmektedirler (Banhart 2001). Bu malzemelerin kullanım alanları arasında özellikle otomotiv ve, uzay sanayi, demiryolu taşımacılığı ve asansör gibi alanlar bulunmaktadır.

Son yıllarda yüksek dayanımlı aynı zamanda hafif malzemelere duyulan ihtiyacın artması ile metalik köpüklerin yapısal ve fonksiyonel malzeme olarak kullanımına ilgi artmıştır. Metalik köpüklerin yüksek dayanım, düşük yoğunluk, titreşim, ses ve enerji sönümlenme gibi özelliklerinden dolayı özellikle otomotiv, demir yolu taşımacılığı, gemi yapımı, hafif konstrüksiyonlar, uçak ve uzay sanayi gibi alanlarda kullanımına ilişkin yoğun çalışmalar devam etmektedir (Davies and Zhen 1983, Olurin *et al.* 2000, Banhart 2001).

Metalik köpüklerin üretim yöntemleri için çok farklı üretim yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemleri çok temel olarak iki ana grupta toplamak mümkündür. Bunlarda birincisi toz metalurjisi tekniği ile gerçekleştirilen köpük üretim yöntemleri, ikincisi ise eriyik metalden giderek yapılan köpük üretim yöntemleridir. Her iki yöntemde kendine özel avantaj ve problemleri vardır. Bununla birlikte her iki yöntemde de hücre yapısının açık veya kapalı tip olmasına göre farklı metotlar uygulanmaktadır. Farklı üretim yöntemleri arasında ortak olan en büyük problem, üretilen metalik köpüğün hücre yapısındaki heterojenlik ve buna bağlı olarak köpük malzemenin özelliklerinin her zaman farklı olmasıdır.

Bu çalışmanın temel amacı, metalik köpük üretimindeki bu önemli problemin çözümüne katkıda bulunacak yeni bir üretim yaklaşımı getirmektir. Bu amaçla ergitme ve döküm yöntemi temel alınarak geliştirilen vakum döküm yöntemi kullanılmıştır.

Köpük hücre yapısını oluşturmak amacıyla, çok bilinen çözünen boşluk tutucu yöntemi kullanılmıştır. Boşluk tutucu malzeme olarak ise yine sıklıkça kullanılan NaCl taneleri kullanılmıştır. Bu yeni üretim yaklaşımı ile alüminyum esaslı metalik köpükler üretilmiş, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.

2.METALİK KÖPÜKLER

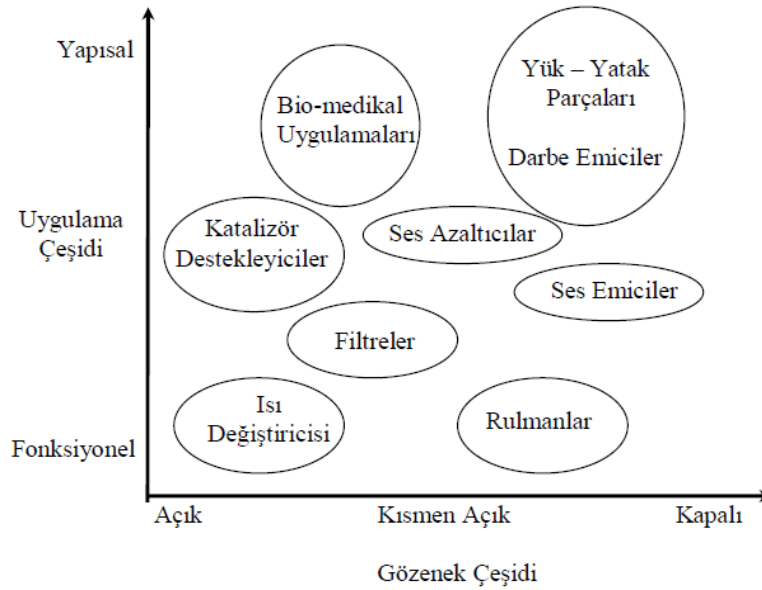
2.1. Metalik Köpüklerin Tanımı

Metalik köpükler, süngerler gibi gözenekli bir yapıya sahiptir. Doğal bir ürün değildir. Gözenekli yapı, bazı işlemler uygulandıktan sonra meydana gelir. Doğal köpükle hiçbir ilgisi olmamasına rağmen görünüm ve bazı özelliklerinden dolayı “metalik köpük” olarak adlandırılırlar ve köpükler, tamamen çözülmeyen bir gaz ile bir sıvının dağılımını kapsayan, farklı işlemler ile oluşturulmuş iki faz karışımının sonucudur. Bu işlem emülsiyon işlemine çok benzemektedir fakat köpük içerisinde gaz fazının bulunmasından dolayı farklılık gösterir (Çinici 2004, Hernández 2005).“Köpük metal” veya ” metalik köpük” terimi özellikle son yıllarda oldukça fazla olarak duyulmaya başlanmıştır. Tam anlamıyla metalik köpüklerin ne olduğunu anlayabilmemiz için değişik ifadeleri ayırt etmek yararlı olacaktır. Hücresel Metaller; en genel kullanılan terimdir. Çeşitli gazların metalik gövde içerisinde dağılarak boşluk oluşturduğu yapıyı kapsamaktadır. Metalik faz, gaz fazı içeren kapalı hücrelerden oluşur.Gözenekli Metaller; metal yapı çok sayıda gözenek tarafından oluşmuştur. Gözenekler genellikle küreseldir ve birbirlerinden yalıtılmış halde bulunurlar. Köpük Metaller;hücresel metallerin özel bir sınıfıdır. Hücreler kapalı, küresel veya çokyüzlü (polihedral) ve her biri birbirinden ince bir filmle ayrılmıştır. Metalik Süngerler;hücresel metallerin yapıbilimidir. Genellikle birbirine bağlı gözenekten oluşur.Bu kavramlar birbiri ile ilişkilidir. Örneğin köpük metal, gözenekli ve hücresel bir yapıya sahip olmakla beraber sünger metal hücrelere sahip olmak zorunda değildir. Bazen malzemeleri ayırt etmek o kadar kolay değildir(Ashby *et al.*2000)

Son yıllarda farklı gözenekli malzemeler için farklı uygulama alanları bulunmuştur. Polimer ve cam köpükler düşük ısı iletkenlikleri sebebi ile ısı yalıtkanlık gerektiren

uygulamalarda, iyi enerji emme kapasitesi gösterdiklerinden dolayı da ambalajlamada kullanılırken seramik köpükler yüksek sıcaklık dayanımları sebebiyle metal döküm sektöründe filtreleme gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu malzemelere nispetle yeni bir grup malzeme olan metal köpükler hafiflik ve rijitlikleriyle iyi ısı ve ses izolasyonu ve iyi alev kaparı özelliği sağlamalarının yanı sıra otomotiv ve havacılık uygulamalarında da kullanım alanı bulmaktadır. Metalik hücreli malzemelerin yapısal kullanım alanları arasında otomotiv, demiryolu ve inşaat endüstrileri, uzay araçları, gemi ve spor malzemeleri yapımı ve biyomedikal uygulamalar; işlevsel kullanım alanları arasında ise filtreleme ve ayırma, ısı dönüştürücü, soğutma sistemleri, elektrokimyasal uygulamalar, su arıtma, sıvı muhafaza ve iletimi gibi uygulamalar sayılabilir(Güden ve ark. 2001).

Gözeneklendirilerek yukarıda sözü geçen kullanım alanlarında değerlendirilen metaller ve alaşımlar arasında alüminyum, titanyum, çelik, nikel bazlı süper alaşımlar, kurşun, çinko ve kalay sayılabilir(Banhart 2004). Bunların arasında düşük maliyeti sebebi ile alüminyum ve alaşımları birçok bilimsel çalışmaya konu olmuş ve geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Metalik köpükleri konu alan araştırma projelerinin büyük çoğunluğu alüminyum ve alaşımlarının eriyik halde köpüklendirilmesine odaklanmıştır(GergelyandClyne, 2000). Metalik köpüklerin hücre yapılarına göre kullanım alanları Şekil 2.1’de özetlenmiştir (Banhart 2001, Yavuz 2010).



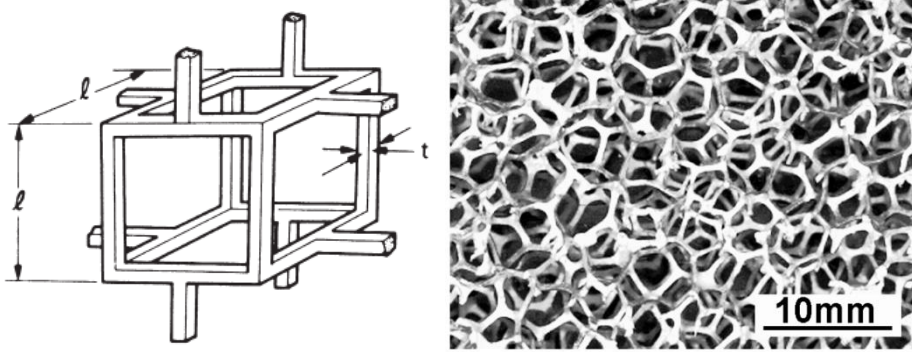
Şekil 2.1 Köpüklerin kullanım alanları

2.2. Hücre Yapısına Göre Metalik Köpüklerin Çeşitleri

Metalik köpükleri sınıflandırmanın birçok farklı yöntemi olmasına rağmen, genel olarak metalik köpükler hücre yapısının şekline göre açık veya kapalı hücreli köpükler olarak sınıflandırılırlar. Her iki yapı biçimi de %(80-95) oranına varan boşluk ve %(5-20) oranında temel metalik malzemeden oluşurlar (Sertkaya 2008).

2.2.1. Açık Hücreli Metalik Köpükler

Açık hücreli metalik köpüklerde, hücrenin yalnızca kenarları bulunur ve hücre duvarları tamamen kapatmazlar yani yapıdaki boşluklar birbirleri ile bağlantılıdır. Şekil 2.2’de temsili bir açık hücreli metalik köpüğün hücresi ve DOUCEL yöntemiyle üretilmiş açık hücreli bir alüminyum köpüğün SEM mikroyapısı görülmektedir (Dumais 2009).



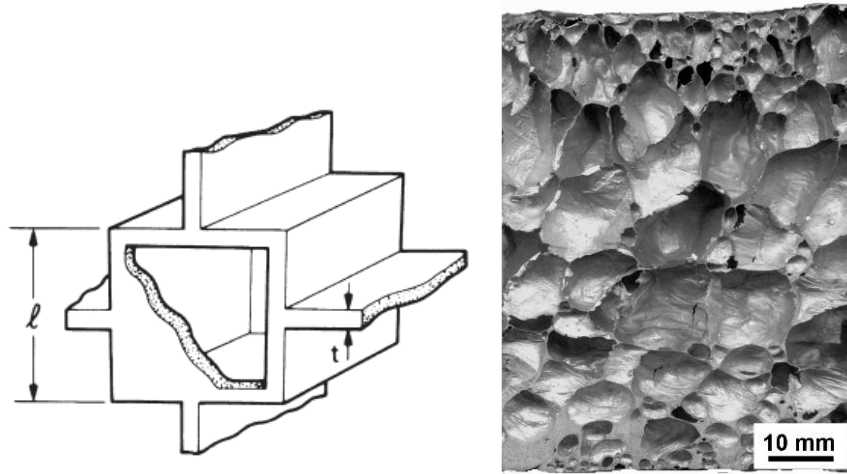
Şekil 2.2 Temsili açık hücre ve DOUCEL yöntemiyle üretilmiş açık hücreli bir alüminyum köpüğün yapısı.

Filtreler, katalizör destekler, ısı değiştiriciler, akışkan sönümlenme kanalları (şok dalga yayılım cihazlarının farklı tipleri dâhil), biyomedikal protezler, içten soğutmalı şekil hafızalı aktüatörler, hava pilleri ve koruyucu geçirgen zar süzgeçleri ve kılıflarını kapsayan güncel uygulamalar ve önerilenler açık hücreli metalik köpüklerle üretilmesi uygundur. Bu tarz fonksiyonel bileşenler yalnızca yapısal uygulamalardan daha yüksek değerleri birleştirme eğilimindedir ki bu, açık hücreli metal üretimi genel olarak daha yüksek maliyetler açısından uygundur. Hücre yapısının ölçüsü, yoğunlukla fonksiyonel karakteristikler için önemlidir. Bu elbette, filtreler ve sıvı akışını sınırlama cihazları için temel bir özellik olacaktır. Fakat, protezimplantlar içinde kemiğin gelişimi nispeten kaba gözenekler gerektirebilir, bu yüzden ince bir hücre boyutu, sıklıkla ısı değiştiriciler

vb. (gözeneklerin tıkanması tehlikesi ile sınırlamalar getirilmesi doğaldır) için tercih edilebilir. Ancak, bu özellikler sıklıkla minimum bir dayanım ve süneklik gerektirmesi ile birlikte ihtiyaç duyulacaktır. Böylece nispeten ince, üniform hücre yapısı ve hatasız hücre mikro yapılar, bu açıdan daha faydalı olabilir. Çeşitli alaşım sistemleri, işlem optimizasyon konularının daha iyi anlaşılması için daha gerekli hale getirdiğinden dolayı metaller, açık hücreli metallerin uygulamaları için geniş bir yelpazede araştırılmaktadır (DegischerandKristz 2002).

2.2.2. Kapalı Hücreli Metalik Köpükler

Kapalı hücreli metalik köpüklerde, hücre duvarları mevcuttur ve boşluklar köpük duvarları ile tamamen kapatılmış olup malzeme içinde baloncuklar şeklinde yer alırlar. Kapalı hücreli metalik köpükler yaklaşık olarak 1990'dan beri geliştirilmektedir. Hücre boyutu veya gözeneklerin boyutu genellikle 1-8 mm arasındadır. Şekil 2.3'te temsili bir kapalı hücreli metalik köpüğün hücresi ve kapalı hücreli bir alüminyum köpüğün X-RAY tomografisi görülmektedir (Ergönenç 2008, Dumais 2009).



Şekil 2.3 Temsili kapalı hücre ve kapalı hücreli bir alüminyum köpüğün yapısı.

Kapalı hücreli köpükler üretilme eğiliminde döküm malzemelerin ucuz üretilmesi için en umut verici metot olduğundan beri(genellikle alüminyum) ilgi, birçok yapısal uygulama için bunlar üzerine yoğunlaşmıştır. Kapalı hücreli köpük içeren farklı bileşenler, uygulanmış nispeten düşük yükler (sıkıştırma) altında enerjiyi kademeli olarak absorbe etmek için tasarlanmıştır. Prensip, hücre duvarlarındaki sınırlama, katı metal ile karşılaştırıldığında, büyük plastik gerinimler, enerjinin önemli derecede

emilimi ile akordiyona benzer deformasyon yoluyla ortaya çıkabilir. Ancak bu gibi bileşenlerin performansı, örneğin eğilim anında eğer, herhangi bir kopma meydana gelirse bileşenler kolayca kırılma eğilimi gösterir. Bu kötü çekme, süneklik göstermiş ve kesme bantları içinde meydana gelen erken hasar ile şimdiye kadar genellikle hayal kırıklığı yaratmıştır. Şu an, hücre boyutu, alt mm seviyelerine tercihen üniform ve ince tutulabildiğinde problemler önemli derecede azalmış olduğu belirlenmiş ve böylece, ürün hacmi içindeki malzeme gibi toplu olarak bu tür malzeme üretme yeteneğine sahip işlem tekniklerinin geliştirilmesini güçlü bir şekilde teşvik etmiştir. Ayrıca, bu köpüklerde hücre duvarları, örneğin büyük seramik parçacıklar ve ince oksit filmler gibi ağır gevrekleştirici bileşenler içerdiği yaygındır. Bazı bu tür bileşenler ergitme viskozitesini arttırmak amacıyla işlem esnasında sıklıkla bilerek katılmaktadır ve böylece hücrenin kabalaşmasını ve drenajını engeller. Son zamanlardaki çalışmalar, bu tür bileşenlerin köpüğün mekaniksel özellikleri üzerinde son derece zararlı etkiye sahip olduklarını ve bunun için mekanizmaların sorumlu olduğu özetlenerek doğrulanmıştır. Hem işlem yöntemlerinin geliştirilmesinde ve hem de bu etkilerin daha detaylı anlaşılmasında bu bileşenlerin ortadan kaldırılması veya uygun bir şekilde değiştirilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Kapalı hücreli köpükler aynı zamanda uygulamanın diğer türleri için örneğin termal bariyerler gibi önemli bir yere sahiptir. Buna karşın, bunun için sıklıkla seramik malzemeler tercih edilecektir (Degischer 2002).

