

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ALÜMİNYUM ESASLI KÖPÜK METAL ÜRETİMİ

Metalurji Müh. Gökhan ÖZER

**F.B.E. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet EKERİM

İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	12
2. KÖPÜK METAL ÜRETİM YÖNTEMLERİ	15
2.1 Kapalı Hücreli ve Açık Hücreli Köpük Metal Üretim Yöntemleri	16
2.1.1 Kapalı Hücreli Köpük Metallerin Üretim Yöntemleri	18
2.1.1.1 Gaz Üfleme İle Alüminyum Köpük Metal Üretimi.....	18
2.1.1.2 Köpükleştirici Ajanlar Yardımıyla Alüminyum Köpük Metal Üretimi	21
2.1.1.3 Köpürebilen Öncüler Kullanarak Metal Köpük Üretimi	23
2.1.1.3.1 Sıvı Metal Yolu ile Köpükleşebilen Öncü Üretimi	23
2.1.1.3.2 Toz Metalurjisi İle Köpük Metal Üretimi.....	25
2.1.2 Açık Hücreli Köpük Metal Üretimi	28
2.1.2.1 Polimer Köpük İle Hassas Döküm	28
2.1.2.2 Boşluk Tutucu Malzemelerin Etrafına Hassas Döküm	29
2.2 Köpük Metal Üretim Metotlarının Özeti	31
3. KÖPÜK METALLERİN KULLANIM ALANLARI ve UYGULAMALARI.....	34
3.1 Köpük Metallerin Yapısal Uygulamaları	35
3.1.1 Otomotiv Endüstrisi.....	35
3.1.1.1 Hafif-Ağırlıklı Yapılar.....	35
3.1.1.2 Çarpışma Enerjisi Emilimi	36
3.1.1.3 Gürültü Kontrolü	38
3.1.2 Hava ve Uzay Endüstrisi	39
3.1.3 Gemi İnşa Endüstrisi	39
3.1.4 Yapı endüstrisi	40
3.1.5 Spor Malzemeleri	40
3.2 Köpük Metallerin Fonksiyonel Uygulamaları	40
3.2.1 Isı Değiştiriciler	40
3.2.2 Su Arıticılar	41

3.2.3	Susturucular	42
3.2.4	Filtreler	42
3.2.5	Alüminyum Köpük Metallerin Dekorasyon ve Sanatsal Uygulamaları	42
4.	ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN EKONOMİSİ ve GELECEĞİ.....	43
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	44
5.1	Kapalı Hücreli Köpük Metal Üretme Deneyleri.....	44
5.1.1	Deneylerde Kullanılan Cihaz ve Malzemeler.....	44
5.1.1.1	Köpük Metal Üretim Makinesi.....	44
5.1.1.2	Fırın Tasarımı ve İmalatı	46
5.1.1.3	Kullanılan Alaşım.....	49
5.1.1.4	Kalıp Boyası	49
5.1.1.5	Kararlaştırıcı Parçacıklar	49
5.1.1.6	Karıştırıcı	49
5.1.1.7	Üfleme Gazı.....	51
5.1.2	Deneyler.....	51
5.1.2.1	Deney Koşulları	52
5.1.2.2	Deney Sonuçları	55
5.1.2.3	Üretilen Köpük Metalin Makroskobik İncelemesi	64
5.1.2.4	Üretilen Köpük Metalin Mikroskobik İncelemesi.....	67
5.1.2.5	Üretilen Kapalı Hücreli Köpük Metale Uygulanan Testler ve Sonuçları.....	68
5.1.2.5.1	Sertlik Testi	68
5.1.2.5.2	Gözeneklilik Oranı	68
5.1.2.5.3	Yoğunluk	68
5.1.2.5.4	Ortalama Gözenek Çapı.....	68
6.	TARTIŞMALAR.....	69
6.1	Mekanik Özellikler	73
6.2	Akustik Özellikler.....	73
6.3	Termal özellikler.....	73
6.4	Diğer Özellikler	74
7.	SONUÇ.....	75
	KAYNAKLAR.....	77
	ÖZGEÇMİŞ.....	80

SİMGE LİSTESİ

μ	Tanecik boyutu (mikron)
θ	Temas açısı
γ	Yüzey enerjisi

KISALTMA LİSTESİ

Al	Alüminyum
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BCACT	Balkan Center of Advanced Casting Technologies
SiC	Silisyum Karbür

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Değişik gözenekli metal yapıları.....	13
Şekil 2.1	Hücresel metal üretim yöntemleri	15
Şekil 2.2	Köpük metal hücre yapısı.....	16
Şekil 2.3a	Açık hücre modeli.....	18
Şekil 2.3b	Kapalı hücre modeli	17
Şekil 2.4a	Açık hücreli köpük metal hücre.....	18
Şekil 2.4b	Kapalı hücreli köpük metal hücre	17
Şekil 2.5	Gaz üfleme metodu	18
Şekil 2.6	Alüminyum köpük yapımında işlem sınırları.....	19
Şekil 2.7	ALPORAS yöntemi.....	21
Şekil 2.8	Karıştırma zamanının viskoziteye etkisi	22
Şekil 2.9	FORMGRIP işleminin birinci adımı	23
Şekil 2.10	FORMGRIP yöntemi	24
Şekil 2.11	Toz metalurjisi yöntemi	26
Şekil 2.12	Hassas döküm metodu.....	28
Şekil 2.13	Polimer köpük kullanılarak hassas döküm yöntemi.....	28
Şekil 2.14	Hassas döküm yöntemi.....	29
Şekil 2.15	Boşluk tutucu kullanılan üretim yöntemi	30
Şekil 2.16	Metalik köpük yapılar.	31
Şekil 2.17	Köpük metallerin ortalama hücre çapı-yoğunluk ilişkisi	33
Şekil 3.1	Köpük metallerin kullanım alanları.....	34
Şekil 3.2	Otomotiv alanında yapısal uygulamalar.....	35
Şekil 3.3	Alüminyum hafif-ağırlıklı sandviç panel örneği.	36
Şekil 3.4	Alüminyum sandviç panelden yapılmış bir kaldırma kolu	36
Şekil 3.5	Çarpışma kutusu kullanımı.....	37
Şekil 3.6	Çarpışma kutusu örnekleri.....	37
Şekil 3.7	Tramvaylar için çarpışma emici yapı	38
Şekil 3.8	LKR ve BMW tarafından geliştirilmiş motor blok örneği.....	38
Şekil 3.9	Viyadük altında ses emen levha yapı	39
Şekil 3.10	Köpük metal ısı değiştirici	40
Şekil 3.11	Açık hücreli köpük metal yardımıyla soğutulan çoklu-çip modül dizaynı	41
Şekil 3.12	Alüminyum köpükten yapılmış susturucular	42
Şekil 5.2	Makinenin teknik resmi.....	45
Şekil 5.3	Döküm kalıbı.....	46
Şekil 5.4	Döküm potası.	46
Şekil 5.5	Fırın tuğlası.	47
Şekil 5.6	Fırın imalatının adımları.....	48
Şekil 5.7	Fırın sıcaklık kontrol ünitesi.	49
Şekil 5.8	Mekanik karıştırıcı.	50
Şekil 5.9	Pervane.....	50
Şekil 5.10	Gaz üfleme sistemi.....	51
Şekil 5.11	Alüminyum köpük metal üretiminde kullanılan deney düzeneğinin görünüşü ...	52
Şekil 5.12	Alüminyum köpük metal üretiminde kullanılan deney düzeneğinin görünüşü	52
Şekil 5.13	Birinci deney sonucu.....	55
Şekil 5.13	İkinci deney sonucu.....	55
Şekil 5.14	Üçüncü deney sonucu.....	56

Şekil 5.15	Dördüncü deney sonucu.....	56
Şekil 5.17	Beşinci deney sonucu.....	57
Şekil 5.18	Altıncı deney sonucu.....	57
Şekil 5.19	Yedinci deney sonucu.....	58
Şekil 5.20	Sekizinci deney sonucu.....	58
Şekil 5.21	Dokuzuncu deney sonucu.....	59
Şekil 5.22	Onuncu deney sonucu.....	59
Şekil 5.23	Onbirinci deney sonucu.....	60
Şekil 5.24	Onikinci deney sonucu.....	60
Şekil 5.25	Onüçüncü deney sonucu.....	61
Şekil 5.26	Ondördüncü deney sonucu.....	61
Şekil 5.27	Onbeşinci deney sonucu.....	62
Şekil 5.28	Onaltıncı deney sonucu.....	62
Şekil 5.29	Üretilen köpük metal.....	64
Şekil 5.30	Üretilen köpük metal.....	64
Şekil 5.31	Üretilen köpük metal.....	65
Şekil 5.32	Üretilen köpük metalin kesit görünüşü.....	65
Şekil 5.33	Üretilen köpük metaldeki hücreler.....	66
Şekil 5.34	Elde edilen köpük metalin SEM görüntüsü.....	67
Şekil 5.35	Elde edilen köpük metalin SEM görüntüsü.....	67
Şekil 6.1	Metalik olmayan parçacıkların metalik köpük içinde sıvı-gaz ara yüzeyinde katmanlar oluşturması.....	69
Şekil 6.2	Temas açısı.....	70
Şekil 6.3	Yüzey gerilimi ve parçacık hacim oranı arasındaki ilişki.....	71
Şekil 6.4	SiC parçacık konsantrasyonu ile hareket mesafesi arasındaki ilişki.....	72
Şekil 6.5	Köpük metallerin özellikleri.....	73

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Gaz üfleme yoluyla üretilen metalik köpüklerde kullanılan tipik alaşım ve parçacıklar.....	19
Çizelge 2.2 Gaz üfleyerek üretilen metalik köpüklerin avantaj ve dezavantajları.....	20
Çizelge 2.3 ALPORAS yönteminin avantaj ve dezavantajları.....	22
Çizelge 2.4 FORMGRIP yönteminin avantaj ve dezavantajları.....	24
Çizelge 2.5 Toz metalurjisi kullanılarak köpük metal üretiminin avantaj ve dezavantajları ..	27
Çizelge 2.6 Metalik köpüklerin üretim yöntemleri ve özellikleri	32
Çizelge 2.7 Kapalı hücreli alüminyum köpük metallerin özellikleri.....	33
Çizelge 5.1 ETİAL-160'ın bileşimi.....	49
Çizelge 5.2 Deney koşulları.....	53
Çizelge 5.3 Sıvı alüminyum ve çeşitli seramik parçacıkların arasındaki temas açıları.....	63

ÖNSÖZ

Başta, bu projenin üniversitemiz bünyesine kazandırılmasını sağlayan Prof. Dr. Nihat G. KINIKOĞLU'na , üniversiteye ilk geldiğim günden itibaren her türlü desteği veren danışman hocam Prof. Dr. Ahmet EKERİM'e, yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM'e teşekkürlerimi sunarım.