2.3.Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri

Alüminyum köpük metal uzun yıllardan günümüze çeşitli yöntemler kullanılarak geliştirilmiş olup ticari önemi nedeniyle en çok alüminyum gibi hafif metallerden üretilmektedir. Metalik köpükler uzun yıllardır üretilmekle birlikte daha düşük maliyet ve daha iyi performans sağlayan ürünler meydana getirilebilmesi için birçok üretim metodu geliştirilmiştir. Farklı üretim yöntemlerinden bazıları ise ticari isimleri ile adlandırılmıştır. Metalik köpükler; ergitme bazlı, toz bazlı ve çökeltme yardımıyla olmak üzere genel olarak 3 farklı üretim yöntemi mevcuttur. Çizelge 2.1'de üretim yöntemlerinin bir özeti gösterilmiştir(Yavuz 2011).

Çizelge 2.1. Metalik köpüklerin ve köpüklü yapıların ana üretim teknikleri.

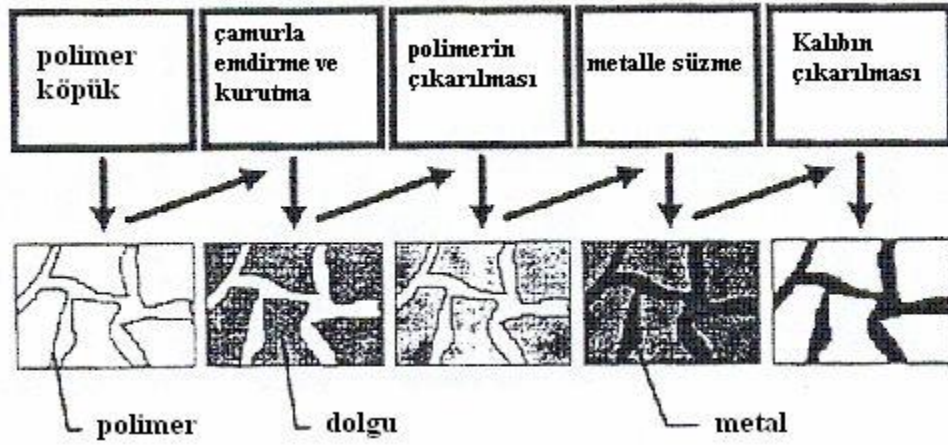
Üretim Tekniği	Katı Hal	Gözeneklilik	Hücre boyutu ve tipi	Ticari adı veya tipi
	Bileşimi			
<u>Ergitme bazlı yöntemler</u>				
Gaz enjeksiyon	Al alaşımları+ Seramik parçacıkları	% 80-98	3-25mm, kapalı hücreli	ALCAN (ayrıca CYMAT ve HYDRO)
Gecikmeli serbest gaz üretimi	Al alaşımları+ Seramik parçacıkları	% 50-96	0,8-3mm, kapalı hücreli	FORM GRIP
Oksidasyonda n önce <i>in stiu</i>	CP Al+ (oksidasyon parçacıkları)	% 89-93	4,8mm, kapalı hücreli	ALPORAS
Ötektik gaz reaksiyonu	Ni, Cu, Mg, Al ve diğer malzemeler	% 5-75	5µm-10mm, açık ve kapalı hücreli	GASAR
İnfiltrasyon ve replikasyon	6101 ve A356	% 88-92	0,5-4,3mm, açık hücreli	DUACEL
	Al	% 60-70	10µm-1mm, açık hücreli	Çoğaltılmış köpük yapısı
	Al, Mg ve Ti alaşımları	<% 55	0,06-3,7mm, seramik içi boş küreler	Sintaktik gözenekli yapılar
<u>Toz bazlı yöntemler</u>				
Köpükleştirici öncü ile birleştirilmiş toz katkısının ısıtılması	Al alaşımları+artı k oksit parçacıklar	% 63-89	1-8mm, kapalı hücreli	ALULIGHT FOAMINAL (IFAM) ALUFOAM
Hapsolmuş öncü gazın ısıtılması	Ti-6Al-4V	% 20-40	10-100µm, kapalı hücreli	LDC sandviç
<u>Sinterleme</u>	Çelik, Ti ve Nibazlı içi boş küreler	% 65-87	0,5-6mm, kapalı hücreli	İçi boş küre yapılar
	Farklı metal tozlar	% 30-50	Ara bağlantılı ağlar	Sinterlenmiş tozlar
	Farklı metal fiberler	<% 95	Ara bağlantılı ağlar	Sinterlenmiş fiberler

2.4.Açık Hücreli Köpük Metal Üretim Yöntemleri

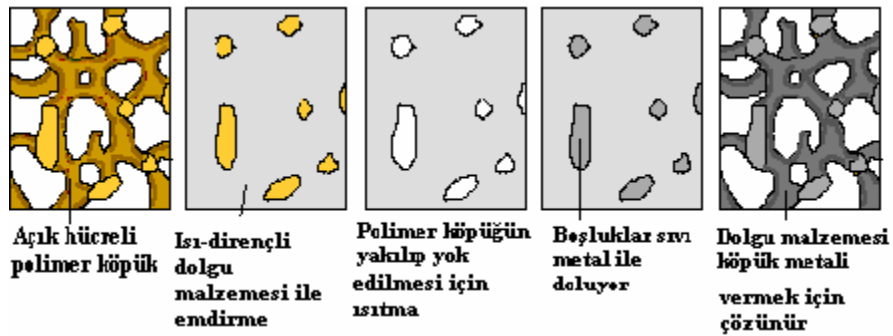
Açık hücreli köpük metaller genellikle hassas döküm yöntemleriyle üretilirler. Açık hücreli köpük metal üretmek için kullanılan başlıca yöntemler aşağıda verilmiştir.

2.4.1 Polimer Köpük ile Hassas Döküm

Sıvı metalden direkt olmadan da köpük metal üretmek mümkündür. Bu yöntem “emdirme” olarak adlandırılır (Amjad 2001). Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de bu yöntem şematik olarak gösterilmiştir(Özer 2005).



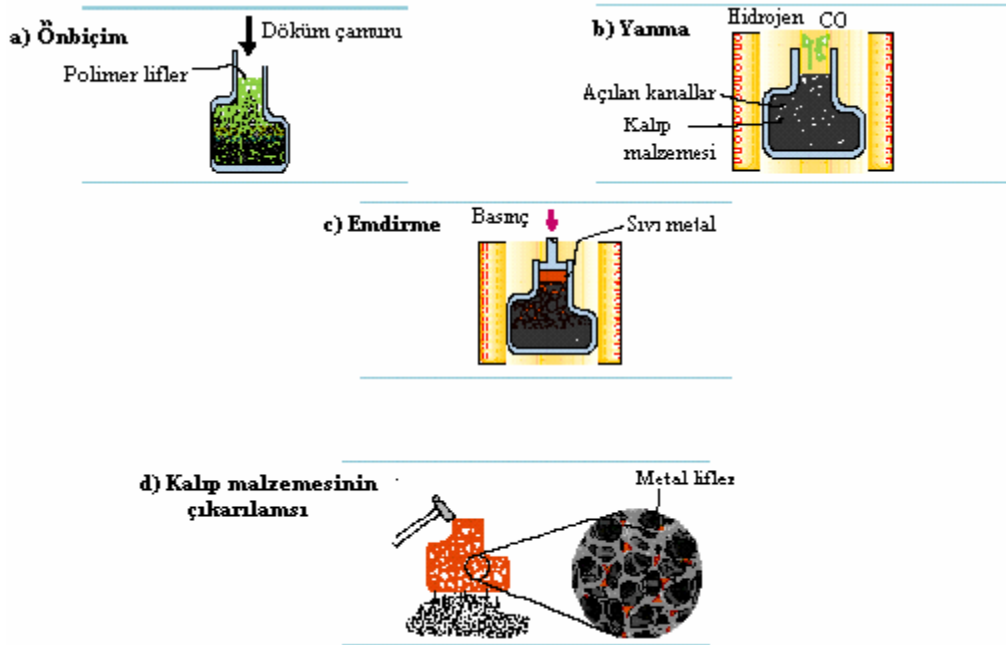
Şekil 2.4 Hassas döküm metodu.



Şekil 2.5 Polimer köpük kullanılarak hassas döküm yöntemi.

Bu işleme göre, polimer köpük (mesela poliüretan, polistiren) başlangıç noktası olarak kullanılır. Köpük yapısı açık hücrelidir ve sonra, müllit, kalsiyum karbonat ve fenolik reçine gibi yeterli ısı direnci malzemelerle veya basit bir alçıyla doldurulur.

Polimer kuruduktan sonra orijinal polimer köpük yapısının yerini alan açık boşluklara sıvı metal dökülür. Eğer dar boşluklara sıvı metal dolumu tam olmazsa basınç ve kalıbı ısıtma gerekli olabilir. Kalıp malzemesi çıkarıldıktan sonra (mesela basınçlı su yardımıyla) orijinal köpük polimerin yerini metalik yapı tam olarak alır. Bu yöntemin ticari adı “DUOCEL” olarak bilinir ve ERG Malzeme ve Uzay Şirketi (ABD) tarafından desteklenmektedir. 6101 veya AlSi7Mg (A356) gibi alüminyum alaşımları bu yöntemde tercih edilmekle beraber bakır ve magnezyum gibi diğer metaller de kullanılabilir (Banhart 2001). Yine bu yöntem Şekil 2.6’da şematik olarak görülmekte olup aşağıda özetlenmiştir.



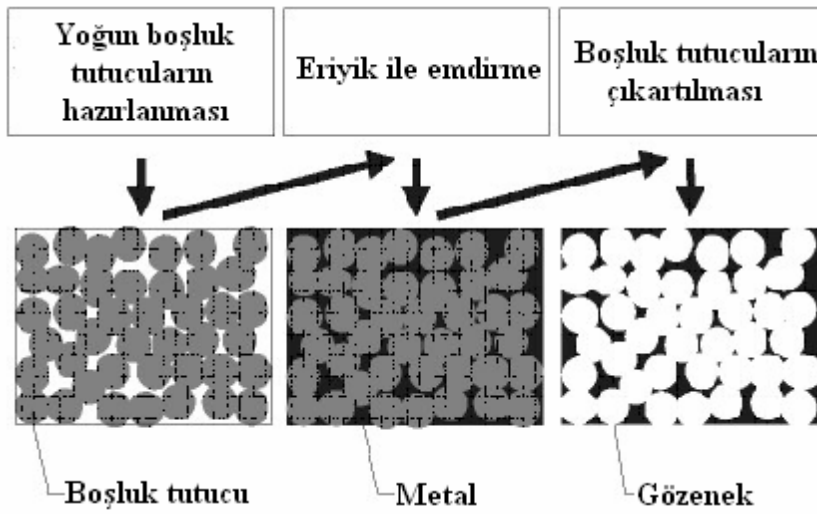
Şekil 2.6 Hassas döküm yöntemi (DUOCEL Yöntemi).

İstenilen hücre boyutunda ve ilgili yoğunlukta hazırlanan açık hücreli polimer kalıp hazırlanır. Daha sonra kalıp, kalıp döküm çamuru (seramik toz) ile kaplanır. Kalıp, döküm malzemesini sertleştirmek ve polimer kalıbı ayrıştırabilme için pişirilir. Sonradan, kalıp metal alaşımı ile doldurulur ve soğumasına izin verilir. Soğutmadan sonra, kalıp malzemeleri çıkartılır, orijinal polimer köpüğün eşiti olan köpük metal

kalıptan ayrılır. Alçı veya plastik gibi diğer kalıp malzemeleri de kullanılabilir. (Amjad 2000).

2.4.2. Boşluk Tutucu Malzemelerin Etrafına Hassas Döküm

Köpük metaller inorganik hatta organik tanecikler veya küreler etrafına sıvı metal dökümü yoluyla üretilebilir. Tanecikler ya dökümden sonra metalik ürün olarak kalmakta ya da uygun bir çözücü veya asitle liç edilerek çıkarılmaktadır. Şekil 2.7' deşematik olarak gösterilmiştir (Banhart 2000).



Şekil 2.7 Boşluk tutucu kullanılan üretim yöntemi.

Vermikülit, çözülebilen tuzlar (NaCl), genişleyen kil tanecikler, kum paletler, köpük cam küreler veya alüminyum oksit boş küreler inorganik dolgu malzemeleri olarak kullanılabilirler. İşlemin sınırlamaları aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Yoğun boşluk tutucuların hazırlanması: bunlar, organik veya inorganik olabilirler.
- Eriyik ile emdirme: tanecikler arasındaki çatlakların tamamen doldurulması için dış basınç gereklidir.
- Çıkarma: Dolgu tanecikleri liç işlemi veya ısıl işlemle çıkarılabilir. Geniş bir oranda metal köpük bu yolla üretilebilir (alüminyum, magnezyum, çinko, kurşun, vb.). Bu yöntemin bir avantajı, verilen dolgu taneciklerinin tanecik boyutu dağılımı tarafından

gözenek boyutu dağılımının kontrol edilebilmesidir. Öte yandan, bu yöntem ile elde edilen maksimum gözeneklilik %80'in altıyla sınırlıdır(Banhart 2001).

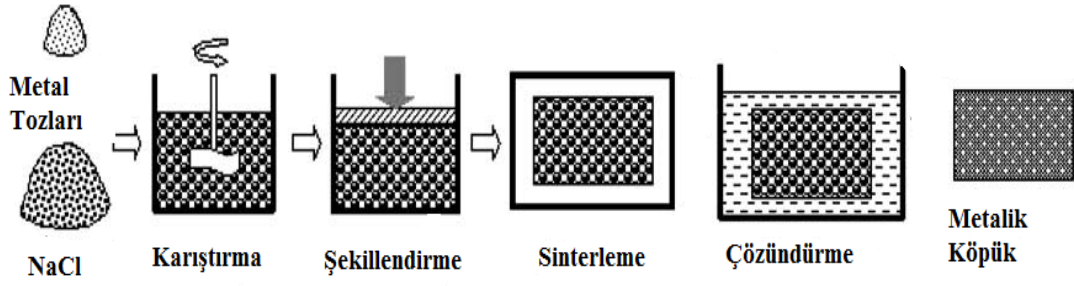
2.5. Boşluk Tutucu Malzeme Olarak NaCl Kullanımı

Boşluk tutucu olarak NaCl kullanımı ve çözündürme işlemi sonucunda metalik köpük üretimi ticari olarak uygulanabilmiş aynı zamanda da halen üzerinde bir çok araştırmacının çalıştığı bir konudur. Boşluk tutucu olarak NaCl kullanımı ve çözündürme işlemi ile köpük üretim yöntemlerini 2 temel şekillendirme yöntemi altında uygulandığı görülmektedir. Bunlardan birincisi toz metalurjisi tekniği, ikincisi ise eriyik metalin infiltrasyonu yöntemidir.

2.5.1. Toz Metalurjisi ve Boşluk Tutucu Malzeme Kullanımı ile Köpük Üretimi

Toz metalurjisi tekniği ile birlikte NaCl tuzunun boşluk tutucu olarak kullanımı bir çok farklı araştırmacı tarafından incelenmiştir (Gaillardet *al.* 2004,Zhaoet *al.*2004, Robert andDelbin 2006).Bu tip bir üretim yaklaşımına literatürde SDP işlemi (sintering-dissolutionprocess) adı verilmiştir ve işlem alış şeması Şekil 2.8'de gösterilmiştir. NaCl tanelerinin ergime sıcaklığının yaklaşık 800 °C seviyesinde olması, özellikle alüminyum gibi düşük sıcaklıklı metallere sinterleme sıcaklığı ile uyum içindedir. Bu nedenle bu teknik alüminyum,çinko,kurşun ve zamak (Zn-Al) alaşımları ile uygulama alanı bulmuştur. “Sinterleme-çözündürme” işleminde işlem öncelikle üretilecek matris metal tozlarının NaCl taneleri ile karıştırılması ile başlar. NaCl tozlarının büyüklükleri istenilen hücre boyutlarına göre değişir. Yapılan çalışmalarda 50 µm ile 1 mm arasında çok değişik NaCl tane boyutları kullanılmıştır. İki farklı malzemenin tam ve homojen olarak karıştırılması sağlandıktan sonra, ham numuneler sinterleme işlemine tabi tutulurlar.