Bununla beraber, laboratuvarımızdaki tüm çalışma arkadaşlarımdan bu proje büyük emekleri vardır, hepsine tek tek teşekkür etmeyi borç biliyorum.

Bana yardımını esirgemeyen annem,babam ve kardeşim ile yakın arkadaşım Yakup EROL'a en içten sevgilerimi sunarım.

En önemlisi, bu çalışmamı hayatımda çok özel bir yeri olan ve her zaman beni çalışmaya teşvik eden Gülçin ORANLI'ya ithaf ediyorum.

ÖZET

Alüminyum köpük metaller, çok iyi derecedeki mekanik, akustik, termal, elektriksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, yapısal ve fonksiyonel ürünlerde geniş bir oranda artan uygulama alanı bulmuştur.

Bu çalışmanın teori bölümünde, alüminyum köpük üretebilmek için birçok yol sunulmuş ve tartışılmıştır. Alüminyum köpük metal üretmek için, sıvı –gaz üfleme, toz metalurjisi, hassas döküm ve eriyik emdirme ve köpürtücü ajan yardımı gibi pek çok yöntem mevcuttur.

Birçok üretim işleminde, köpük kararlaştırma mekanizmaları ve yöntemlerdeki bazı bilinen problemler açıklanmış ve alüminyum köpük metallerin uygulama örnekleri sunulmuştur.

Günümüzde alüminyum köpük metaller için pek çok uygulama mümkündür. Özellikle araç sanayindeki uygulamalar gibi, pek çok yapısal uygulamada köpük metal yapısı, kapalı hücreli olarak adlandırılır. Bununla beraber, fonksiyonel uygulamalar, kesin bir derecede açık hücreli köpüklere de bağlıdır.

Deneysel uygulama, gaz üfleme yöntemiyle kapalı hücreli metal köpük üretimini kapsar. Bu sebeple, bu çalışmada alüminyum metal matris kompozite gaz üflenerek kapalı hücreli köpük metal üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla, kapalı hücreli köpük metal üretim deney düzeneği tasarlanarak, deneysel çalışmalar yapılmış, kapalı hücreli alüminyum köpük metal üretilmiştir.

Anahtar kelimeler: Metalik köpük, kapalı hücre, açık hücre, hücreli metal, metalik sünger.

ABSTRACT

Aluminium foams have found increasing applications in a wide range of structural and functional products, due to their exceptional mechanical, acoustic, thermal, electrical and chemical properties.

In theoretical parts of this work, various methods for making such foams are presented and discussed. Many methods, including melt-gas injection, powder metallurgy, investment casting and melt infiltration, foaming agent, etc., are available to produce this material.

The various foaming processes, the foam stabilizing mechanisms and some known problems with the various methods are explained and some possible applications for aluminum metal foams presented.

Today, there are many possibilities for applications aluminium foam metals. Most structural applications for metallic foams, especially in vehicles, call for a closed-cell morphology. Functional applications, however, depends on the certain degree open foam.

In the experimental work, including; production of closed cell metal foam by injection gas method. Because of this, we produced closed cell aluminum foam from metal matrix composite with gas injection systems.

For this aims, a closed cell production machine is designed by us and manufactured in Istanbul, then making experiments and produce closed cell aluminum foam metal.

Keywords: Metallic foam, closed cell, open cell, cellular metal, metallic sponge.

1. GİRİŞ

Alüminyum köpük metal üretmek için 1940'lı yıllardan başlayan periyotlarla pek çok yöntem geliştirilmiş olup, günümüzde birçok şirket ticari olarak alüminyum köpük metal üretmektedir.

Metal köpük teriminin ilk olarak kaydedildiği yıllar 1940'ların başına dayanmaktadır.

1950'lerde ilk açık hücreli metalik köpükler üretilmiştir. Eriyik alüminyum sıkıştırılmış kaya tuzu tanecikleri içine dökülmüş, sonra tuzlar çözünerek yapıdan ayrılmış ve açık gözenekler oluşmuştur.

1959'da tamamen farklı bir yöntem keşfedilmiştir. United Aircraft Corporation tarafından patentlenen yöntemde, toz haldeki metal yine toz halde bulunan gaz yapıcı madde ile karıştırılarak elde edilen karışım, metalin ergime sıcaklığına ısıtılarak gaz salıcı madde ayrışarak çözündürülmüş ve büyük miktarda gaz salarak köpük yapıyı oluşturmuştur. Bu toz karışımı, yayılan metal ve gaz yapıcı tozlara katı metal malzeme bir yapı vermek için, soğuk olarak sıkıştırılmış ve ekstüre edilmiştir. Daha sonra bu katı yapı metalin ergime sıcaklığına ısıtılmış ve gaz yapıcı madde çözünerek sıvı metale gaz salarak metal köpük yapıyı oluşturmuştur. Metal hidratlar (özellikle titanyum hidrat-TiH₂-) bu yöntemde gaz yapıcı madde olarak kullanılmaktadır.

1960'ların ortalarında Hardy ve Peisker'in patentledikleri yöntemde köpürtücü ajanları direkt olarak yarı eriyik haldeki metale eklemiştir. Bu yöntem toz temelli üretime göre daha ucuz bir maliyete sahiptir. Yeni bir gelişme olarak, viskoziteyi arttırmak ve yapıdaki dağılan gazı yakalamak için eriyik alüminyuma silisli bir malzeme (vermikülit) ilave edilmiştir. Yine yeni bir fikir olarak köpürtücü ajan olarak metal hidritler kullanmak yerine hidrat killeri kullanılmıştır.

Birkaç enstitü (genelde İngiltere ve merkez Avrupa'da bulunan) toz metalurjisi ile üretim yöntemlerini araştırmaya devam etmekte olup bu yöntemle hala ticari olarak köpük metal üretilmektedir.

Ticari olarak üretilen köpük metallere eriyik temelli üretim yöntemleri egemen olmuştur. Bir çok şirket metalik köpük üretmeye başlamıştır. The Shinko Wire Co. (Japonya) "ALPORAS" adıyla bilinen alüminyum esaslı köpük metal üretimini gerçekleştirmiştir. Hydro (Norveç) ve Cymat (Kanada) eriyiğe direkt gaz üfleyerek seri bir şekilde alüminyum köpük metal üretmektedir.

Inco ve ERG yüksek kalitede açık hücreli metalik köpük üretim yöntemi geliştirmiştir. Yine ALULIGHT toz metalurjisi ile alüminyum köpük metal üretmektedir.

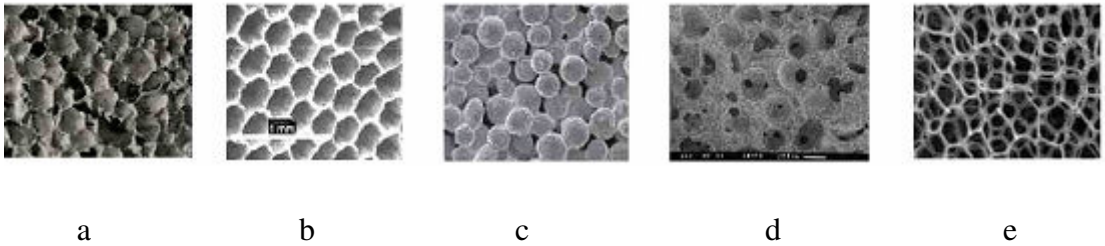
İyi kalitede köpük metal üretebilmek yüksek maliyet gerektirdiğinden pazardaki köpük metaller hala sınırlıdır. Dünyada çeşitli üniversitelerde daha düşük maliyette ve yüksek kalitede köpük metal üretebilme çalışmaları devam etmektedir.

Düşük yoğunluk, korozyon direnci ve düşük ergime sıcaklığından dolayı günümüzde en çok kullanılan metalik köpük alüminyum köpük metaldir. Fakat bununla beraber, demir, nikel, kurşun, çinko, titanyum köpük metaller de üretilmektedir

“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:

- **Hücreli 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.
- **(Katı) Köpük Metaller:** Hücreli metallerin özel bir sınıfıdır. Hücreler kapalı, küresel veya çokyüzlü (polihedral) ve her biri birbirinden ince bir filmle ayrılmıştır.
- **Metalik Süngerler:** Hücreli metallerin yapıbilimidir. Genellikle birbirine bağlı gözenekten oluşur.

Bu terimler birbirinden bağımsız değildir. Örneğin köpük metal, gözenekli ve hücreli bir yapıya sahip olmakla beraber sünger metal hücrelere sahip olmak zorunda değildir. Bazen malzemeleri ayırt etmek o kadar kolay değildir. Şekil 1.1’de çeşitli gözenekli metal yapıları görülmektedir.

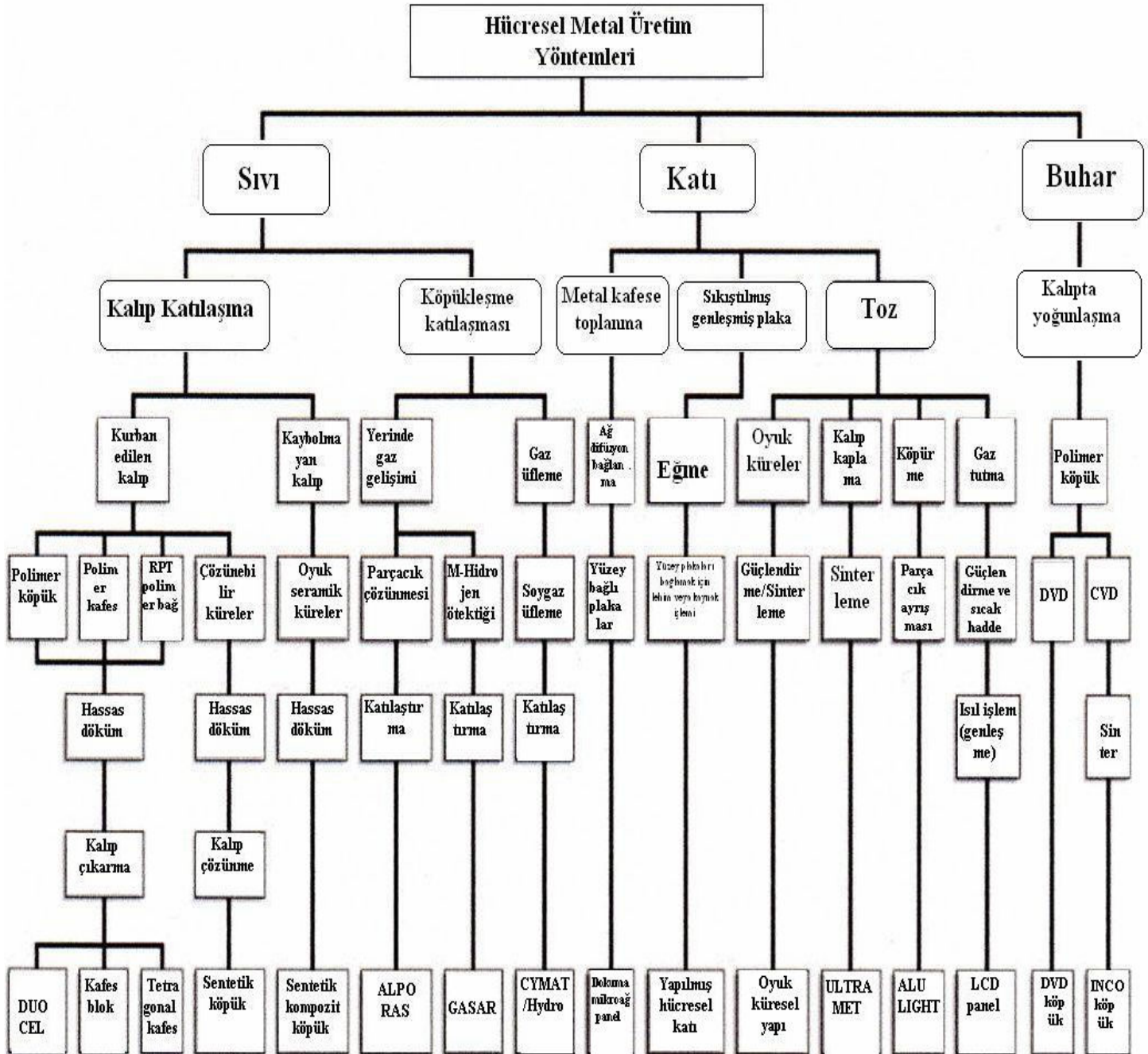


Şekil 1.1 Değişik gözenekli metal yapıları (Banhart, 2000a).

Birinci şekil (a) alüminyum köpük metal yapısını göstermektedir. İkinci şekilde (b) hücrelerin tek boyutta yayıldığı demir esaslı bir hücresel metal, üçüncüsü (c) metalik sünger oluşturan sinterlenmiş bronz tozunu (bu yapılar daha çok “sinter metal” veya “sünger metal” olarak adlandırılır), dördüncüsü (d), alüminyum sünger ve beşincisi de (e) nikel sünger (INCO) göstermektedir. ([1]; Banhart ve Weaire, 2002; Banhart, 2000a; Haydn ve Wadley, 2002, Wood, 1996, Miyoshi vd., 2000; Körner ve Singer, 2000).

2. KÖPÜK METAL ÜRETİM YÖNTEMLERİ

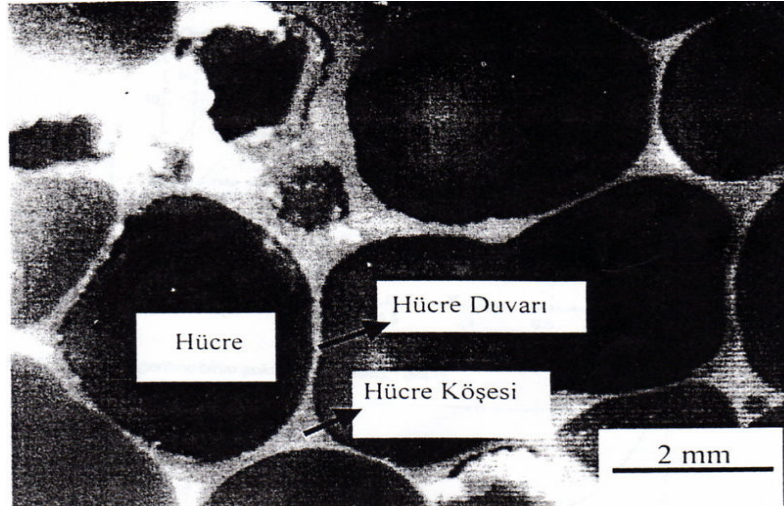
Alüminyum köpük metal uzun yıllardan günümüze çeşitli yöntemler kullanılarak geliştirilmiş olup ticari önemi nedeniyle en çok alüminyum gibi hafif metallerden üretmektedir. Köpük metallerin çok çeşitli üretim yöntemleri olup, bu yöntemlerin özeti şekil 2.1'de kısaca verilmiştir.



Şekil 2.1 Hücrel metal üretim yöntemleri (Haydn ve Wadley, 2002).

2.1 Kapalı Hücreli ve Açık Hücreli Köpük Metal Üretim Yöntemleri

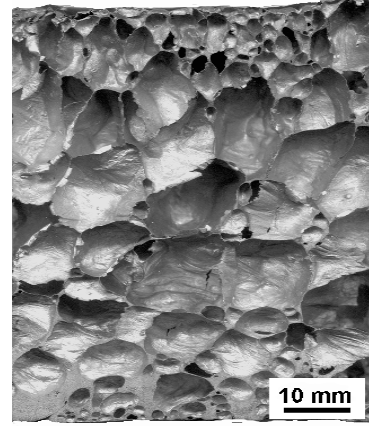
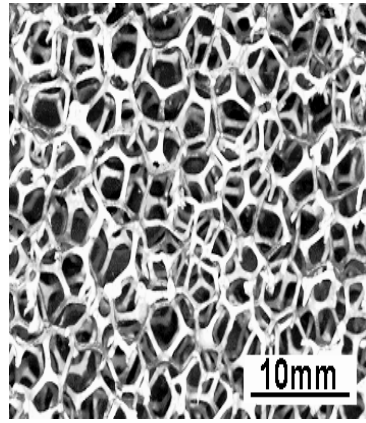
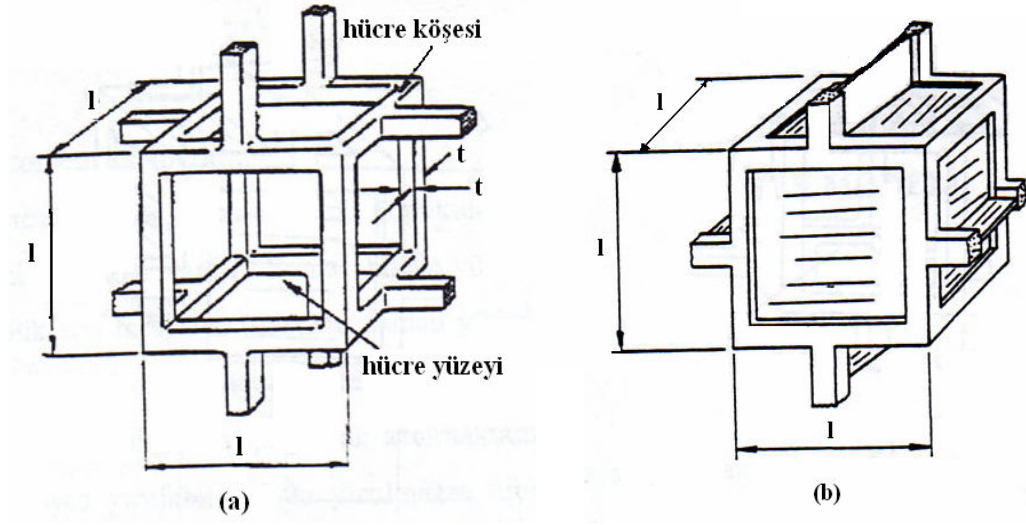
Yapısında dağılmış küçük boyutlu gaz kabarcıkları bulunan sıvılar, sıvı köpük olarak tanımlanır. Sıvı metal köpük, katılaşma noktasının altında bir sıcaklığa getirilirse katı metal köpük oluşur. Metal köpükte her bir gaz kabarcığının oluşturduğu hacim “hücre”dir (Şekil 2.2). Hücre, hücre duvarları ve hücre köşelerinden oluşur. Hücre duvarı iki gaz kabarcığının oluşturduğu sınır, hücre köşesi ise üç gaz kabarcığının kesiştiği yerdir. Hücre köşesi hücre duvarından daha kalındır (Elbir vd., 1999).