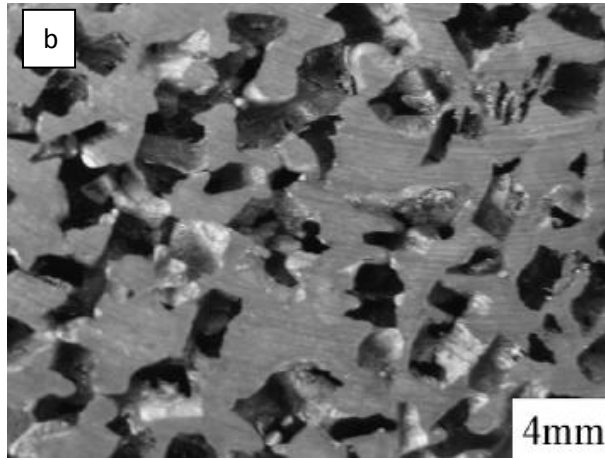
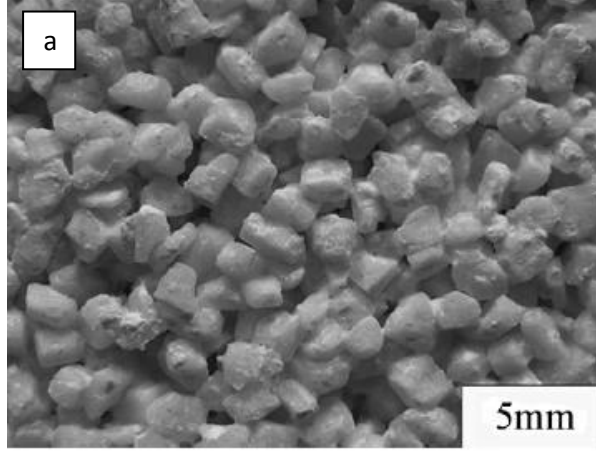
Toz metalurjisi yardımıyla ve NaCl çözünen tuzlar ile yapılan üretimlerin en önemli avantajı oluşturulacak hücre yapısının homojene yakın olmasıdır. Bu tür bir üretim yaklaşımının diğer bir avantajı ise NaCl tane boyutlarındaki küçülmeye bağlı olarak küçük hücre boyutları üretmenin mümkün olmasıdır. İşlemin en önemli dezavantajı, toz metalurjisi yönteminin getirdiği yüksek maliyettir.



Şekil 2.8 Toz metalurjisi ile uygulanan Sinterleme-Çözündürme tekniğinin akım şeması.

2.5.2. Eriyik İnfiltrasyonu ve Boşluk Tutucu Malzeme Kullanımı ile Köpük Üretimi

Toz metalurjisi yönteminde kullanılan tozların ve sinterleme işleminde kullanılması gereken kontrollü atmosfer ortamının maliyeti araştırmacıları alternatif yöntemlere yöneltmiştir. NaCl boşluk tutucu kullanılarak ve eriyik infiltrasyonu yöntemi birleştirilerek alternatif üretim yolu farklı araştırmacılar tarafından çalışılmıştır (Yuet *al.* 2009, Despoiset *al.* 2007). Eriyik infiltrasyonu ile yapılan üretim yönteminde öncelikle NaCl tanelerinden bir preform hazırlanması gereklidir. Despois et al. 2007, yaptığı çalışmada 400 μm büyüklüğündeki NaCl tanelerini soğuk izostatik preste şekillendirmiştir. Daha sonra erimiş olan saf alüminyum 0,2 ile 15,5 MPa basınçtaki argon gazı ile ittirerek infiltrasyon gerçekleştirmiştir. Üretimdeki önemli parametrelerden bir tanesi NaCl preformların ön ısıtılmasıdır ve 710 $^{\circ}\text{C}$ olarak gerçekleştirilmiştir. Yuet *al.* 2009, çalışmada preform hazırlarken NaCl tanelerini sinterleyerek bir bütün haline getirmiştir. Resim 2.1’de elde edilen sinterlenerek üretilen NaCl preform ve bunun üzerine yapılan eriyik infiltrasyonu sonrasında oluşan açık gözenekli metalik köpüğün kesiti görülmektedir. Zhaoet *al.* 2004, eriyik infiltrasyonu yönteminin sınırlamaları olduğunu belirtmiştir. Özellikle 500 μm boyutundan küçük hücreler oluşturmak için işlemin çok yüksek basınçlara ihtiyaç duyduğunu tespit etmişlerdir. Buna bağlı olarak da elde edilen gözeneklilik miktarının %70’den daha az olduğunu belirtmişlerdir.



Resim2.1Eriyik infiltrasyonundakullanılan NaClpreformlar (a) ve çözüldürme sonrası hücre yapısı (b).

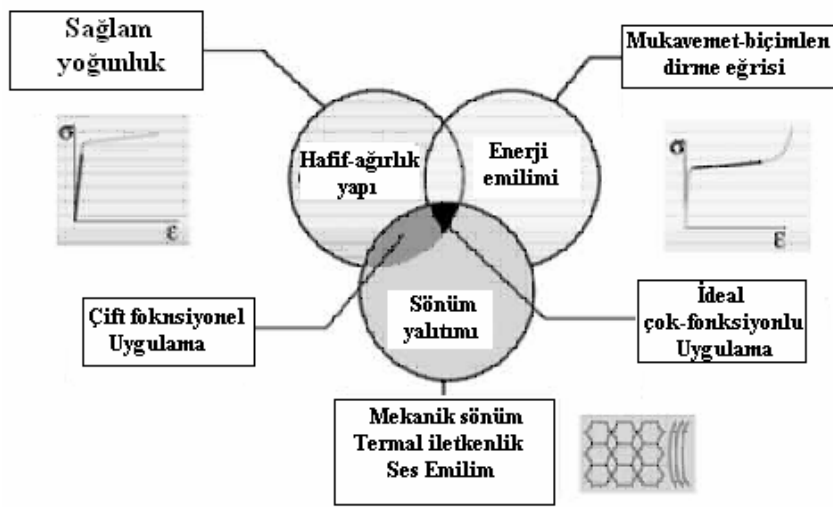
2.6. Metalik Köpülerin Uygulamaları

Köpük metaller birçok iyi özelliğinden dolayı kendilerine değişik endüstri kolunda pek çok kullanım alanı bulmuştur. Köpük metallerin hücre yapısına göre (açık veya kapalı oluşu) kullanım alanları değişmektedir. Köpük metallerin kullanım alanlarını, hücre çeşidi ve uygulama alanlarına göre (yapısal ve fonksiyonel) sınıflandırabiliriz (Banhart 2001).

2.6.1. Köpük Metallerin Yapısal Uygulamaları

2.6.1.1. Otomotiv Endüstrisi

Şekil 2.9 otomotiv endüstrisinde, üç uygulama alanında kullanılan metalik köpükleri (özellikle alüminyum köpükler) özetlemektedir. Burada daireler üç uygulama alanını, dıştaki kutularda o alandan sorumlu köpük özelliklerinin avantajını göstermektedir. İdeal olanı parçanın üç özelliği de içerebilmesidir (hafif yapı, enerji emilimi ve sönüm özellikleri) üç dairenin kesişimi(Banhart 2001).

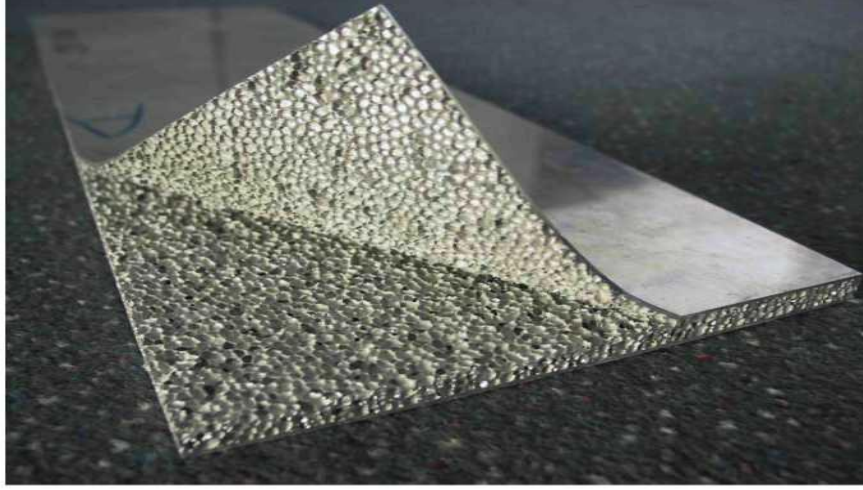


Şekil 2.9 Otomotiv alanında yapısal uygulamalar.

2.6.1.2.Hafif Yapılar

Hafif ve sağlam alüminyum sandviç yapılar arabaların ağırlıklarını azaltmak için yapılan çalışmalara oldukça yardımcı olmuştur. 3 boyutlu bu sandviç paneller arabalardaki orijinal Çelik panellerden yaklaşık olarak 8 kat daha sağlam olup, %25 daha hafiftir (Yuet *al.* 1998).

Alüminyum sandviç paneller alüminyum yüzey plakaların üzerine köpük öncü kütüğü Giydirilmesi ile oluşturulur. Daha sonra plaka, köpürtücü ajanın etkin olması için ısıtılır. Bu, köpük çekirdek yapı kalınlığının yaklaşık %400 genişlemesine ve %80 gözeneklilikte bir yapıya neden olur. Resim2.2'de alüminyum sandviç yapı görülmektedir(BanhartandWeaire, 2002).



Resim2.2 Alüminyum hafif-ağırlıklı sandviç panel örneği.

Yine Resim2.3’de alüminyum sandviç panelin bir kullanım alanı görülmektedir(Banhart 2003).

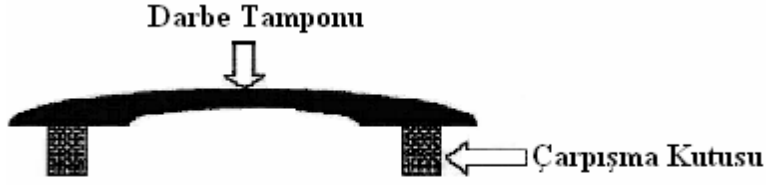


Resim2.3 Alüminyum sandviç panelden yapılmış bir kaldırma kolu.

2.6.1.3. Çarpışma Enerjisi Emilimi

Alüminyum köpüklerin otomotiv sanayindeki uygulamalarına bir diğer örnek çarpışma emicileridir. Birçok şirket yolcuları koruyarak, arabada meydana gelebilecek hasarı azaltıp dolayısıyla tamir masrafını indirmek için çeşitli çalışmalar yapmıştır. Bunun sonucunda çarpışma kutuları keşfedilmiştir (Şekil 2.10). Bu çarpışma kutuları darbe tamponuyla ön korkuluk arasında yer almaktadır. Bu kutular 15 km/s hızdaki bir

çarpışmada bütün enerjiyi emerek deforme olurlar ve arabanın şasisinde meydana gelebilecek daha pahalı bir hasarı önlerler (Banhart 2003).



Şekil 2.10 Çarpışma kutusu kullanımı.

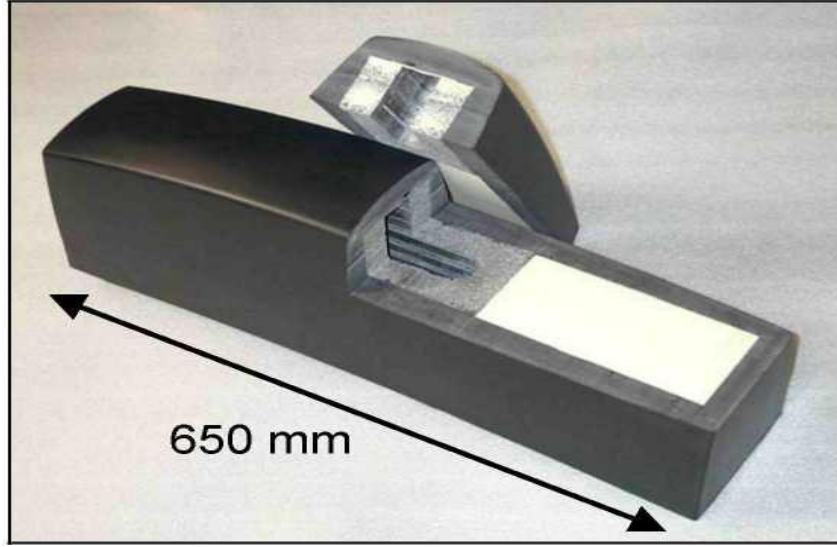
Çarpışma kutuları, alüminyum ekstrüzyon veya çelik bir dış yapının içerisine köpük çekirdek (göbek) malzemenin yerleştirilmesi ile oluşur (Resim2.4). İçerisinde alüminyum köpük bulunan bu kutular, içi boş çarpışma kutularına nazaran çok daha fazla enerji emebilirler (Banhart 2003).



Resim2.4 Çarpışma kutusu örnekleri.

Enerji emiciler aynı zamanda ray bazlı sistemlerde de kullanılmaktadır. Buna bir örnek olarak otorayları verebiliriz. Tramvaylarda, yayalara çarparak araç altında sürüklenmelerini engellemek için koruma olmalıdır. Aynı zamanda, arabalarla temas gibi hafif çarpışmalardan korunmak için etkili çarpışma koruması gereklidir. Almanya'da bulunan 3 şirket (Siemens, Hübner ve SchunkSintermetalltechnik)

tarafından tasarlanan tramvaylarda kullanılacak çarpışma emici sistemi Şekil 2.11.'de görülmektedir (Baumeister *et al.*1997, Banhart 2003).



Şekil 2.11 Tramvaylar için çarpışma emici yapısı.

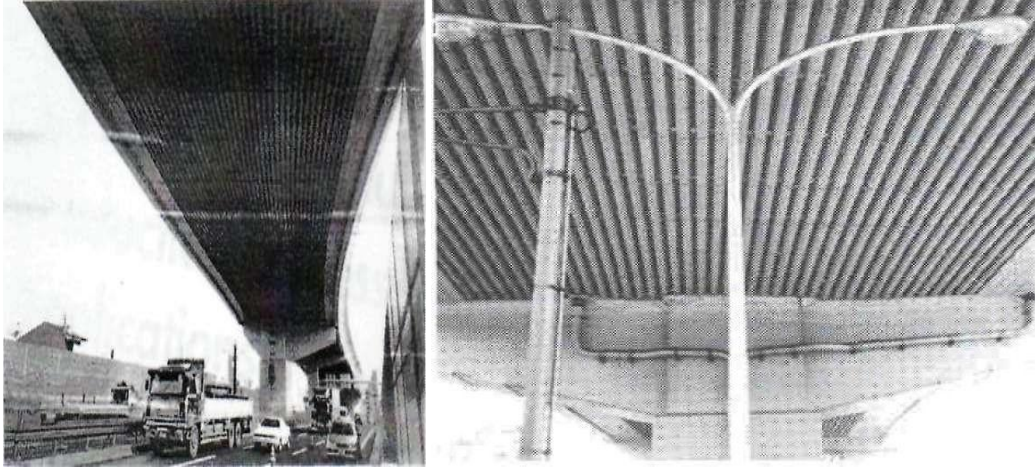
Bu yapı, ekstrüze tozlar tarafından endirekt olarak köpüren alüminyum köpük çekirdek tarafından oluşturulmuştur. Bir başka örnek olarak LKR (Avusturya) ve BMW tarafından alüminyum köpük metali kullanılarak montaj bloğu geliştirilmiştir (Resim 2.5)(Banhart 2003).



Resim 2.5 motor bloğu montaj parçaları, soldan sağa; boş döküm, alüminyum köpük çekirdek içeren yekpare parça, kesit görüntü.

2.6.1.4. Gürültü Kontrolü

Ses emilimi ve yalıtımı otomotiv endüstrisi için çok önemli bir konudur. Alüminyum köpük metaller çok iyi ses yalıtımlarından dolayı bu sektörde kullanılmaktadırlar. Buna örnek bir uygulama Resim2.6'da görülmektedir (Miyoshiet al. 2000).



Resim 2.6 Köprü yapılarında altında ses sönümleyici levha yapısı.

Viyadükün altına levha halinde konan ALPORAS köpük metal yapısı viyadük altından geçen araçların seslerini emerek gürültü kirliliğini ortadan kaldırmaktadır.

2.6.1.5. Hava ve Uzay Endüstrisi

Köpük metallerin hafif-ağırlıklı yapılarının kullanımı otomotiv ve hava-uzay endüstrisinde birbirine çok benzemektedir. Uzay ve havacılık endüstrisi de köpük metal sandviç panelleri yüksek performansı daha ucuza sağladıkları için tercih etmektedir. Boeing (A.B.D.) alüminyum köpük çekirdekli alüminyum sandviç panelleri helikopter kuyruk çubuklarında kullanım yolları geliştirmiştir. Helikopter üreticileri alüminyum köpük metalleri bazı başka parçaların yerine kullanmayı denemektedirler. Uzay sanayisi de alüminyum köpüklerin uzay araçları iniş takımlarında, enerji emen çarpışma malzemesi olarak kullanılmasını geliştirmektedir (Banhart 2001).

2.6.1.6. Gemi Yapım Endüstrisi

Hafif-ağırlıklı yapılar gemi inşa sektöründe dev bir yere sahiptir. Modern yolcu gemileri bütünüyle alüminyum ekstrüzyon, alüminyum levha ve alüminyum bal peteği yapılarından oluşmaktadır. Alüminyum köpük çekirdekli sandviç paneller bu uygulamalardan bazılarında söz sahibi olacaktır. Eğer yüzey tabakaları çekirdek malzemesiyle oldukça elastik olan poliüretan yapıştırıcılarla bağlanırsa, mükemmel sönüm davranışlı hafif ve sağlam bir yapı elde edilir. Köpük metallerin gemi uygulamaları, ambar platformları, gemi bölmeleri, anten platformları ve fişek ambarları gibi alanları kapsamaktadır (Banhart 2001).