Şekil 2.2 Köpük metal hücre yapısı (Elbir vd., 1999).

Köpük metallerin “açık hücreli” ve “kapalı hücreli” olmak üzere iki çeşidi vardır. Köpük metaller incelenmeden önce bu terimlerin ne anlama geldiğinin anlaşılması gereklidir.

Metalik köpüklerin %80-90’ı gözeneklerden oluşmaktadır. Eğer gözenekler birbiriyle bağıntılı bir halde bulunuyorsa bu yapıya “açık hücreli köpük metal” adı verilmektedir. “Kapalı hücreli köpük metaller” de ise hücrelerin her birinin içerisinde gaz hapsedilmiştir ve birbirinden yalıtılmış bir halde bulunmaktadır. Şekil 2.3’de açık ve kapalı hücreli köpük metal hücre modelleri verilmiştir. Şekil 2.4’de de açık ve kapalı köpük metallerin hücre yapıları görülmektedir (Amjad, 2001).



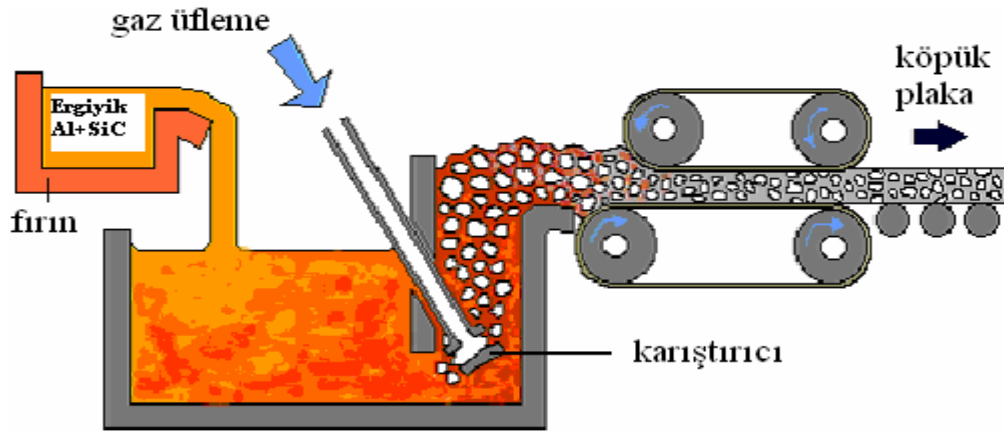
Şekil 2.4 Açık hücreli (a), Kapalı hücreli (b) Köpük metal hücre (Amjad, 2001).

2.1.1 Kapalı Hücreli Köpük Metallerin Üretim Yöntemleri

Kapalı hücreli köpük metaller için gaz üfleme, köpürtücü ajan kullanımı, toz metalurjisi ve köpükleşebilen öncüler kullanılarak üretim yöntemleri gibi pek çok üretim yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler aşağıda açıklanmaktadır.

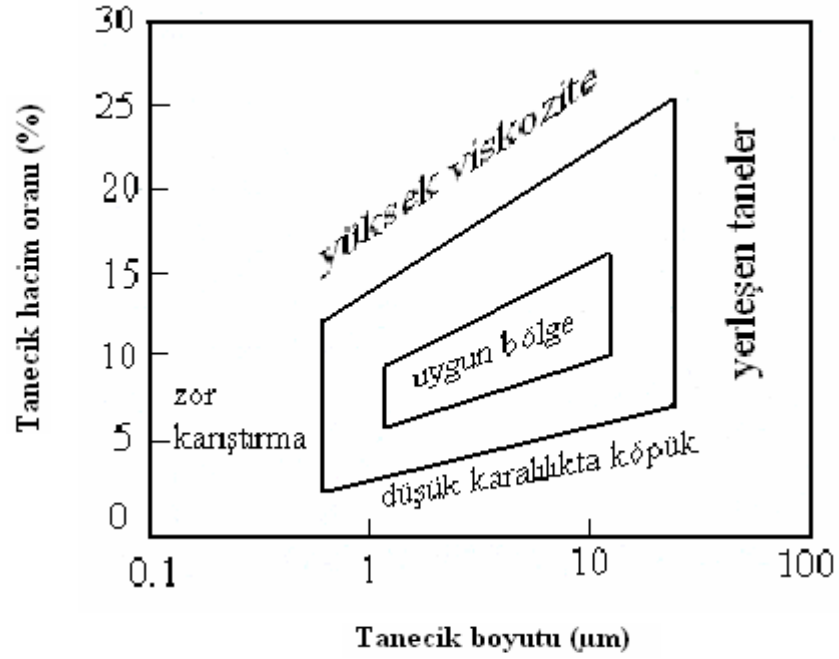
2.1.1.1 Gaz Üfleme İle Alüminyum Köpük Metal Üretimi

Bu yöntem Hydro Aluminium (Norveç) ve Cymat Aluminium (Kanada) tarafından keşfedilmiştir. Bu yöntemle göre –Şekil 2.5’de görülmektedir- SiC, Al₂O₃ veya MgO₂ tozları eriyiğin viskozitesini yükseltmek için eriyiğe ilave edilmektedir. Burada oluşabilecek bir problem eriyiğe ilave edilen parçacıkların eriyik tarafından ıslatılabilmesi ve eriyik içinde homojen bir şekilde karışabilmeleridir. Bunun için özel bir karıştırma tekniği kullanılmaktadır. Köpüklenmekteki ikinci adım ise oluşan bu metal matris kompozite gaz ilave edilmesidir. Gaz olarak soygazlar tercih edilmektedir (argon, vb.). Gaz, özel olarak dizayn edilmiş bir nozül yardımıyla eriyiğe ilave edilir. Böylece eriyik içinde tekdüze olarak dağılmış çok ince gaz kabarcıkları oluşur. Sonuçta oluşan köpükler eriyik yüzeyinde yüzer. Takviye taneciklerin eriyikte olmasından dolayı oluşan köpükler oldukça kararlı haldedir. Daha sonra oluşan köpük bir konveyör yardımıyla çekilerek soğuyup katılaşmasına izin verilir (Banhart, 2001).



Şekil 2.5 Gaz üfleme metodu [1].

Takviye parçacıkları %10-20 hacminde , ve 5-20µ boyutları arasında ilave edilir. Parçacık hacmi ve boyutunun çok az veya fazla seçilmesi çeşitli problemler yaratmaktadır. Bu durum Şekil 2.6’da görülmektedir (Wood, 1996).



Şekil 2.6 Alüminyum köpük yapımında işlem sınırları (Prakash vd., 1995).

Parçacıkların köpüğü kararlı hale getirme mekanizması literatürde tartışılmaktadır. Geniş olarak kabul gören parçacıkların hücre duvarı üzerinde yığılmasının köpüklerin kararlı hale getirilmesinde anahtar rol oynadığıdır. Öncelikle, parçacıklar yüzey viskozitesini arttırmakta bu da filmdeki drenajın hızını kesmektedir. İkinci olarak, parçacıklar eriyik tarafından kısmen ıslanmaktadır (Banhart, 2001). Bu yöntemle köpük metal üretmekte kullanılan tipik alaşımlar ve parçacıklar Çizelge 2.1’de verilmiştir (Asholt, 1999).

Çizelge 2.1 Gaz üfleme yoluyla üretilen metalik köpüklerde kullanılan tipik alaşım ve parçacıklar (Banhart, 2000a).

Temel alaşım	Parçacık tipi	Parçacık boyutu	Parçacık miktarı
AlSi8Mg (veya eş.)	SiC	10-30µm	% 10-30
AlSi8MgCuNi	SiC	10-30µm	% 10-30
AA 6061 (veya eş.)	Al ₂ O ₃	10-30µm	% 10-30

Bu yöntemle üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluğu 0,069-0,54 g/cm³ arasında, ortalama hücre boyutları 3-25 mm arasındadır.

Ortalama hücre boyutları gaz akış hızına, pervane dönüş hızına, ve diğer parametrelere bağlıdır (Banhart, 2001).