2.6.1.7. Yapı Endüstrisi

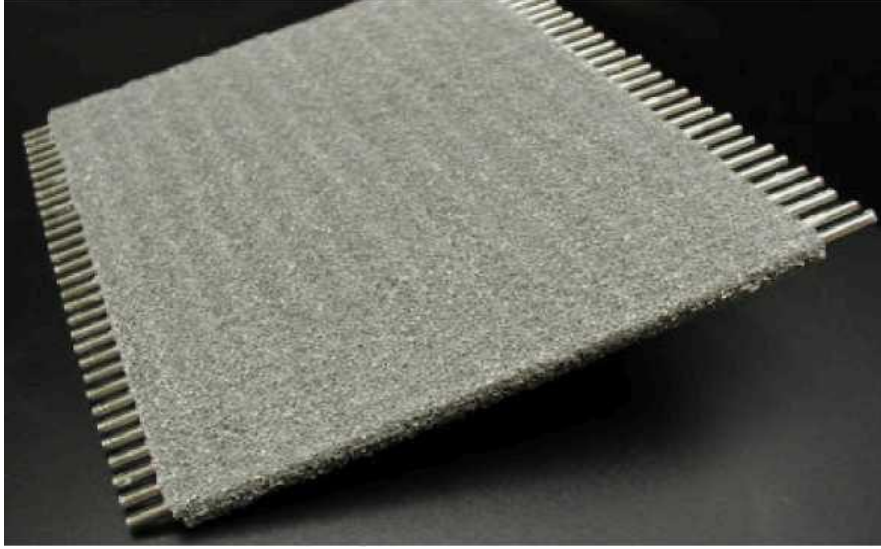
Alüminyum köpük ve köpük paneller asansörlerin enerji tüketimlerini azaltmak için oldukça yardımcı olmaktadır. Çok hızlı modern asansörlerde hafif-ağırlıklı inşa çok önemlidir. Bununla beraber, hafif-ağırlıklı inşa tekniği güvenlik kurallarına uymalıdır. Yangın duvarları ve çıkışları zayıf termal iletkenliği ve yangın direnci olan alüminyum köpük malzemelerle yapılmaktadır (Banhart 2001).

2.6.2. Köpük Metallerin Fonksiyonel Uygulamaları

2.6.2.1 Isı Değiştiriciler (Eşanjör)

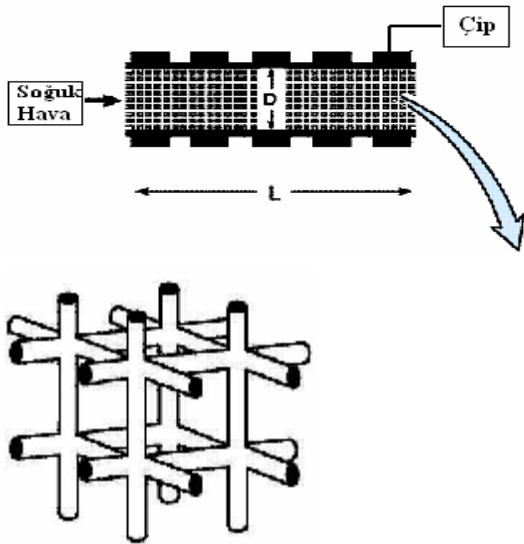
Korozyon direnci, yüksek termal iletkenliği gibi özelliklerinden dolayı açık hücreli alüminyum ve bakır bazlı köpük metaller ısı değiştirici olarak kullanılabilirler. Kapalı hücreli köpük metaller ise düşük termal iletkenliklerinden dolayı termal kalkan olarak kullanılırlar.

Bu uygulamaya örnek olarak, yekpare soğutma radyatörleri ve bilgisayar çipleri ile güç elektroniği için mikro elektronik cihazlar verilebilir (Banhart 2001). Resim 2.7’de metal köpük matrisi içine gömülmüş tüplerden oluşturulan gelişmiş yüksek sıcaklık radyatörü görülmektedir (Haackett *al.* 2001).



Resim 2.7 Köpük metal ısı değiştirici.

Yüksek güç elektronik uygulamasına örnek olarak silisyum mikroçiplerin basınçlı devir daim ile soğutulması gösterilebilir. Silisyum mikroçipler yüksek güç yoğunluğunda çalışırlar (10^7 W/m²'nin üzerinde) ve sıcaklıklarının düşük seviyede tutulması gerekir. Şekil 2.12'de görülen sistem yardımıyla soğutma başarılabilmektedir(Lu *et al.* 1997).



Şekil 2.12Açık hücreli köpük metal boyunca basınçlı devir daim ile soğutulan çoklu-çip parça dizaynı.

Şekil 2.12’de görüldüğü gibi çipler açık hücreli köpük metal sandviç yapının üzerinde bulunan iki plakanın üzerine yerleştirilmiştir. Basınçla devir daim edilen soğuk hava çipleri soğutmaktadır.

2.6.2.2 Su Arıtıcılar

Köpük metaller, suda çözülmüş istenmeyen iyonların konsantrasyonunu azaltmak için kullanılabilir. Bu uygulamada, su açık hücreli köpük metal yapı içerisinden akıtılır. İyonlar ile hücresel matris yapısı redoks reaksiyonuyla tepki gösterir. Hassas döküm ile üretilmiş alüminyum köpük metal yardımıyla, Cr (VI) iyonlarının redüksiyonu literatürde araştırılmıştır (Banhart 2001).

2.6.2.3 Susturucular

Gürültüyü azaltmak için (örneğin, kompresörler için pnömatik aletlerde), Resim 2.8’de örneği görülen uygun susturucular kullanılarak gerçekleştirilebilir. (Banhart 2000).



Resim 2.8 Alüminyum köpükten yapılmış susturucular.

2.6.2.4 Alüminyum Köpük Metallerin Dekorasyon ve Sanatsal Uygulamaları

Alüminyum köpükler süslü mobilyalar, saatler, lambalar gibi alanlarda kullanım olanağı bulmuştur. Eğer sandalye ve masalar alüminyum köpüklerden üretilirse, mekanik özellikleri oldukça iyi bir hale gelecektir. Yüksek fiyatlı hoparlör sistemleri alüminyum köpük metallere yapılabılır. Alüminyum köpük kullanımım sadece yüksek sağlamlık ve mekanik özellikler sağlamaz aynı zamanda geleneksel eşyalara göre daha çekicidir (Banhart 2001).

2.7. Alüminyum Köpüklerin Ekonomisi Kapsamında Yeni Yaklaşımlar

Alüminyum köpükler ucuz bir malzeme çeşidi değildir. Birçok değişik ve yararlı uygulaması olmasına rağmen, yapımında kullanılan hammaddelerden dolayı (metal matrisli kompozit, TiH_2 gibi) maliyeti artmaktadır. Bundan dolayı, alüminyum köpüğün var olan malzemelerin yerini alması uygun görülmemektedir. Burada alüminyum köpüğün çok fonksiyonlu oluşu anahtar bir rol oynar. Çok-fonksiyonludan kast alüminyum köpüğün, mekanik, termal, akustik ve diğer üstün özellikleri gibi, tipik özellikleri ve ikincil uygulamalara (kesme, şekillendirme, geri dönüşüm gibi) uygun oluşudur. Alüminyum köpüklerin maliyet durumları birçok uygulamada araştırılmış ve düşük hacimdeki üretimlerin pazarda yer bulabilmesinin ana problem olduğu görülmüştür. Yüksek Hacimdeki üretimlerde, maliyeti ve dolayısıyla toplam fiyatı düşürecektir. İki önemli metal köpük üretimi yöntemi üzerine yapılan araştırmalar metalik köpük üretim maliyetlerinde önemli azalmaların mümkün olduğunu göstermiştir. Bunlardan birincisi sintaktik köpük üretimi, ikincisi ise köpürtücü ajan olarak gaz veren daha ucuz hammaddeler kullanımınıdır. Sintaktik köpük üretiminde temel olarak yoğunluğu çok düşük çözünmeyen tip boşluk tutucu kullanılarak özellikle seramik esaslı malzemelerin arasına metal sızdırılmaktadır (Palmeret al. 2007, Mondalet al. 2009, Weiseet al. 2010, ZhangandZhao, 2007).İkinci üretim yaklaşımında köpürtücü ajan olarak gaz veren karbonat esaslı daha ucuz malzemeler kullanılmaktadır (Zhaoet al.2005). Toz metalurjisi yerine eriyik ve döküm yöntemi ile üretim şeklinin uygulanması metalik köpüklerin üretim maliyetlerinde önemli azalmalara neden olmaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmalar iki temel bölümden meydana gelmektedir. Deneysel çalışmaların ilk bölümündetasarlanmış olan vakum döküm sistemi ile başarılı köpük üretim parametreleri belirlenmiştir. İkinci bölümünde ise üretilen köpüklerin özellikleri belirlenmiştir. Bu bölümde deneylerde kullanılan malzemelerin özellikleri, hazırlanma yöntemleri ve köpük üretimi için kullanılan parametreler açıklanmıştır.

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Vakum döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum esaslı köpükler için %99,7 saflığındaki alüminyum (Etial-5)ve Al-12Si ötektikalaşımı kullanılmıştır. Kullanılan metalik malzemelerin spektral analizleri Çizelge3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Etial-5 ve Al-12Si külçelerin spektral analizleri

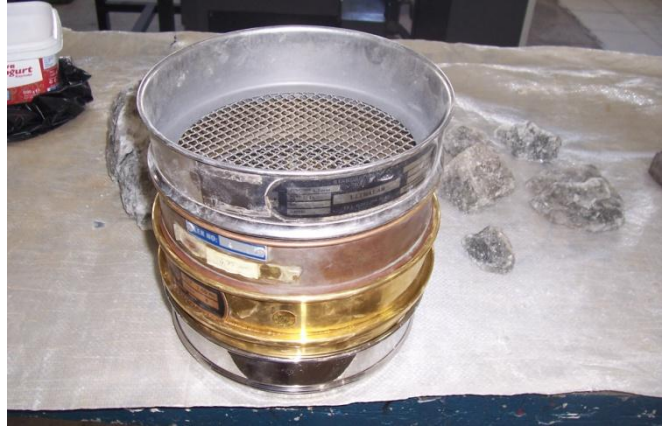
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
Al-12Si	%12,33	%0,161	%0,0085	%0,0041	%0,158	%0,00097	%0,0038
Etial- 5	%0,25	%0,40	%0,05	---	---	---	---

Metal köpük üretiminde hücre oluşumu için çözünen tip boşluk tutucu malzeme olarak NaCl kullanılmıştır. Farklı boyutlarda iri NaCl taneleri elde etmek için kayaç NaCl kayaç halinde temin edilmiş ve bir seri kırma ve sınıflandırma işlemine tabii tutulmuştur. Temin edildiği halde NaCl kayaç görüntüsü Resim 3.1’de gösterilmiştir.

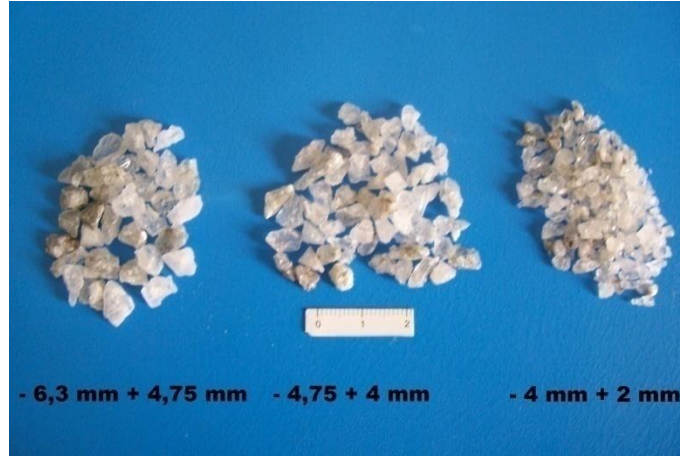


Resim 3.1 Kırma işlemi öncesi kayaç halindeki NaCl.

Kırma işlemi çekiç yardımıyla gerçekleştirilmiş ve kayaç halindeki hammaddenin daha küçük tanelere ayrılması sağlanmıştır. Kırılmış olan NaCl daha sonra 6,3 mm, 4,75 mm, 4 mm ve 2 mm açıklıklı tel eleklerden elenerek (Resim 3.2a), 3 farklı boyut grubuna sınıflandırılmıştır. Bu tane boyut sınıfları sırasıyla -6,3mm + 4,75 mm, -4,75 mm + 4 mm ve -4 mm + 2 mm'dir (Resim 3.2b). Elde edilen bu farklı boyut grupları bazında metalik köpükler üretilmiştir.



a.



b.

Resim 3.2 Kırılan NaCl tanelerinin elek ile sınıflandırılması (a) ve boyut grupları (b).

Kırma ve sınıflandırma işleminden sonra NaCl taneleri kurutulularak bünyesindeki fiziksel su uzaklaştırılmıştır. Bu amaçla Resim 3.3'te görünen laboratuvar tipi vakumlu etüv kullanılmıştır. Kurutma işleminin temel amacı, döküm sırasında tuz tanelerinden buharlaşabilecek nemin metal bünyede gözenek hatasına yol açmamasıdır. Kurutma

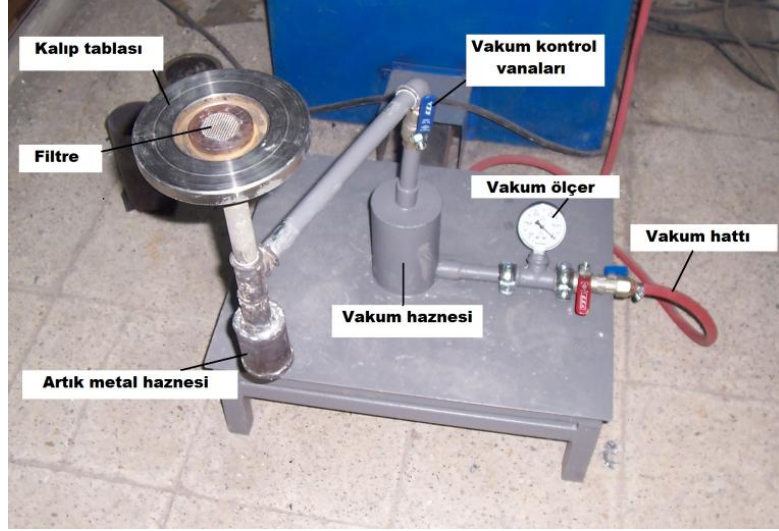
işleminin daha etkin yapılması için -0,2 bar vakum altında kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi 105 °C’de 4 saat olarak uygulanmıştır.



Resim 3.3Kurutma işleminde kullanılan vakumlu etüv.

3.2. Vakum Döküm Sistemi

Deneylerde kullanılan vakum döküm sistemi Resim 3.4’de gösterilmiştir. Vakum döküm sistemi temel olarak vakum pompası, vakum ölçer, vakum haznesi, kalıbın oturduğu bir tabla, kalıp, filtre ve döküm sırasında oluşabilecek fazla metalin tutulduğu bir kısımdan oluşmaktadır. Sistem içindeki vakumun tahliyesi ve kalıp içinde gerçekleşecek infiltrasyon işlemi vakum kontrol vanalarının açılıp kapanması ile yönetilmektedir. Kalıp içine konulan NaCl tuzlarının vakum hava hattına kaçısını engellemek için alüminyum filtre kullanılmıştır. Rotary tip bir vakum pompası ile -0,95 bar vakum oluşturulabilmektedir. Boşluk tutucu malzemeyi içinde barındıran ve sıvı metalin döküldüğü kalıp çeliltene imal edilmiştir (Resim 3.4b). Kalıp yapılan dökümün kolay çıkarılması için aksel olarak iki parçalı olarak tasarlanmıştır. Kalıbı yüksekliği 100 mm ve iç çapı 50 mm’dir. Etkinliği 10 mm olacak şekilde imal edilmiştir. Döküm sonrasında olabilecek metal yapışmalarını engellemek ve dökümün daha kolay çıkmasını sağlamak için kalıp iç yüzeyine her döküm öncesinde toz grafit uygulanmıştır.



a.



b.

Resim 3.4 Vakum döküm sistemi (a) ve kalıbı (b).

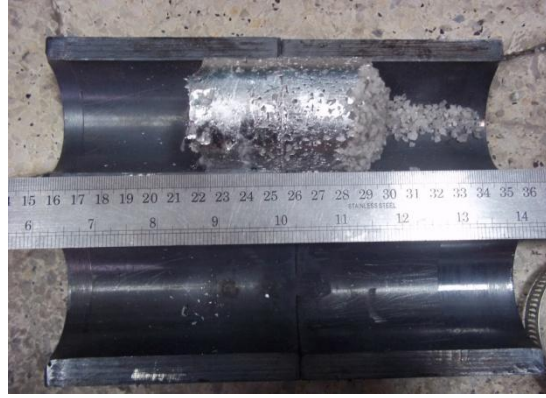
3.3. Deney Serilerin Tanıtımı ve Metalik Köpüklerin Hazırlanması

3 farklı NaCl tane boyut grubu, saf alüminyum ve Al-12 Si alaşımı olmak üzere 2 farklı metal kullanılarak toplam 6 farklı deney serisi üretilmiştir. Deney gruplarının açıklaması Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Deney serileri tasarlanırken kullanılan boşluk tutucu malzemenin yaratacağı hücre büyüklüklerindeki farklılıklar temel alınmıştır.

Çizelge 3.2. Deney gruplarının içerikleri

Numune Kodu	Metal Tipi	NaCl Tane Boyutu
D1	Al	-4 mm + 2 mm
D2	Al	-4,75 mm + 4 mm
D3	Al	-6,3mm + 4,75 mm
DS1	Al-12 Si	-4 mm + 2 mm
DS2	Al-12 Si	-4,75 mm + 4 mm
DS3	Al-12 Si	-6,3mm + 4,75 mm

Mekanik deneylerde kullanılacak metalik köpüklerin hazırlanmasından önce, standart şeklide başarılı numuneler hazırlanması için bir seri ön çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı metale uygulanacak vakum değerlerinin tespiti içindir. Bu amaçla yapılan çalışmalar sonucunda kullanılacak NaCl, her bir numune için ergitilecek metal miktarı ve vakum değerleri belirlenmiştir. Kalıp boşluğunun %75 hacminin NaCl ile doldurulması ve 185 gr metal ergitilmesi şartları için gerekli olan vakum değerleri tespit edilmiştir. -0,4 bar ile -0,8 bar arasında sabit döküm sıcaklıkları ve sabit NaCl ön ısıtması şartları altında vakum değeri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu değer belirlenirken sıvı metalin başarılı bir şekilde kalıbı doldurması temel alınmıştır. Resim 3.5’de farklı vakum değerleri sonucunda D1 numunesi için kalıbın farklı doluş şekilleri gösterilmiştir. Resim 3.5a’da uygulanan en düşük vakum değeri olan -0,4 bar sonucunda kalıbın doluş şekli görülmektedir. Resimden de görüleceği gibi vakum değerinin sıvı metalin NaCl taneleri arasından geçmesine yetecek etkiyi göstermediği gözlenmektedir. Kalıbın alt tarafında metalin sızması olmadığı için hala serbest halde tuz taneleri gözlenmektedir. Vakum değerinin – 0,6 bar değerine arttırılması ile metalin kalıp içerisinde yürümesi biraz daha iyileşmiş (Resim 3.5b) ancak serbest tuz taneleri yine de gözlenmektedir. Sıvı metalin tuz tanelerine infiltrasyonu için en uygun vakum değerinin -0,8 bar vakum değeri olduğu sonucuna varılmıştır. Bu vakum değerinde sıvı metal kalıbı tamamen doldurmuştur (Resim 3.5c). Daha sonraki numune üretimlerinde vakum değeri sabit -0,8 bar olarak uygulanmıştır.



a.



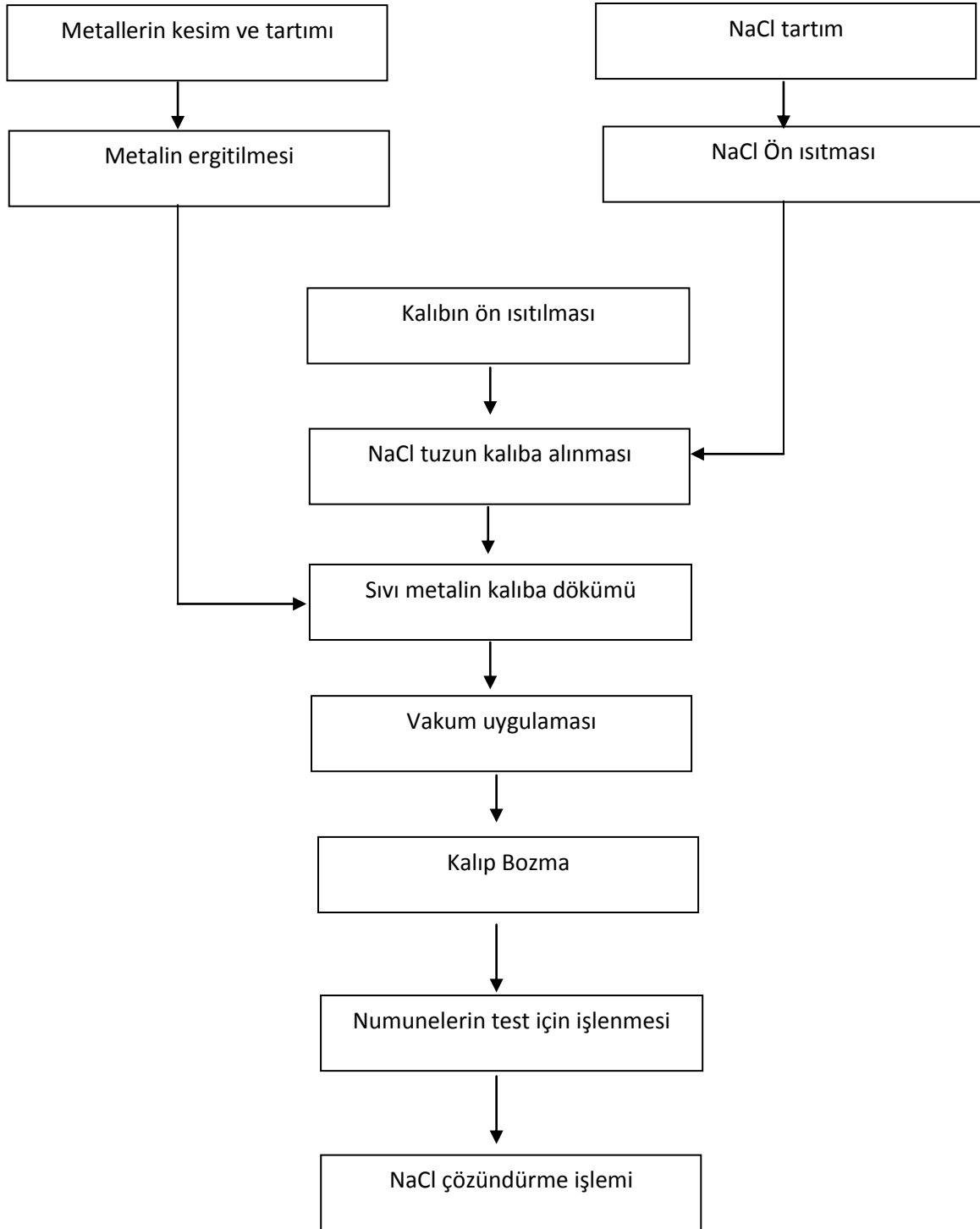
b.



c.

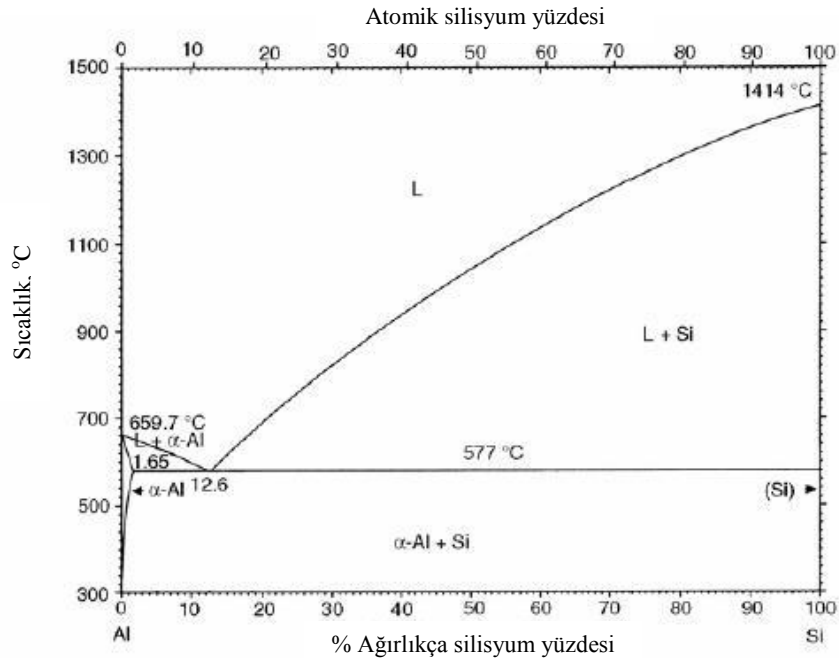
Resim 3.5D1 numunesi için farklı vakum değerlerinin kalıp doldurma etkinlikleri. (a: -0,4 bar, b: -0,6 bar, c: -0,8 bar)

Metalik köpüklerin üretim akım şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Numune üretim akım şeması.

Külçeler halinde temin edilmiş olan alüminyum ve alaşımı öncelikle kullanılacak potaya rahat girebilecek şekilde şerit testere ile kesilmiş ve tartımları yapılmıştır. Numuneler dökülürken her bir numune için sabit ağırlık eritilmiş ve kalıp içine dökümü sağlanmaya çalışılmıştır. Sıvı metalin döküm esnasında kalıp duvarında aniden katılaşarak tuz taneleri arasından yürütmesinin engellenmemesi için kalıp ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Benzer şekilde tuz tanelerinin de ön ısıtılması gerektiği için daha önce belirlenen vakum değeri değiştirilmeden bir seri ön deneme yapılarak, kalıp ve tuz tanelerinin ön ısıtma değerleri belirlenmiştir. Benzer şekilde Şekil 3.2'deki Al-Si denge diyagramı temel alınarak döküm sıcaklıkları da belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.2 Al-Si Denge diyagramı.

Ön denemeler sonucunda ötektik Al-12Si alaşımının akışkanlığı nedeniyle saf alüminyuma göre kalıp ve tuz ön ısıtma sıcaklıklarının daha düşük uygulanması sonucu çıkarılmıştır. Böylece aşırı derecede akışkan olan metalin döküm sistemindeki atık metal haznesine kaçıışı engellenerek standart numunelerin üretilmesi sağlanmıştır. Deney numunelerinin üretim parametreleri toplu olarak Çizelge 3.3'de gösterilmiştir. Çizelge 3.2'den görüleceği gibi Al-12Si alaşımının döküm ve ön ısıtma üretim değerleri saf alüminyuma göre daha düşük değerlerde uygulanmıştır. Tuz tane boyutunun yığının

geçirgenliğinde yarattığı değişim göz önüne alınarak, sadece tuz ön ısıtma değerleri değiştirilerek standart numuneler hazırlanmıştır.

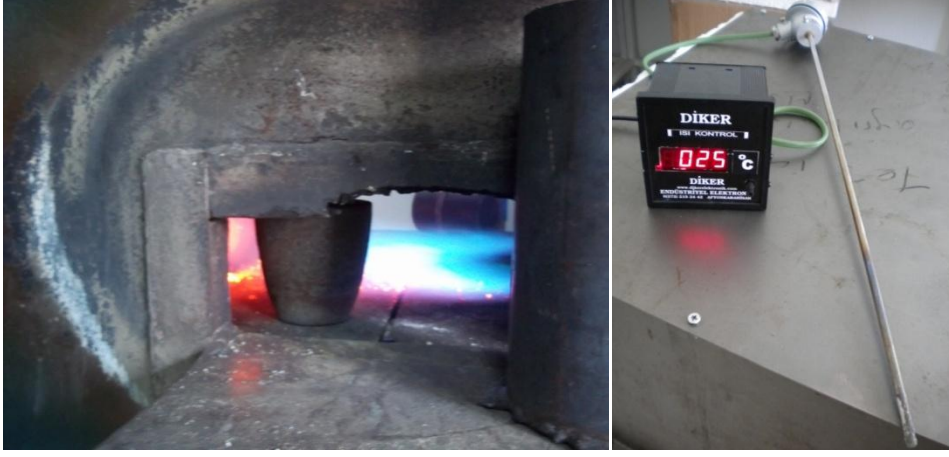
Çizelge 3.3. Deney numunelerinin üretim parametreleri.

Numune Kodu	Döküm sıcaklığı °C	NaCl ön ısıtma sıcaklığı °C	Kalıp ön ısıtma sıcaklığı °C
D1	750	400	400
D2	750	380	400
D3	750	380	400
DS1	650	350	320
DS2	650	330	320
DS3	650	330	320

Dökümü yapılacak metalin ergitilme işlemi LPG ile ısınan bir tav fırınının içinde gerçekleştirilmiştir. Resim 3.6'da ergitme işleminin yapıldığı tav fırını görülmektedir. Kalıpların ön ısıtılmasında da aynı fırın kullanılmıştır. Isıtılacak kalıplar fırının çıkış noktalarına konularak ısınmaları sağlanmıştır.

Ergitmek için fırın içine konulan potadaki metal eridikten sonra belirli aralıklarla sıcaklığı Resim 3.6b'de gösterilen daldırma tip Ni-NiCr tip termokupl ile ölçülerek gerekli sıcaklığa eriştiği ölçülmüştür. Benzer şekilde fırın kenarında ısıtılan kalıpların ve çelik bir kap içinde yine fırın kenarında ısıtılan tuz tanelerinin sıcaklıkları ise Resim 3.6c'de gösterilen optik pirometre vasıtasıyla ölçülmüştür. Gereken sıcaklığa ulaşan kalıp döküm sistemindeki kalıp tablasına yerleştirilir. Döküm sistemine konulan filtrenin vakum hattına yerleştirilmesinden sonra, ön ısıtması yapılan tuz taneleri kalıp içine dökülmüştür. Tuz tanelerinin sıvı metal içinde yükselmesini engellemek için yine geniş aralıklı çelik tel kafes tuzların üstüne konulmuştur. Bu işlemler yapılırken kalıp ve tuzları soğumaması için seri hareket edilmeye dikkat edilmiştir. Döküm öncesi curufu alınan pota içindeki eriyik metal son ölçümü alındıktan sonra gerekli döküm sıcaklığı teyit edildikten sonra kalıp içerisine dökülmüştür. Döküm öncesinde vakum haznesinde gerekli vakum değerine ulaşıldığı daha önceden sağlandığı için, vakum boşaltma vanası

açılarak kalıbın üst kısmındaki sıvı metal vakumun boşalmasıyla hızla tuz tanelerinin arasına infiltrate edilmiştir.



a.

b.



c.

Resim 3.6 Ergitme işleminin yapıldığı fırın ve pota (a). Sıcaklık ölçümünde kullanılan daldırma tip termokupl (b) ve kalıp sıcaklığını ölçmek için kullanılan optik pirometre (c).

Dökümü yapılan metal kalıbın soğuması beklendikten sonra kalıp açılarak kalıptan alınmıştır. Kalıptan çıkarılan numunelerin alt ve üst kısmındaki düzensizlikler numune kesicide alındıktan sonra numuneler hazır hale getirilmiştir. Mekanik testler için standart boyutlu numuneler için tekrar boyutlandırma yapılmıştır. Döküm sonrasında yapı içinde kalan NaCl taneleri daha sonra uygulanan çözündürme işlemi ile bünyeden alınmış ve köpük hücre yapısı oluşturulmuştur. Çözündürme işlemi için numuneler 1litre saf su içerisine bırakılmıştır. Çözündürme işleminin hızını arttırmak için beher

ısıtıcı manyetik karıştırıcı üzerine konulmuş (Resim 3.7)ve su sıcaklığı 70 °C'ye ısıtılmıştır. Her bir numune için 1 saat standart çözünme süresi uygulanmıştır. İlk 30 dakika sonrasında su değiştirilerek, suyun çözündürme yeteneği artırılmıştır. Çözündürme süresi sonunda yapılan kontrollerde tün tuz tanelerini kesit boyunca çözündüğü gözlenmiştir.



Resim 3.7 Tuz çözündürme düzeneği.