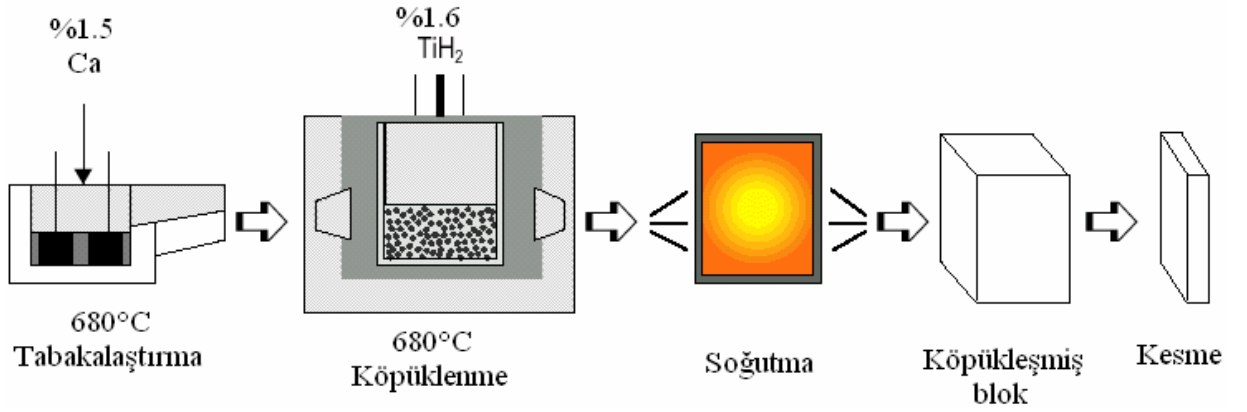
Bu yöntemin en önemli avantajı büyük hacimlerdeki köpüklerin sürekli bir şekilde üretilmesi ve düşük yoğunluğun başarılabilmesidir. Bu yöntemle üretilen alüminyum köpük metaller daha düşük fiyata sahip olabilmektedir (Banhart, 2001). Kanada şirketi Cymat 1.5 m genişlikte, 2.5-15 cm kalınlığında köpük plakaları saatte 1000 kg kapasite ile dökmektedir. Bu yöntemin dezavantajı ise üretilen panellerin kesilmesi, istenilen şekle getirilmesi gibi problemlerdir (Wood, 1996). Yöntemin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.2’de görülmektedir [1].

Çizelge 2.2 Gaz üfleyerek üretilen metalik köpüklerin avantaj ve dezavantajları [1].

Avantajlar	Dezavantajlar
- Sürekli üretim için çok uygun bir yöntemdir ve büyük miktarlarda üretim yapılabilir. - Ucuz ve nispeten basit bir işlemdir.	- Gaz dağılımını kontrol etmek zordur ve gözenekler her zaman büyüktür (0.5-1cm). Gözenek boyutu üzerinde kontrol zordur ve tesadüfi çok büyük gözenekler oluşabilir buda mukavemeti kötü etkiler. - Sadece levha dökümüne uygundur ve yüzey kesimi düzensizdir. - Önceden seramik parçacıkların karıştırılması gerekir. Bu bütün alaşımlar için uygun değildir (bazı alaşımlar yeteri kadar viskoz değildir).

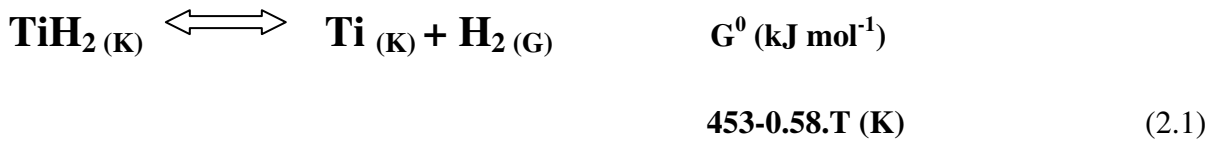
2.1.1.2 Köpükleştirici Ajanlar Yardımıyla Alüminyum Köpük Metal Üretimi

Köpüren eriyik oluşturmak için ikinci yol köpük oluşturuca gaz üflemek yerine eriyiğe direkt olarak köpükleştirici ajan ilave etmektir. Köpükleştirici ajan etkili sıcaklıkta çözünerek gaz salmakta ve köpükleşmeyi sağlamaktadır. Şekil 2.7’de sistemin şematik görünümü verilmektedir. Yöntemin ticari adı “ALPORAS” olarak bilinmektedir (Miyoshi vd., 2000).

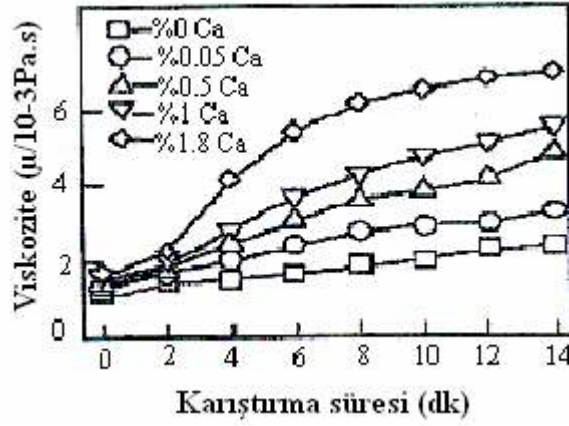


Şekil 2.7 ALPORAS yöntemi (Miyoshi vd., 2000).

Baloncukları kararlı hale getirmek için eriyiğin viskozitesini arttırmak ve yüzen baloncukları korumak lazımdır. Eriyiğe kalsiyum ilave edilerek eriyiğin viskozitesi ayarlanır. Bu yöntemde Ca, sıvı alüminyuma 680°C sıcaklıkta % 1.5 oranında ilave edilir ve karışım 6 dk çevre atmosferde karıştırılır. Viskozite istenilen değere ulaşıncaya % 1.6 oranında titanyum hidrat (TiH₂) eklenerek uygun viskozitede ve sıcaklıkta hidrojen gazı salması beklenir (Miyoshi vd., 2000). Hidratın çözünme reaksiyonu (2.1) denkleminde görülmektedir. [1].



Gaz salma işlemi ile köpüren eriyik genişerek kalıbı doldurur. Şekil 2.8’de karıştırma zamanının viskoziteye etkisi görülmektedir.



Şekil 2.8 Karıştırma zamanının viskoziteye etkisi (Miyoshi vd., 2000).

Dökme ALPORAS bloklar 450*2050*650 mm boyutlarında ve 160 kg. ağırlığındadır. Alüminyum köpük bloklar kalıptan çıkartılarak istenilen boyutlarda kesilir (Körner ve Singer, 2002).

Literatürde zirkonyum hidrat'ın (ZrH_2) de alüminyum köpük üretiminde %0.5-0.6 konsantrasyonlar arasında köpükleştirici ajan olarak kullanıldığından bahsedilmektedir. Fakat pahalı olduğu için tercih edilmez.

Bu yöntemle elde edilen alüminyum köpük metalin yoğunluğu $0.18-0.24 \text{ gr/cm}^3$ arasında olup, gözenek boyutları 2-10 mm arasındadır.

Burada eriyik viskozitesini arttırmak için kalsiyum dışında SiC , Si_3N_4 , ve Al_2O_3 gibi parçacıklar kullanılabilir. Fakat sıcaklığı kontrol etmek zordur, karıştırma süresinin artması çalkalanmanın oluşmasına dolayısıyla daha sonra oluşabilecek köpük hücre boyutunun 20μ 'un altında olmasına yol açmasına neden olur (Banhart, 2001).

ALPORAS yönteminin avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.3'de verilmiştir [1].

Çizelge 2.3 ALPORAS yönteminin avantaj ve dezavantajları [1].

Avantajlar	Dezavantajlar
• Oldukça tekdüze (uniform) hücre boyutu. Alcan yönteminden daha homojen köpük yapısı. • Küçük hücreler.	• Katkı malzemelerinden dolayı pahalı bir yöntem. • İstenilen son şekilde parça üretilmemesi.

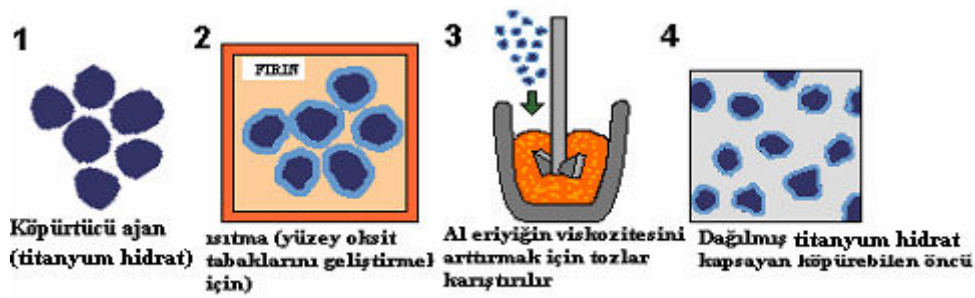
2.1.1.3 Köpürebilen Öncüler Kullanarak Metal Köpük Üretimi (İki-Evrelî İşlem)

Kimyasal köpürtücü ajanlar kullanılarak üretilen metalik köpüklerin hücre yapı kontrolü, direkt olarak gaz üfleme yöntemiyle üretilenlere nazaran daha iyi sağlanmaktadır. Fakat köpürtücü ajanların eriyik içinde dağılmasının kontrol edilmesi zordur, bu da oluşan metalik köpük hücre yapısının homojen bir şekilde olmasının çok zor olduğu manasına gelmektedir.

Köpürtücü ajanın eriyik içinde tam olarak dağılabilmesinin geliştirilmesi için pek çok yöntem araştırılmış ve denenmiştir. Bunun için geliştirilen bir yöntemde köpürtücü ajan, katı metal tozlarıyla karıştırılarak ısıtılmış ve sıvı metale eklenerek karıştırılmış (çok ince tozlar kullanılarak) ve çok muntazam bir karışma sağlanmıştır. Bu karışıma “köpürebilen öncü karışım” adı verilmektedir. Bu yöntem iki şekilde uygulanır; direkt gaz yöntemiyle ve toz metalurjisi ile [1].