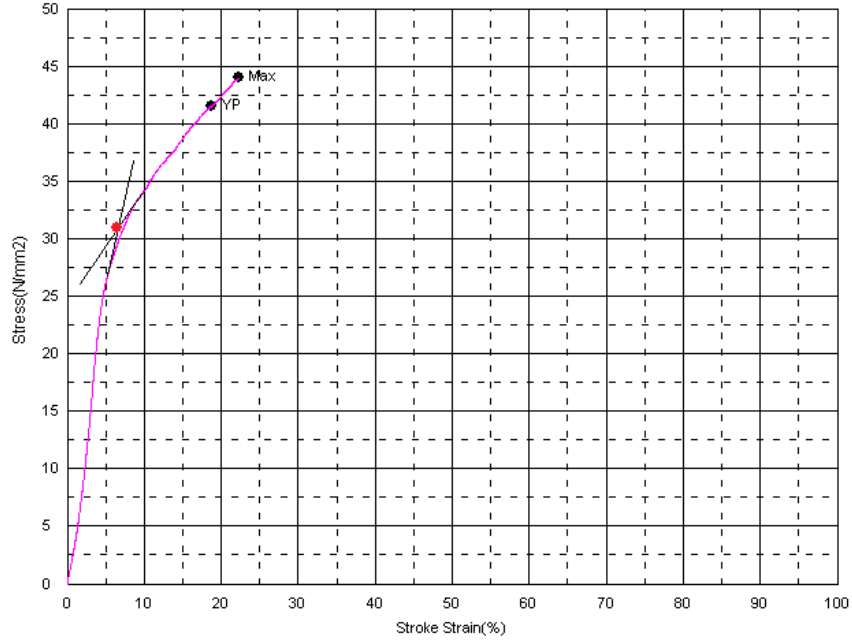
3.4. Deney Numunelerine Uygulanan Testler

3.4.1. Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi

Döküm yöntemiyle üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluk ölçümleri, ölçülen ağırlık değerlerinin boyut ölçümlerinden hesaplanan hacim değerlerine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Tuzların çözündürülmesiyle oluşan iri hacimli hücre yapısı malzemelerin Arşimet yöntemiyle yoğunluk değerlendirmesini imkansız kılmıştır. Bu nedenle yoğunluk değerlendirmeleri basit kütle-hacim oranıyla hesaplanmıştır. Bu değerle birlikte metalik köpüklerde daha fazla kullanılan rölatif yoğunluk değerleri de hesaplanmıştır. Bu amaçla hesaplanan yoğunluk değerleri kullanılan metalin teorik yoğunluğuna bölünerek hesaplanmıştır. Saf alüminyumun teorik yoğunluğu için $2,7 \text{ gr/cm}^3$ ve Al-12 Si alaşımı için $2,65 \text{ gr/cm}^3$ değerleri alınmıştır.

3.4.2. Basınç Dayanımı Testi

Metalik köpüklerin Basma yönündeki statik yüklemeye gösterdiği davranış önemlidir. Bu nedenle numunelere basma deneyi uygulanmıştır. Döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum esaslı köpüklere uygulanan basma deneyi için numuneler 70x50 mm (boy x çap) standart boyutlara getirilmiştir. Deneyde 10 ton kapasiteli Schimadzu marka universal çekme-basma cihazı kullanılmıştır. Basma deneyinde numunelere, 1 mm/dk hız ile yaklaşık %50 deformasyon uygulanmıştır. Elde edilen basma deney grafiklerinden, plastik yıkım gerilimi ve Elastik modül değerleri hesaplanmıştır. Buna göre grafiklerdeki numunenin, elastik bölgedeki davranışını gösteren çizgi ve plastik bölgedeki davranışını gösteren çizgiye doğrusallar çizilmiş, bu çizgilerin kesiştiği yer plastik yıkım gerilimi olarak ölçülmüştür. Plastik yıkım geriliminin hesaplanmasına örnek teşkil edecek grafik Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.3 Plastik yıkım geriliminin ölçülmesi için temsili bir basma deney grafiği.

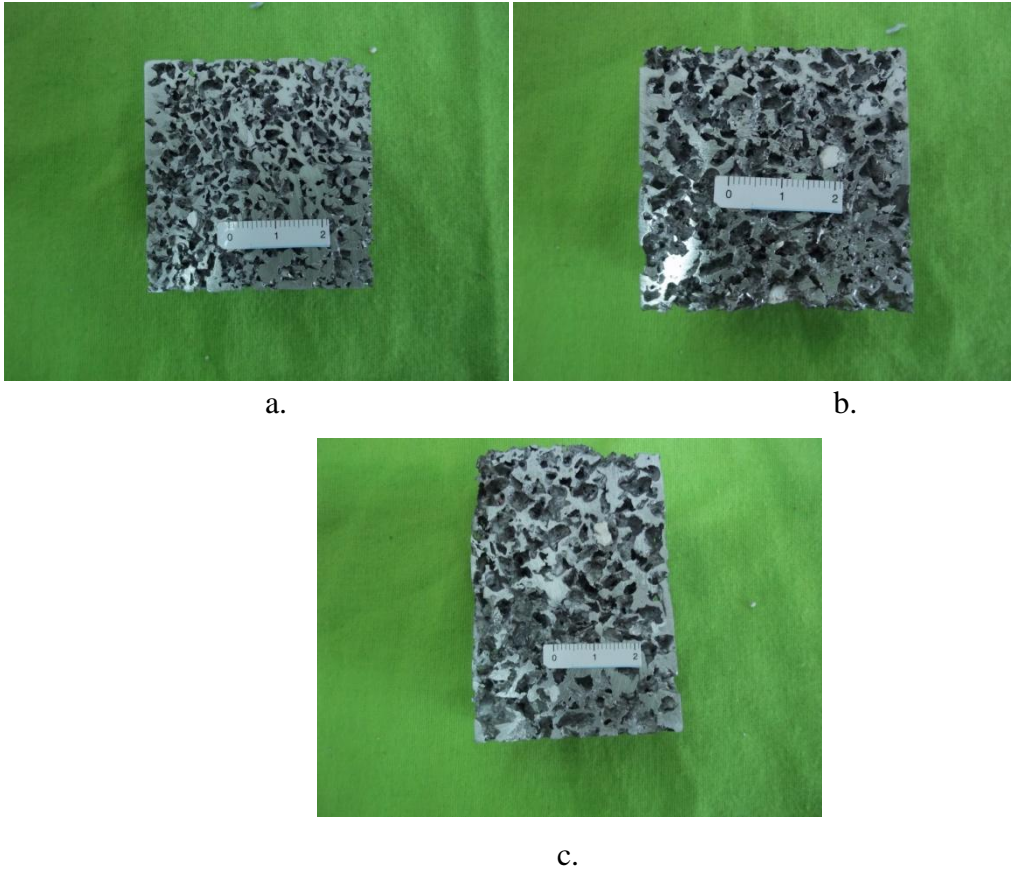
3.4.3. Metalografik İncelemeler

Döküm sonrasında hücre duvarlarındaki iç yapı değişimleri geleneksel metalografik yöntemler ile yapılmıştır. Bu amaçla temsili alınan numuneler standart zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinde geçirilmiştir. Optik mikroskop yardımıyla iç yapı görüntüleri alınmıştır.

4. BULGULAR

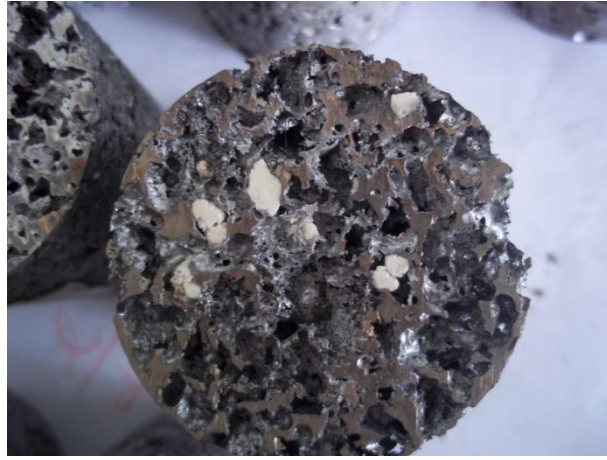
4.1. Numune Kesitleri

Döküm yöntemiyle elde edilen numunelerin boyutları, dökümden sonra dökümün alt ve üst kısımlarından uygun şekilde kesilerek deneyler için standart (70x 50 mm) ölçülere getirilmiştir. Elde edilen numuneleri kesitleri ve hücre yapıları Resim 4.1'de gösterilmiştir.



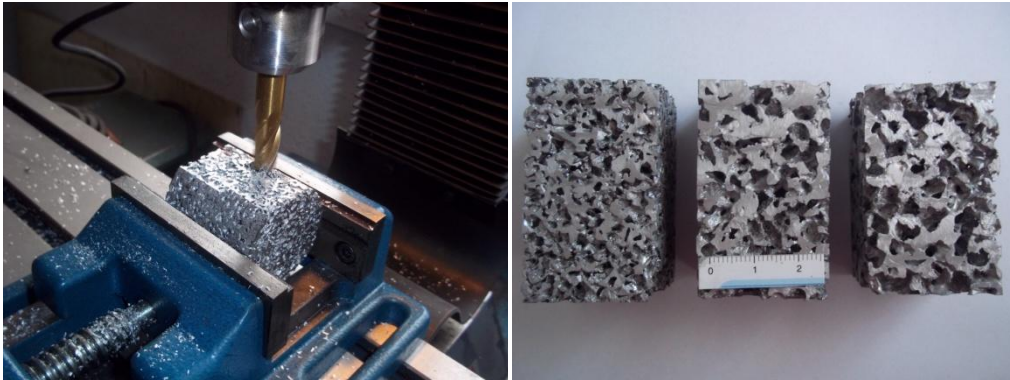
Resim 4.1 Döküm sonrası elde edilen numunelerin kesitleri ve hücre yapıları. (a: D1, b:D2, c:D3)

Resim 4.1'deki kesit görüntülerinde köpük hücre yapılarının açık ve geçirgen olduğu gözlemlenmiştir. Gözeneklerin kesit boyunca homojen dağıldığı gözlenmiştir. Kullanılan boşluk tutucu tanelerin tane boyutları arttıkça hücre büyüklüklerinin buna bağlı olarak genişlediği görülmüştür. Çözündürme işlemi sonunda numunelerin yüzey ve iç kesimlerinde çözünmeyen bazı kısımlar gözlemlenmiştir (Resim 4.2). Bu mineral parçaların tuz olmadığı, kullanılan kayaç halindeki tuzun kireçtaşı tipinde yan mineralleri olduğu sonucuna varılmıştır.



Resim 4.2 Yapı içerisinde çözünmeyen tuz dışındaki mineral maddeler.

Yoğunluk ölçümlerinin daha doğru yapılabilmesi için numuneler freze yardımıyla standart boyutlara işlenmiş ve yoğunluk ölçümleri bu numuneler üzerinden ölçülmüştür (Resim 4.3).

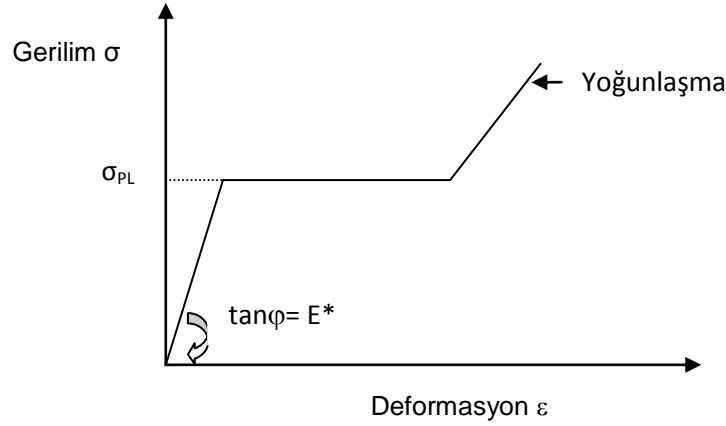


a. b.

Resim 4.3 Numunelerin ölçüm için işlenmesi (a.) ve yoğunluk için kullanılan numuneler (b).

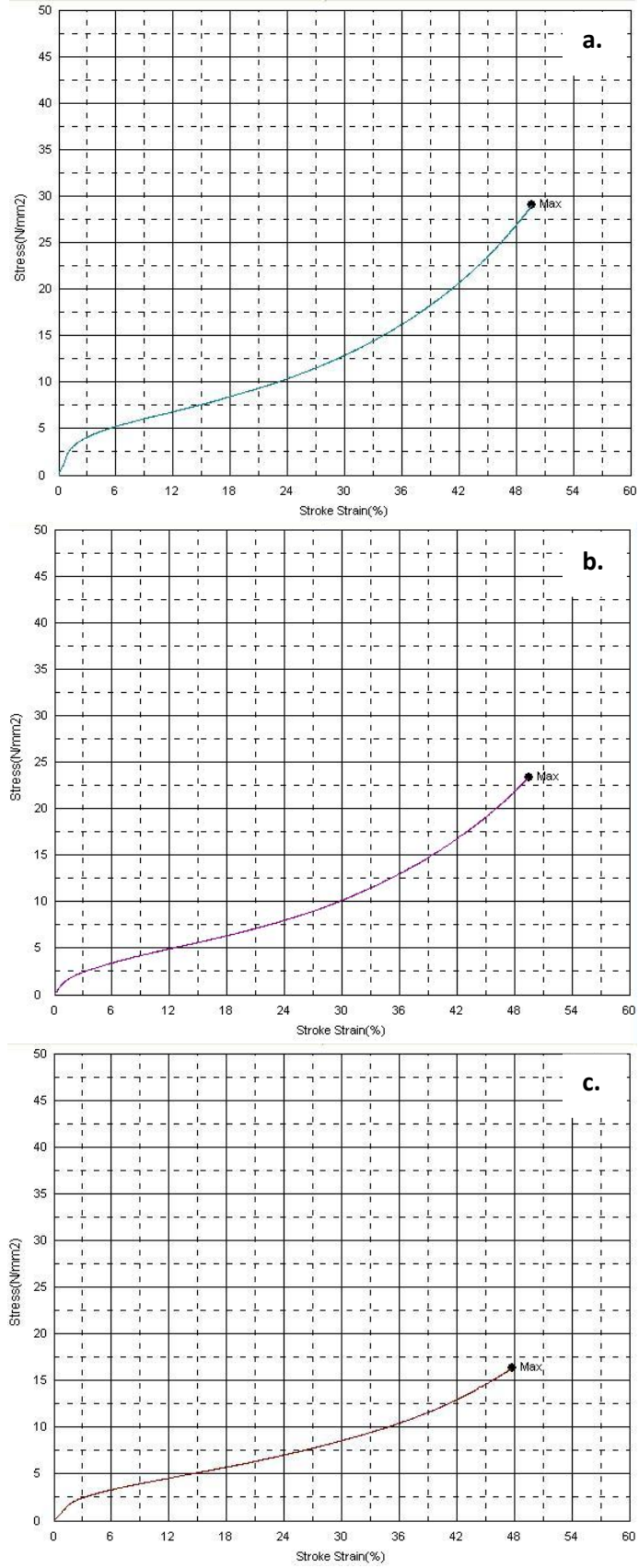
4.2. Basınç Dayanımı-Yoğunluk İlişkisi ve Ölçümlerin Sonuçları

Metalik köpüklerin statik basma yükleri altında gösterdiği davranışı Şekil 4.1'deki gibi gösterilmiştir (Gibson and Ashby 1997).

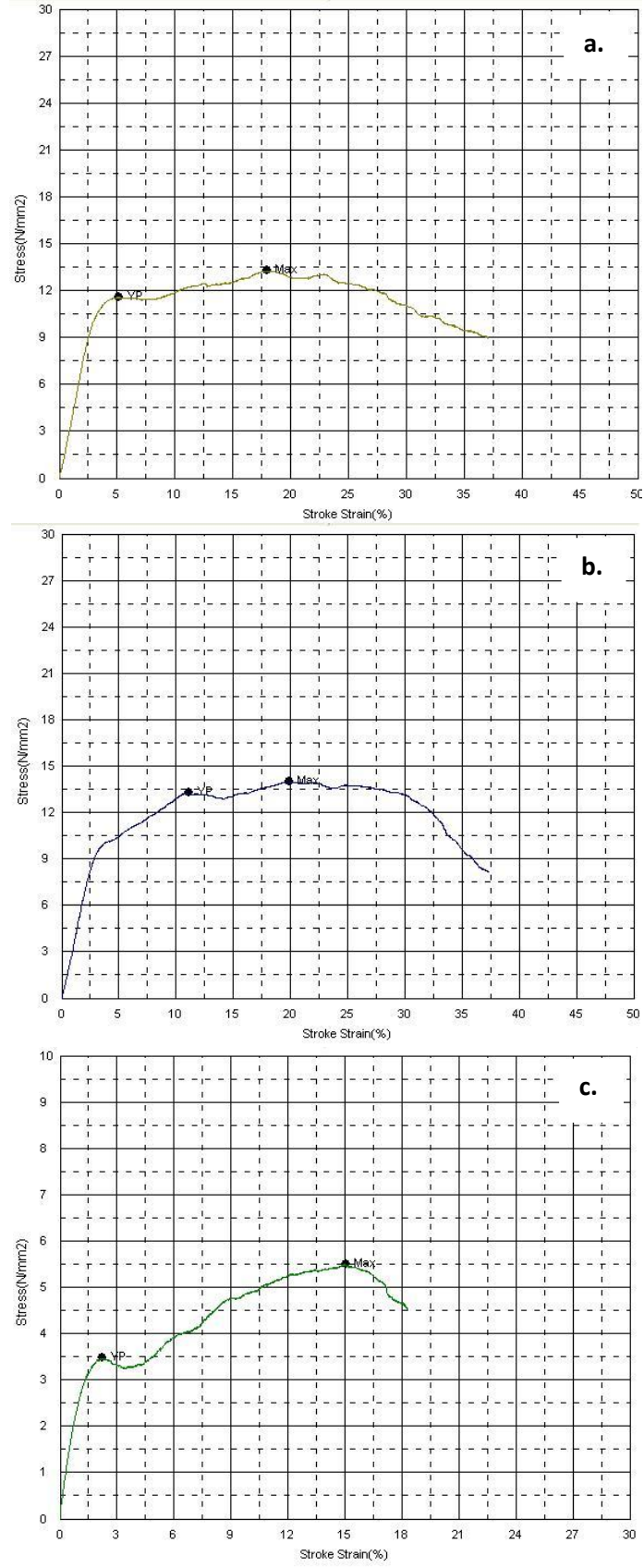


Şekil 4.1 Metalik köpüklerin basınç gerilmesi altındaki davranışı.

Alüminyum esaslı köpük olan D serisi numunelerin basma deney grafikleri Şekil 4.2'de Al-12Si esaslı köpük olan DS serisi numunelerin basma deney grafikleri Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Elde edilen basma grafikleri Şekil 4.1'de tanımlanan geleneksel metalik köpüklerin basma grafiği ile karşılaştırıldığında benzerlikler gösterdiği görülmüştür. Özellikle alüminyum esaslı D serisi numuneler geleneksel köpük basma davranışını yansıtmaktadır. Ancak net olarak tanımlanmış bir plastik yıkım gerilimi (σ_{pl}) okumak oldukça zordur. Geleneksel köpük davranışına benzer olsa da, plastik yıkım geriliminden sonraki plato bölgesinin yatay seyretmediği ve sabit bir eğim ile bu bölgede gerilim değerlerinin arttığı görülmüştür. Bunun temel nedeninin, gözeneklerin peşi sıra deformasyona uğrayarak kapanması eğrinin yataya yaklaşmasına neden olurken, hücre duvarlarındaki metalik malzemede meydana gelen pekleşmenin grafiğin yukarı doğru eğimleşmesine neden olduğu sonucuna varılmıştır. Grafiğin ileri deformasyon bölgelerinde ise gözeneklerin kapanarak yok olmasıyla malzemenin dolu malzeme gibi davranmaya başlayarak yoğunlaşma bölgesi de gözlemlenmeye başlamıştır.

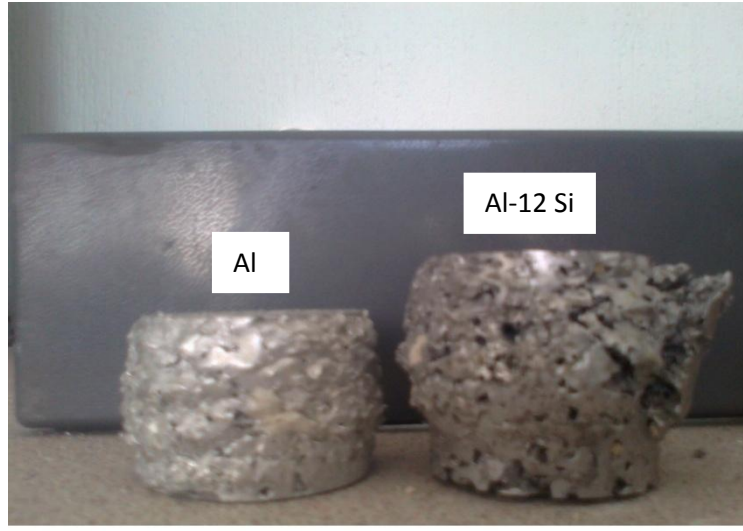


Şekil 4.2 D serisi numunelerin basma grafikleri: (a) D1, (b) D2, (c) D3.



Şekil 4.3 DS serisi numunelerin basma grafikleri: (a) DS1, (b) DS2, (c) DS3.

Alüminyum esaslı köpüklerin basma deneyi sırasında düzenli bir şekil değişimi gösterdiği gözlenmiştir. Numuneler uygulanan %50 şekil değişimine sonuna kadar dayanmıştır. Ancak numunelerin basma deneyinden sonraki halini gösteren Resim 4.4’de görüleceği gibi Al-12Si metalinden yapılan köpükler %50 deformasyona düzenli bir şekilde uğrayamamıştır. Alüminyumun sünek yapısı kolay olarak yüksek orandaki şekil değişiminin gerçekleşmesini sağlarken, alüminyuma göre sünekliği daha düşük olan ötektik Al-12 Si alaşımı bu seviyedeki şekil değişimini düzenli bir şekilde gerçekleşmemesine neden olmuştur.



Resim 4.4D ve DS serilerinin basma deneyi sonundaki farklı deformasyon şekilleri.

Düzenli olmayan bu şekil değişimi DS serisi numunelerin basma grafiklerinde de gözlenmektedir (Şekil 4.3). Numuneler şekil bütünlüklerini %50 deformasyon seviyesine kadar koruyamamışlardır. Alüminyum köpüklere göre Al-12 Si alaşımı köpüklerde plastik yıkım gerilimini grafikteki belirginliği daha az olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeninin hücre duvarlarının plastik deformasyonla birlikte aynı anda kırılmaya başlamasıdır. Buna bağlı olarak sürekli bir plato bölgesini de gözlemlemek zordur. D ve DS seri numunelerde ortak olarak gözlemlenen en önemli ilişki; numunelerin yoğunluklarına bağlı olarak basma grafiklerinin daha yüksek gerilim seviyelerine doğru kaymasıdır.

Çizelge 4.1’de işlenmiş numunelerden ölçülmüş olan yoğunluk değerleri ve basma deneyi sonucu elde edilen mekanik değerler verilmiştir. Ölçülen yoğunluk değerleri metallerin teorik yoğunluklarına (boşluksuz) bölünerek, her bir numune grubu için rölatif yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Bu amaçla alüminyum yoğunluğu için $2,7 \text{ gr/cm}^3$, Al-12Si yoğunluğu için $2,65 \text{ gr/cm}^3$ değeri kullanılmıştır. Rölatif yoğunluktan gidilerek her bir köpüğün içerdiği boşluk oranı da hesaplanmıştır.

Alaşımlamanın etkisine bağlı olarak DS grubu numunelerin saf alüminyuma göre çok daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. DS grubunun en yoğun grubu olan DS1 ile alüminyum esaslı köpüğün en yoğun grubu olan D1 serileri karşılaştırıldığında, plastik yıkım gerilimleri arasında yaklaşık 3 MPa fark varken, yoğunlukların azalması ile bu farkın çok daha fazla olduğu ölçülmüştür.

Benzer şekilde elastik modül değerleri de DS grubunda D grubuna göre oldukça yüksektir. Alaşım etkisi de burada açıkça görülmektedir. DS1 grubu numuneler hariç tüm numunelerin yoğunluk değerleri 1 gr/cm^3 değerinin altında ölçülmüştür. Kullanılan boşluk tutucu malzemenin tane boyutundaki artışa paralel olarak elde edilen köpüklerin yoğunlukları her iki numune grubunda da azalma göstermiştir.

Çizelge 4.1. Numunelerin mukavemet-yoğunluk ilişkileri.

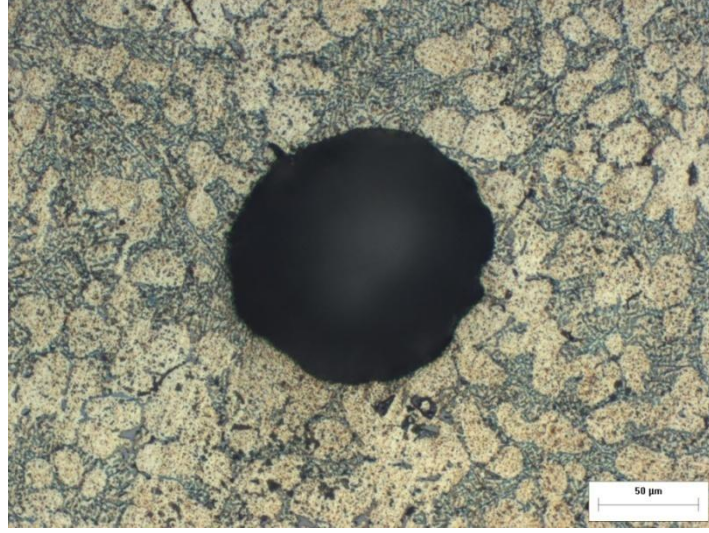
Numune Kodu	E (GPa)	σ_{pl} (MPa)	Rölatif		
			Yoğunluk (ρ^*/ρ_k)	ρ^* (gr/cm^3)	% Boşluk oranı
D1	2,5	7,50	0,352	0,951	64,8
D2	1,0	1,65	0,347	0,937	65,3
D3	1,0	1,01	0,332	0,896	66,8
DS1	6,0	10,32	0,412	1,091	58,8
DS2	5,2	9,0	0,332	0,879	66,8
DS3	6,5	3,1	0,294	0,780	70,6

ρ^* : numune yoğunluğu, ρ_k : boşluksuz metalin yoğunluğu

Benzer şekilde tuz tane boyutu arttıkça üretilen köpük malzemelerin içerdiği boşluk oranlarında ayrış gözlemlenmiştir. DS grubu numunelerde D grubuna göre daha yüksek boşluk oranlarına ulaşılmıştır. DS numunelerinde daha akışkan olan ötektik alüminyum alaşımının kullanılmasının böyle bir sonuca neden olduğu sonucuna varılmıştır. Seriler arasında en düşük rölatif yoğunluk olan 0,294 değerine DS3 numunesinde ulaşılmıştır. Bu değer bir çok köpük çalışmasındaki rölatif yoğunluk değerine en yakın değerdir. GibsonandAshby (1997), metalik köpüklerin mekaniksel modellemeye uyabilmesi için 0,2 rölatif yoğunluk sınırı vermiştir. Elde edilen değerler bu değerlerin üzerinde gerçekleşmiştir.

4.3. Hücre Duvarlarının İç Yapılarının Metalografik Değerlendirmesi

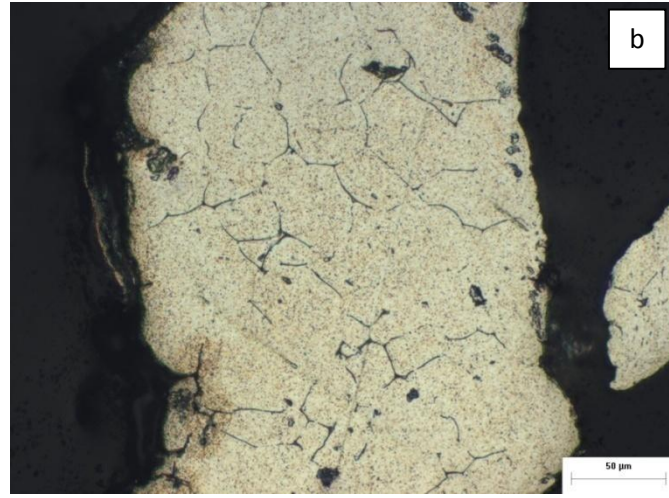
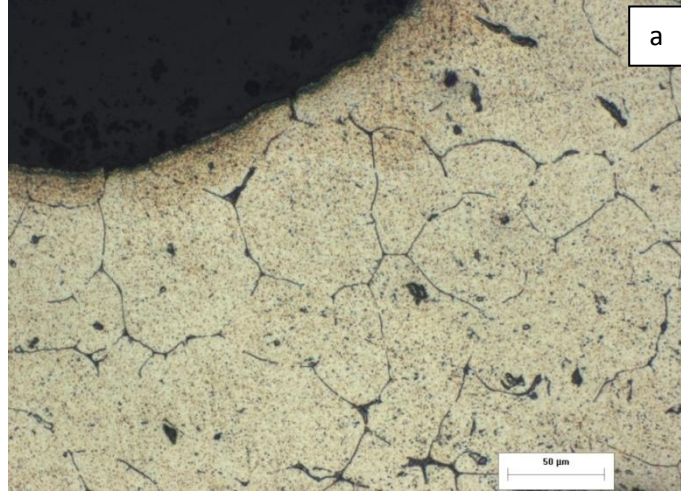
Numunelerden elde edilen optik mikroskop görüntüleri, vakumdöküm yöntemiyle elde edilen alüminyum köpük numunenin düzenli bir hücre yapısı olduğunu göstermiştir. Boşluk tutucu tuz taneleri etrafında düzenli oluşmuş, homojen hücre duvarları görülmüştür. Hücre duvar kalınlıklarının değişkenliği ise dikkat çekicidir. Bunun temel nedeninin tuz tanelerinin eş eksenli olmamasıdır. Kırma işlemine bağlı olarak oluşan tanelerin şekli köşelidir. Bu nedenle hücre duvar kalınlıkları farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle nu konuda net bir ölçüme gidilememiştir. Özellikler DS grubu numunelerin hücre duvarlarında tam yuvarlak boşluklar gözlemlenmiştir (Resim 4.5). Bu ise DS grubu numunelerin infiltrasyon için normal döküm sıcaklığının üstünde döküldüğünden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Yüksek döküm sıcaklığı ile birlikte, açık pota pratiği ve gaz giderme işlemi uygulanmamasının da DS grubunda hücre duvarları içinde gaz boşlukları oluşumunda etkin olduğu sonucuna varılmıştır. DS grubu numunelerin basma deneyi sırasında göstermiş olduğu düzensiz deformasyon davranışının da nedenlerinden bir tanesinin gaz boşluklarından kaynaklanabileceği sonucuna varılmıştır. Benzer gaz boşluklarına alüminyum esaslı D grubu numunelerde gözlemlenmemiştir. Gaz boşluklarının boyutları bölgesel farklılıklar gösterse de birçoğu 75-100 µm büyüklüğündedir.



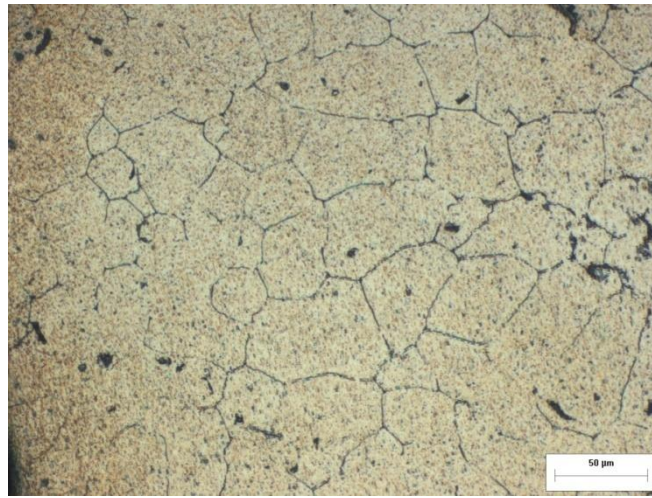
Resim 4.5 DS grubu numunelerde hücre duvarındaki gaz boşlukları.

Aluminyum esaslı D grubu metalik köpük numunelerinin hücre duvarlarındaki tane yapıları incelenmiştir (Resim 4.6). Hücre duvarlarının kalınlıklarına bağlı olarak aluminyum tane boyularında farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Benzer büyütme değerinde görüntülenen ve farklı kalınlıktaki hücre duvarları incelendiğinde aynı numune içerisinde kalın hücre duvarlarında aluminyum tane boyutları 50 µm ile 140 µm arasında değişirken (Resim 4.6a), daha ince hücre duvarlarında ise tane boyutlarının 25µm ile 75 µm arasında değiştiği ölçülmüştür (Resim 4.6b). Hücre duvar kalınlıklarına bağlı olarak ortaya çıkacak olan katılma ve soğuma hız farklılıklarının farklı kesit ölçülerinde farklı tane büyüklüklerinin oluşumunda etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

D serisi metalik köpüklerin hücre duvarlarına uzak ve boşluksuz olan bölgelerinden alınan numunelerin tane yapısı incelendiğinde, kalın hücre duvarlarındaki tane büyüklüklerine benzer tane boyutları gözlemlenmiştir (Resim 4.7).

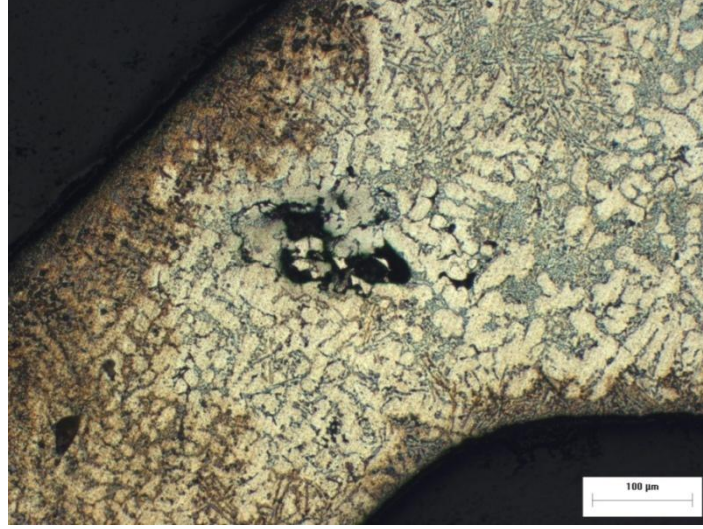


Resim 4.6 D grubu numunede farklı hücre duvar kalınlıklarındaki alüminyum tane yapısı (a.Kalın hücre duvarı, b. İnce hücre duvarı).