2.1.1.3.1 Sıvı Metal Yolu ile Köpükleşebilen Öncü Üretimi (FORMGRIP)

Bu yöntem, **Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor** kelimelerinin baş harfleri kullanılarak adlandırılmıştır [1]. Şekil 2.9’da görüldüğü gibi titanyum hidrat (TiH_2) ısıtılma tabi tutulmaktadır ve bunun sonucunda yüzeyde titanyum oksit bir film tabakası oluşması muhtemeldir (sadece hidrojen geçirgenliği ile sınırlı). Daha sonra hidrit eriyik alüminyumla karıştırılır (bu arada viskoziteyi arttırmak için SiC parçacıkları eriyiğe katılmalıdır) hidrit parçacıkların üzerindeki oksit tabakası çözünmeyi geciktirici bariyer rolü oynamaktadır. Bu da metal, köpürtücü ajan ve SiC’den yapılmış düşük oranda gözenekli öncü üretir.

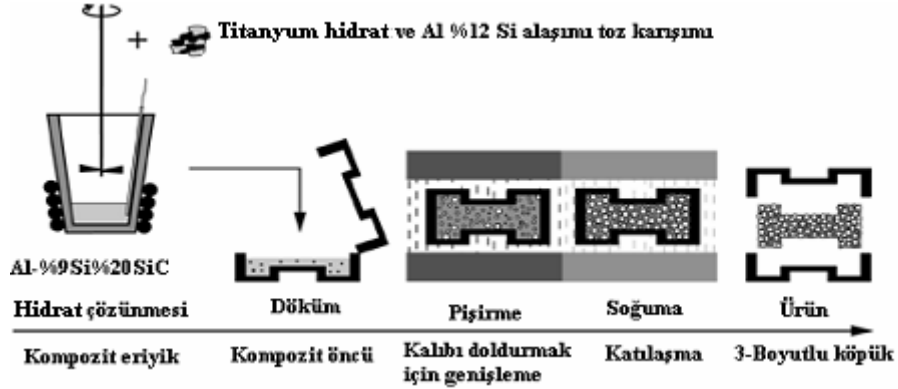


Şekil 2.9 FORMGRIP işleminin birinci adımı [1].

İkinci adım, alaşımın eritilerek -bunun neden olacağı titanyum hidrit’in hidrojen gazı salıp çözünmesi için- öncü yaklaşık $630^{\circ}C$ ’ye pişirilir.

Pişirme zamanı ayarlanarak, 1-10 mm arası hücre boyutu ve %50-95 gözenekli yapıya sahip köpükler elde edilebilir. Daha sonra soğutularak ürün elde dilmektedir.

Dağılımın gelişmesinden dolayı köpükler tekdüze bir yapıya sahiptir. Şekil 2.10'da FORMGRIP yönteminin tamamı şematik olarak görülmektedir (Gergely ve Clyne, 2000).



Şekil 2.10 FORMGRIP yöntemi (Gergely ve Clyne, 2000).

FORMGRIP yönteminin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.4'de verilmiştir [1].

Çizelge 2.4 FORMGRIP yönteminin avantaj ve dezavantajları [1].

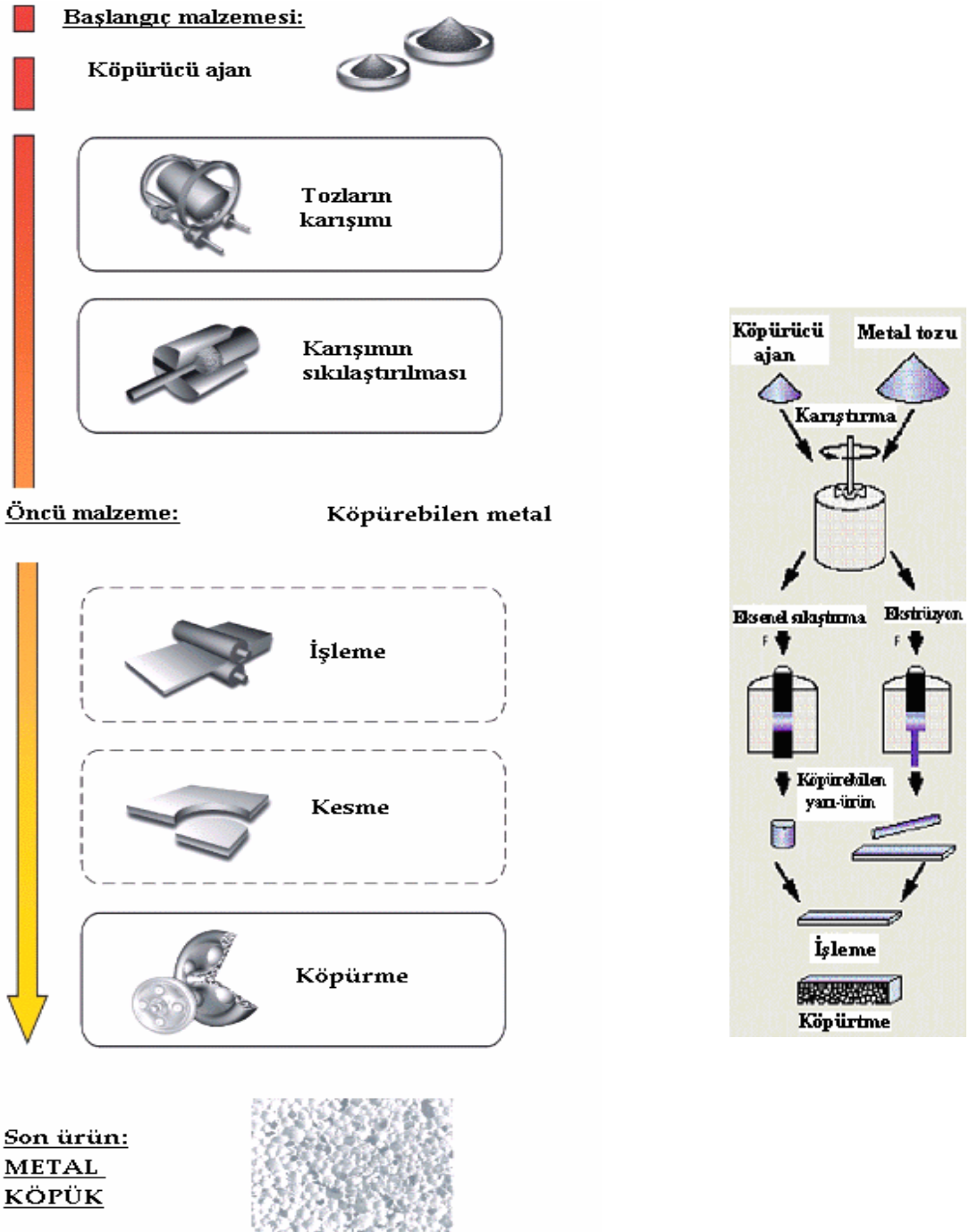
Avantajlar	Dezavantajlar
- Hücre tekdüzeliği ve kontrolü çok iyi yapılabilmektedir (ısıtma/soğutma işleminin ve toz köpürtücü ajanın bir fonksiyonu olarak). - ALPORAS köpüğü ile aynı hücre boyutuna sahiptir. - Son ürün şeklinde parçalar dökülebilmektedir. - Bu işlem karmaşık kalıpları doldurmak için kullanılabilir.	- Sınırlı malzemeler kullanılabilir. - Seramik parçacıkların kullanılması zorunludur. - Metal ergime sıcaklığında yeteri derecede viskoz değilse, köpük katılaşmadan önce sönecektir.

2.1.1.3.2 Toz Metalurjisi İle Köpük Metal Üretimi

ALULIGHT ve FOAMINAL adlarıyla bilinen toz metalurjisi ile üretilen köpük metal üretim yöntemleri Fraunhofer-Institut (Bremen) tarafından patentlenmiştir (Haydn ve Wadley, 2002).

Bu yöntemde, toz metal ve köpük yapıcı madde karıştırıldıktan sonra presleme, ekstrüzyon ve haddeleme benzeri metal şekillendirme yöntemleri ile köpükleşecek yoğun yapıya sahip yarı ürün elde edilmektedir (Şekil 2.11). Köpükleşecek yarı ürün, metalin erime sıcaklığının üstüne ısıtılmakta ve bu esnada köpük yapıcı malzeme bozunarak gaz açığa çıkarmaktadır. Açığa çıkan gaz, erimiş metalin genişlemesine ve gözenekli bir yapı oluşmasına neden olmaktadır. Metal hidratların yanında (örneğin TiH_2), karbonatlar (örneğin $CaCO_3$, potasyum karbonat, sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat) ve buharlaşan maddeler (örneğin civa bileşikleri ve toz organikler) köpükleştirici ajan olarak kullanılabilirler.

Etkin bir köpükleşme için, gazın kaçmasına engel olabilecek yoğunluğa sahip bir yarı ürünün hazırlanması çok önemlidir; köpükleştirici maddenin metal içinde tamamen hapis edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden şekillendirmede kullanılan sıcaklık ve basınç miktarları, toz metal parçacıklarını birbirine bağlayacak ve köpük yapıcı maddenin bozunumu ile oluşan hidrojen gazının kaçışını önleyecek şekilde ayarlanmalıdır. Haddeleme yöntemi ile yapılan sıkıştırılmalarda 350-450°C arası sıcaklıklar parçacıklar arasında özellikle yüzey tabakalarında yayınma sağlamak için yeterlidir.