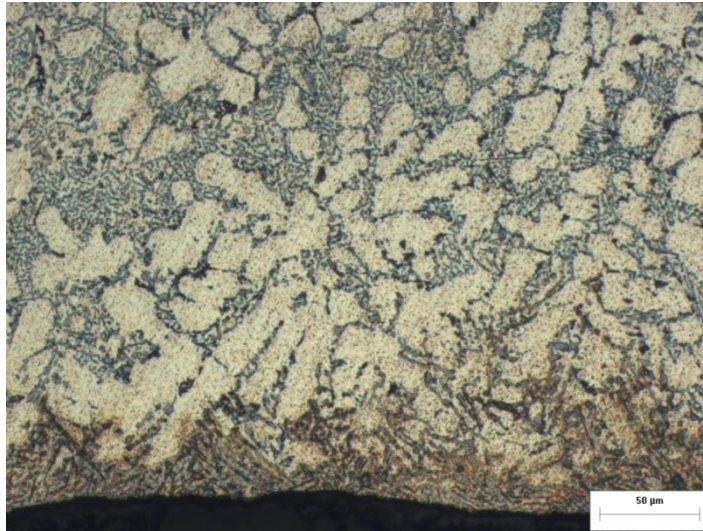


Resim 4.7 D grubu numunede köpük malzemenin hücre duvarına uzak bölgede tane yapısı.

DS serisi numunelerin hücre duvarları incelendiğinde, yüksek döküm sıcaklığından kaynaklanabileceği düşünülen çekinti boşluklarına rastlanmıştır (Resim 4.8). Hücre duvarlarında bulunan bu tip düzensizliklerin, basma deneyinde gözlemlenen düzensiz deformasyon davranışının diğer bir nedeni olduğu sonucuna varılmıştır.

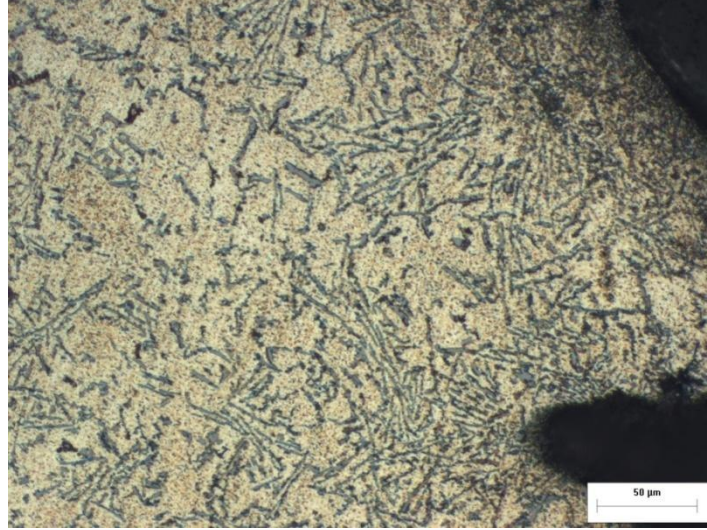


Resim 4.8 DS serisi numunelerde gözlenen hücre duvarındaki gözenekler.



Resim 4.9 DS serisi numunelerde kalın hücre duvarındaki iç yapı görüntüsü.

Resim 4.9'daki iç yapı görüntüsünde DS serisi numunelerde kalın hücre duvarında gözlemlenen iç yapı gösterilmiştir. Beyaz renkli adacıklar halindeki birincil α fazının içerisinde ötektik α +Si fazının gözlemlenmesi, rafine edilmiş bir ötektik iç yapısı olduğunu göstermiştir. Hücre duvarına yaklaştıkça bu yapının kaybolduğu ve birincil α fazının dağıldığı gözlemlenmiştir.



Resim 4.10 DS serisi numunelerde ince hücre duvarındaki iç yapı görüntüsü.

Resim 4.10'daki iç yapı görüntüsünde DS serisi numunelerde ince hücre duvarında gözlemlenen iç yapı gösterilmiştir. İnce kesitlerde soğuma hızına bağlı olarak, rafine edilmiş ötektik alüminyum silisyum yapısının tamamen kaybolduğu, birincil α fazının tamamen dağılarak, dendritik ötektik faz katılaşması ve iğnesel silisyum taneleri gözlemlenmiştir. Katılaşma esnasında ince kesitlerde yapısal olarak çok avantajlı olan rafine ötektik yapısı ortadan kaybolmuş, kalın kesitlerde ise hücre duvarının boşluğa bakan kısmında benzer bozulmuş yapılar görülmüştür. Bu tip yapıların gözlemlenmesi ise DS serisi numunelerin basma testinde göstermiş olduğu düzensiz deformasyon davranışının bir diğer neden olduğu sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Vakum döküm yöntemiyle, çözünen tip boşluk tutucu tekniği birleştirilerek alüminyum esaslı açık gözenekli köpükler başarıyla üretilmiştir. Yapılan ön değerlendirmeler sonucunda, tasarlanan döküm makinesinin vakum kapasitesi için kullanılabilen en küçük NaCl tane boyutunun 2 mm olduğu sonucuna varılmıştır. 2 mm'den daha küçük hücre boyutları oluşturma için kullanılması gerekli olan 2 mm'den küçük boşluk tutucu malzemeler için gerekli vakum düzeyinin artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Döküm yöntemi ile üretilmiş metalik köpüklerin işleme sonrası yapılan kesit incelemelerinde homojen bir gözenek ve yoğunluk dağılımı elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Vakum döküm yöntemiyle ve farklı boyutta NaCl boşluk tutucu kullanımıyla ilgili en uygun vakum, kalıp sıcaklığı, madde miktarı, tuz ön ısıtma sıcaklıkları hem alüminyum hem de Al-12 Si alaşımı için belirlenmiştir. Döküm sıcaklığı ve kalıp sıcaklıkları sabit tutularak, tuz ön ısıtma sıcaklıklarının değiştirilmesi ile daha rasyonel üretimler yapılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Elde edilen köpüklerin basma testi altındaki davranışları, köpükler için genel olarak tanımlanmış davranışa benzer olduğu sonucuna varılmıştır. Alüminyum esaslı köpükler düzenli bir deformasyon davranışı gösterirken, Al-12Si alaşımından yapılmış metalik köpükler düzenli bir deformasyon gösterememiştir. Yapılan iç yapı incelemeleri sonucunda bu sonuca, DS serisi numunelerde hücre duvarlarında gözlenen mikro çekinti boşluklarından, nispeten yüksek döküm sıcaklığına bağlı gaz boşlukları ve hücre duvarlarının hızlı soğumasına bağlı olarak hücre duvarına yakın bölgelerde ötektik yapıdaki bozulmaların neden olduğu sonucuna varılmıştır. D serisi köpüklerde tanımlanabilen plastik yıkım gerilimi rahatlıkla belirlenebilirken, düzensiz deformasyon özelliği gösteren DS serisi numunelerde bu gözlemlenememiştir.
- Al-12 Si alaşımından yapılan köpüklerin saf alüminyumdan yapılan köpüklere göre daha üstün mekanik özellikler sahip olduğu gözlenmiştir. Üretilen metalik köpüklerin hücre boyutlarının boşluk tutucu malzemenin tane boyut büyüklüğüne bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Boşluk tutucu tane boyutu

arttıkça hücre boyutları da artmıştır. Boşluk tutucu tuz taneleri kırma ve sınıflandırma sonucu üretildiklerinde eş eksenli bir yapıya sahip değildir ve nispeten köşeli bir yapıya sahiptir. Bu nedenle oluşan hücre duvarlarının kalınlıkları kullanılan tane boyutundan bağımsız olarak çok farklı kalınlıklarda oluşmuştur. Numune yoğunluklarının dolayısı ile boşluk tutucu boyutları mekanik özellikleri belirleyen temel değişken olmuştur.

- Vakum döküm yöntemiyle elde edilen alüminyum köpüklerin çekilen optik mikroskop görüntülerinden, içyapı gelişimlerinin hücre duvarlarındaki kesite bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği sonucuna varılmıştır. D serisi numunelerde alüminyum tane büyüklüğü kesitlerin küçülmesine bağlı olan hızlı soğuma şartları altında küçüldüğü sonucuna ulaşılmıştır. Hücre duvar kalınlıkları arttıkça tane boyutları da artmıştır. DS serisi numunelerde de hücre duvar kalınlıkları ötektik yapının bozulmasını önemli derecede etkilediği sonucuna varılmıştır.
- Tasarlanan vakum döküm sistemi ile ötektik Al-12 Si alaşımı kullanmak şartıyla en iri boşluk tutucu taneler yardımıyla %70,6 boşluk oranına sahip homojen hücre yapısına sahip metalik köpükler üretilebilmiştir.
- Çözünen boşluk tutucu malzeme olarak NaCl tanelerinin ve vakum döküm yöntemi ile infiltrasyon tekniğinin beraberce kullanılması ile hücre yapısı belirli metalik köpükler üretilmesi mümkün olmuştur. Bu üretim yaklaşımı ile metalik köpüklerin en önemli problemi olan; nasıl oluşacağı ve dağılımı belirli olmayan hücre yapısına bağlı olarak tahmin edilemeyen köpük özellikleri problemine önemli bir çözüm yolu sunulmuştur.
- Yapılan çalışmaların sonucunda, daha önceki araştırmacıların metal infiltrasyonu için önceden yapmış oldukları preförm hazırlıkları (sinterleme veya presleme) ortadan kaldırılmış ve proses daha da basit hale getirilmiştir.
- Yapılan çalışmalar sonucunda, NaCl tane boyutunun küçülmesi ve vakum değerlerinin arttırılması ile boşluk oranının arttırılmasının mümkün olduğu önerilmektedir.

- Çalışmadaki şartlar altında NaCl ön ısıtma sıcaklığının artırılması ile NaCl tane boyutunun azaltılarak, gözeneklilik değerlerinin daha da artırılabilceği önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Amjad, S.(2001). Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminum Foams. University of Cambridge, Master Thesis, Cambridge.
- Ashby, M.F., Evans, A. G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W. and Wadley, H.N.G.(2000). Metal Foams: A Design Guide.Butterworth-Heinemann Publication.
- Banhart, J. (2000).Properties and Applications of Cast Aluminum Sponges. *Advanced Engineering Materials*, 4:188-191.
- Banhart, J. (2001). Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams.*Progress in Materials Science*, 46: 559-632.
- Banhart, J., Weaire, D. (2002). On the road again: metal foams find favor. *Physics Today*,55:37-42.
- Banhart, J. (2003). Aluminum Foams: On the Road to Real Applications. *MRS Bulletin*, 28: 290-295
- Banhart, J. (2004).Industrialization of Aluminum Foam Technology, *9th International Conference on Aluminum Alloys*, 764-770.
- Baumeister, J., Banhart, J., Weber.M. (1997).Aluminium foams for transport industry. *Materials&Design*, 18, 4/6: 217-220.
- Çinici, H.(2004). Tozmetalürjisiyöntemiilealüminyumesaslımetalikköpüküretimi. GaziÜniversitesi, YüksekLisansTezi, Ankara
- Davies, G.J., Zhen, S. (1983). Metallic foams: their production, properties, and applications.*Journal of Materials Science*, 18:1899-1911
- Degischer, H. P., Kristz, B.(2002). Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications.
- Despois, J.F.,Marmottant, A., Salvo,L., Mortensen, A. (2007). Influence of the infiltrationpressure on the structure and properties of replicated aluminium foams. *Materials Science and Engineering A*, 462: 68–75

- Dumais, J. (2009). Lectures on Biomechanics, Lecture 3: *Cellular Solids*, Lesson notes.
- Ergöneç, Ç. (2008). Development and Design of Closed-Cell Aluminium Foam-Based Lightweight Sandwich Structures for Blast Protection, Izmir Institute of Tecnology, Master Thesis, Izmir.
- Gaillard, C., Despois, J.F., Mortensen, A. (2004). Processing of NaCl powders of controlled size and shape for the microstructural tailoring of aluminium foams. *Materials Science and Engineering A*, 374: 250–262.
- Gergely, V., Clyne, B., (2000). The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors. *Advanced Engineering Materials*, (4):175-178.
- Gibson, L.J., Ashby, M.F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Güden, M., Yılmaz, S., Elbir, S. (2001). Kompozit Alüminyum Köpük Malzemesinin Hazırlanması ve Mekanik Özelliklerinin Karakterizasyonu. Proje No: MISAG 135.
- Haack, D., Butcher, K., Kim, T., Hodson, H.P., Lu, T.J. (2001). Novel lightweight metal foam heat exchanger, in: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings V.3 (PID-4B: Heat Exchangers Applications for Change of Phase Media and Fuel Cells Systems, Book No. I00548), New York.
- Hernández, A.R.A. (2005). Combined flow and heat transfer characterization of open cell aluminum foams, University of Puerto Rico, Master of Science.
- Lu, T. J., Stone, H. A., Ashby, M. F. (1997). Heat Transfer in Open-Cell Metal Foams. *Acta Materialia*, (46):3619-3635.
- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., Kitahara, A. (2000). ALPORAS Aluminium Foam: Production process, Properties and Applications. *Advanced Engineering Materials*, (4):179-183.

- Mondal, D.P., Das, S., Ramakrishnan, N., Bhasker, K.U. (2009). Cenosphere filled aluminum syntactic foam made through stir-casting technique. *Composites: Part A*,(40): 279–288
- Olurin, O.B., Fleck, N.A., Ashby, M.F. (2000). *Mat.Sci.and Eng.A*,(291) :132-146.
- Özer, G.(2005). Alüminyumesaslıköpük metal üretimi, YıldızTeknikÜniversitesi, YüksekLisansTezi, İstanbul
- Palmer, R.A., Gao, K., Doan, T.M., Green, L., Cavallaro, G. (2007). Pressure infiltrated syntactic foams—Process development and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*,(464): 85–92.
- Robert, M. H., Delbin, D. (2006). Production of cellular A2011 alloy from semi-solid state.*Journal of Achievements in Material and Manufacturing Engineering*, (17), 1-2: 137-140.
- Sertkaya, A. A. (2008). Alüminyumköpüğünüsideğiştiriciolaraktasarımiveısı transferimodeli, SelçukÜniversitesi, DoktoraTezi, Konya.
- Yavuz,A.(2011). BoşlukTutucuTekniğiileAluminyumEsaslı Metal KöpükÜretimi. Afyon KocatepeÜniversitesi, YüksekLisansTezi, Afyonkarahisar.
- Yavuz, İ. (2010).MetalikKöpükMalzemelerveUygulamaAlanları.*TaşıtTeknolojileri ElektronikDergisi (TATED)*,(2) No: 1: 49-58.
- Yu, C.Y., Eifert, H.H.,Banhart, J.,Baumeister, J. (1998). Metal Foams. *Advanced Materials&Processes*, 154(5): 45–47.
- Yu, S., Liu, J., Wei, M., Luo, Y., Zhu.X., Liu.Y. (2009). Compressive property and energy absorption characteristic of open-cell ZA22 foams.*Materials and Design*,(30): 87–90.
- Zhao, Y., Han, F.,Fung, T. (2004).Optimization of compaction and liquid- state sintering in sintering and dissolution process for manufacturing Al foams. *Materials Science and Engineering A*, (364): 117–125.
- Weise, J., Baumeister, J., Yezerska, O., Salk, N., Beltrame, G., Silva, D.(2010). Syntactic iron foams with integrated microglass bubbles produced by means of

metal powder injection moulding. *Advanced Engineering Materials*,(12): 604-608.

Zhang, L.P., Zhao, Y.Y.(2007). Mechanical response of Al matrix syntactic foams produced by pressure infiltration casting. *J. Compos. Mater.*,(41): 2105-2117.

Zhao, Y.Y., Fung, T., Zhang, L.P., Zhang, F.L. (2005).Lost carbonate sintering process for manufacturing metal foams. *ScriptaMaterialia*,(52): 295–298.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yusuf KALKAN

Doğum Yeri : Van

Doğum Tarihi : 13.07.1987

Medeni Hali : Evli

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : İnegöl Lisesi

İNEGÖL/BURSA 2005

Üniversite : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Metal Öğretmenliği, 2010

Yüksek Lisans: Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi A.B.D., 2012

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

Afyon 7.Bölge TCDD. Yolları Vagon Bakım ve Onarım Bölümü teknisyen,

06.2007-08.2007

İnegöl/Bursa PTT. Dağıtım Servisi. Dağıtıcı, 06.2008-09.2008

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Metal Atölyesi, Stajyer,06.2009

Afyon 7.Bölge TCDD. Yolları Vagon Bakım ve Onarım Bölümü teknisyen,

07.2009-08.2009