Şekil 2.11 Toz metalurjisi yöntemi. (Banhart, 2000a).

Yarı ürünün köpükleşmesi için gereken zaman, uygulanan sıcaklığa ve yarı ürünün büyüklüğüne bağlı olup, birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişmektedir.

Bu yöntem ile sadece Al ve Al alaşımlarının kullanımı ile sınırlı olmayıp, kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal alaşımları da uygun köpük yapıcı madde ve işlem parametrelerinin seçilmesi suretiyle köpükleştirilebilir (Güden ve Elbir, 2001).

Alüminyum ve alüminyum alaşımları için köpürtme işleminde kullanılabilecek en iyi köpürtücü ajan titanyum hidrat (TiH_2)'dir. Alüminyum için TiH_2 tozu genellikle %0.6-1 arasında kullanılır (Kennedy, 2002).

Diğer hidratlar (ZrH_2 ve HfH_2) pratikte kullanılabilmekle beraber daha pahalı olduklarında tercih edilmezler. TiH_2 'nin hangi sıcaklıkta hidrojen salmasını belirlemek zordur (Banhart, 2004).

Çizelge 2.5'de toz metalurjisi kullanılarak köpük metal üretiminin avantaj ve dezavantajları verilmiştir [1].

Çizelge 2.5 Toz metalurjisi kullanılarak köpük metal üretiminin avantaj ve dezavantajları [1].

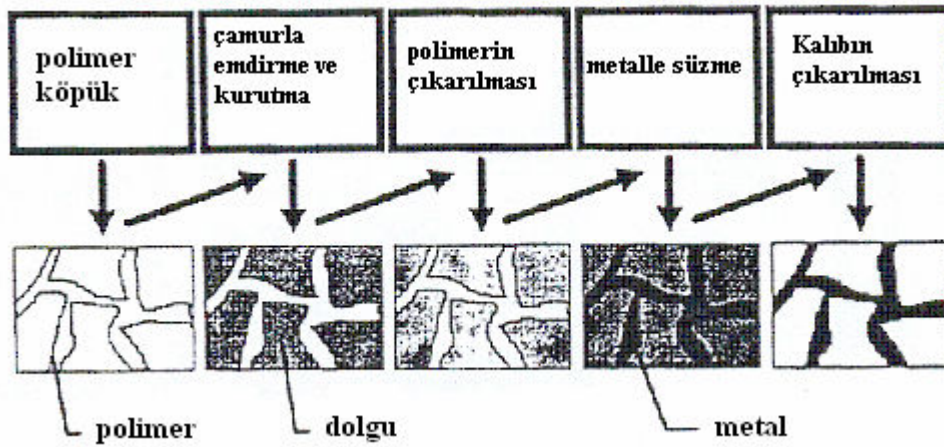
Avantajlar	Problemler	Dezavantajlar
Nihai ürüne yakın üretim mümkün.	Gözenek yapısının düzeni yeterli değil.	Tozların maliyeti yüksek.
Kompozitler üretilebilir.	İşlem kontrolü geliştirilmeli.	Çok büyük parçaların üretilebilmesi çok zor.
Alaşım seçiminde esneklik.		
Kararlaştırıcı ek malzemelere ihtiyaç yok.		
Seramik ve fiberler eklenebilir.		

2.1.2 Açık Hücreli Köpük Metal Üretimi

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

2.1.2.1 Polimer Köpük İle Hassas Döküm

Sıvı metalden direkt olmadan da köpük metal üretmek mümkündür. Bu yöntem “emdirme” olarak adlandırılır (Amjad, 2001). Şekil 2.12 ve Şekil 2.13’de bu yöntem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Hassas döküm metodu (Banhart, 2001).

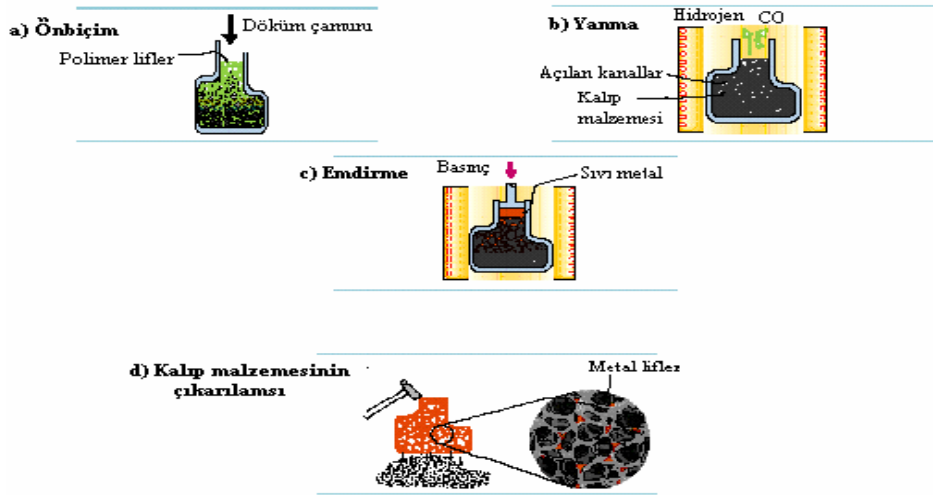


Şekil 2.13 Polimer köpük kullanılarak hassas döküm yöntemi [1].

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).

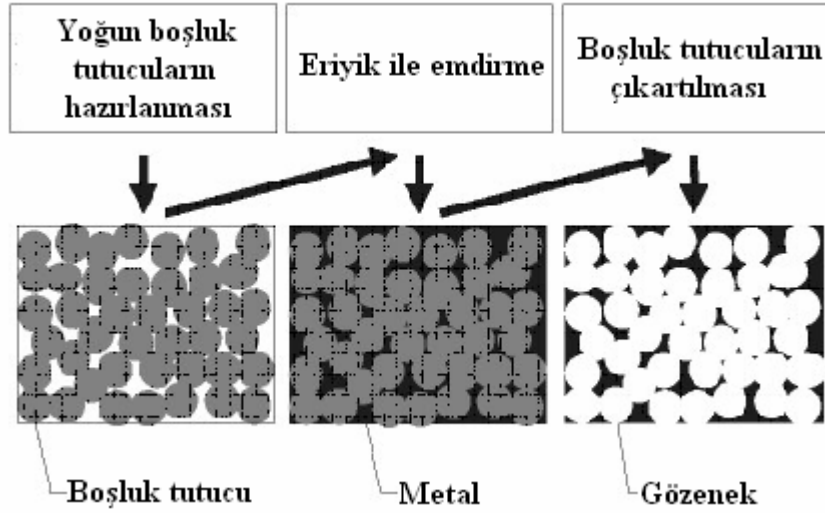


Şekil 2.14 Hassas döküm yöntemi (DUOCEL Yöntemi) (Amjad, 2000).

Yine bu yöntem şekil 2.14’de şematik olarak görülmekte olup aşağıda özetlenmiştir. 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).

2.1.2.2 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 2.15’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.15 Boşluk tutucu kullanılan üretim yöntemi (Banhart, 2000b).

Vermikülit, çözülebilen tuzlar, genişleyen kil tanecikler, kum peletler, köpük cam küreler, veya alüminyum oksit boş küreler inorganik dolgu malzemeleri olarak kullanılabilirler.

İşlem adımları Şekil 2.15’de görülmektedir:

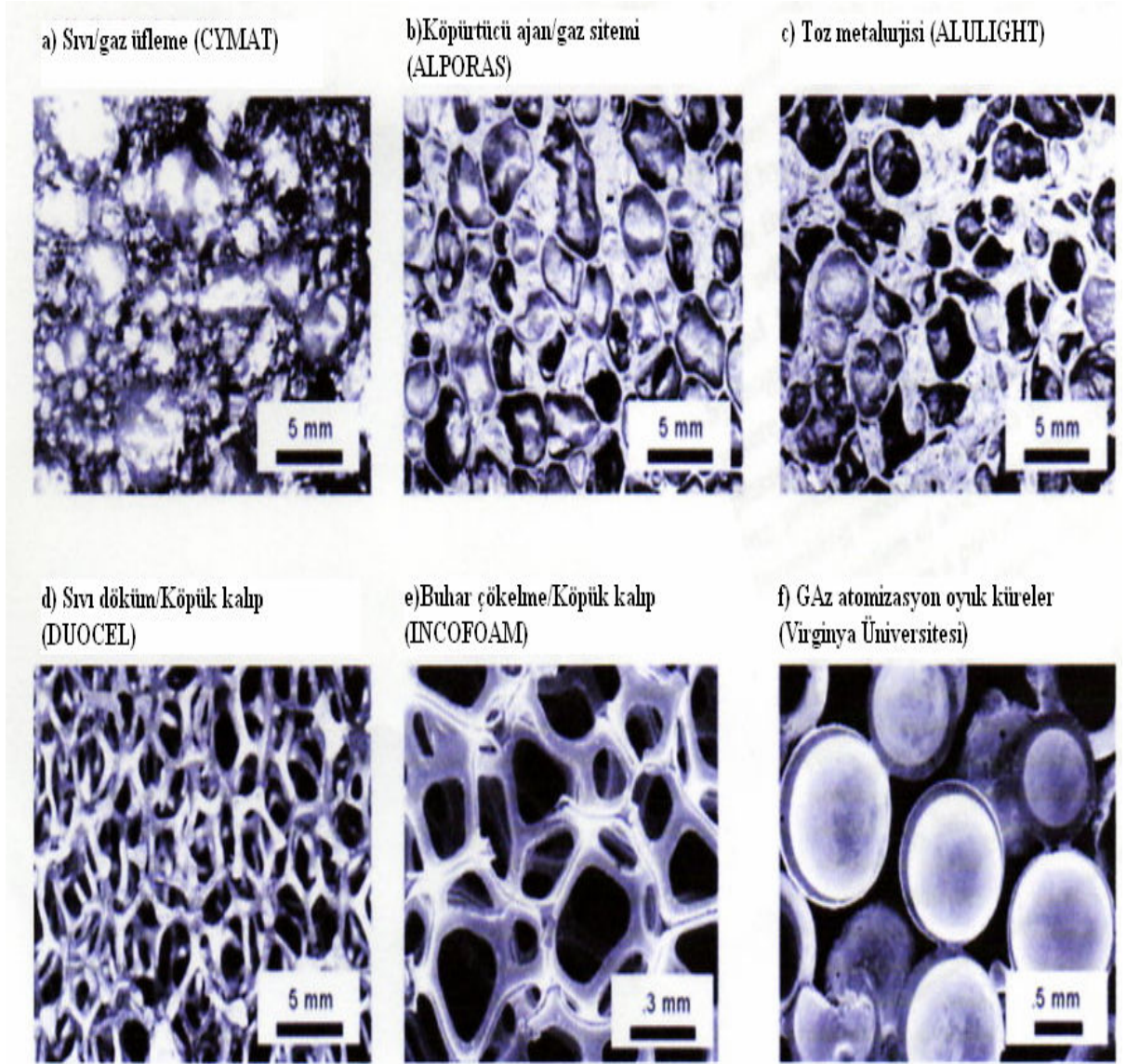
- Yoğun boşluk tutucuların hazırlanması: bunlar, organik veya inorganik olabilirler.
- Eriyik ile emdirme: tanecikler arasındaki çatlakların tamamen doldurulması için dış basınç gereklidir.
- Çıkarma: Dolgu tanecikleri liç işlemi veya ısıl işlemle çıkarılabilir (Banhart, 2000b).

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).

2.2 Köpük Metal Üretim Metotlarının Özeti

Yukarıdaki bölümde anlatılan alüminyum esaslı köpük metal üretim yöntemlerin özeti Çizelge 2.6'da görülmektedir (Banhart, 2001). Ayrıca çeşitli yöntemlerle üretilmiş köpük metal yapıları Şekil 2.16'da görülmektedir.

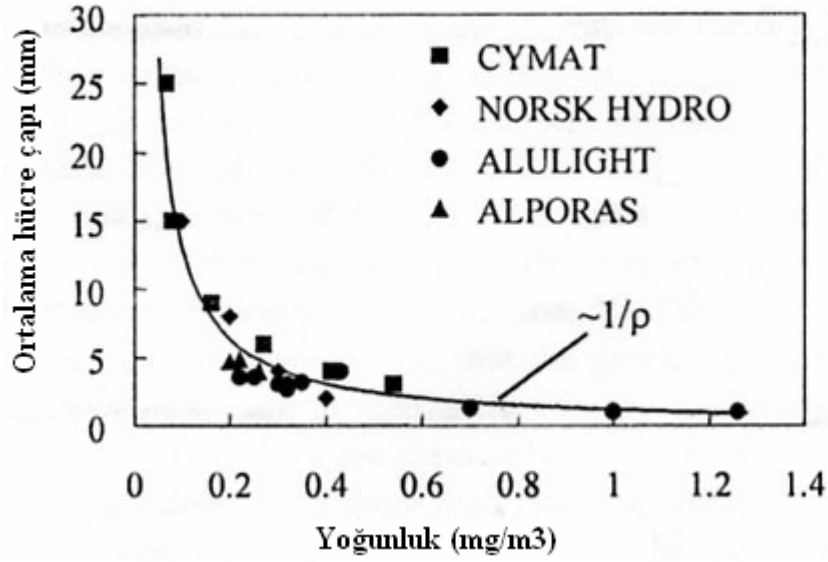


Şekil 2.16 Metalik köpük yapılar (Haydn ve Wadley, 2002).

Çizelge 2.6 Metalik köpüklerin üretim yöntemleri ve özellikleri (Banhart 2001; Gergely vd., 2002)

Sınıf	Bölüm	İşlem	Gözeneklilik	Örnek Metal	Ticari Uygulama
Kapalı hücreli üretim	2.1.1.1	Gaz üfleme ile köpürtme	80-97.5	Al, Zn	Evet (CYMAT)
	2.1.1.2	Köpürtücü ajan ile köpürtme	91-93	Al, Zn	Evet (ALPORAS)
	2.1.1.3.2	Köpükleşebilen öncü ile köpürtme	50-96	Al	Evet (FORMGRIP)
	2.1.1.4	Toz Metalurjisi	60-90	Al,Zn,Pb	Evet (ALULIGHT, FOAMINAL)
Açık hücreli üretim	2.1.2.1	Polimer köpükler ile hassas döküm	80-97	Al,Zn	Evet (DUOCEL)
	2.1.2.2	Boşluk tutucuların etrafına hassas döküm	≤ 60	Al,Zn,Pb,Cu	Evet
	2.1.2.4	Katı-sıvı ötektik katılaşması (GASAR)	5-75	Ni,Cu,Al,Mg	Hayır

Şekil 2.17’de değişik yöntemlerle üretilmiş köpük metallerin ortalama hücre çapı-yoğunluk ilişkisi görülmektedir (Körner ve Singer, 2000).



Şekil 2.17 Köpük metallerin ortalama hücre çapı-yoğunluk ilişkisi (Körner ve Singer, 2000).

Çizelge 2.7’de farklı metotlarla üretilmiş köpük metallerin özellikleri görülmektedir.

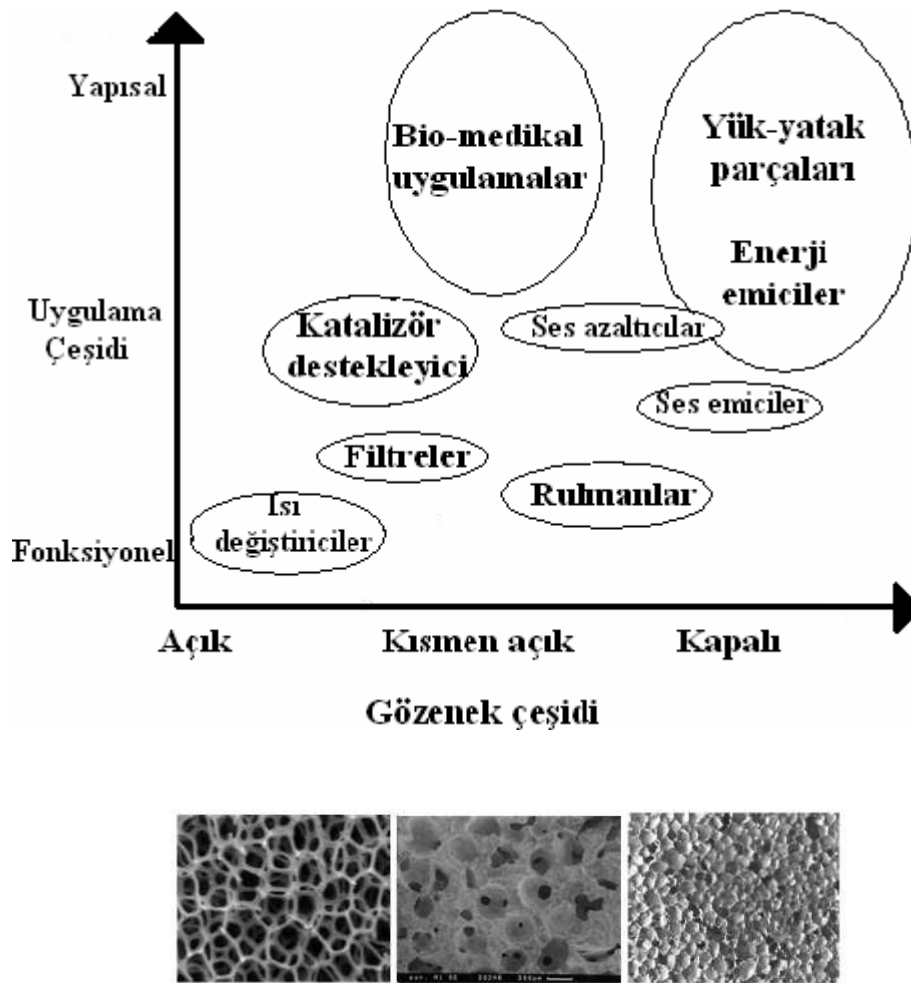
Çizelge 2.7 Kapalı hücreli alüminyum köpük metallerin özellikleri (Elbir vd., 1999).

	Gaz Üfleme	Köpükleştirici Ajanlar	Toz Metalurjisi
Üretim metodu	Sıvı Al + gaz	Sıvı Al + gaz	Katı Al + gaz
Yoğunluk (g/cm ³)	0.08-0.38	0.21	0.35-0.7
Nispi yoğunluk	0.03-0.14	0.08	0.13-1.26
Hücre boyutu (mm)	4-18	6	3
Fiyat (\$/kg)	5-10	-	300

3. KÖPÜK METALLERİN KULLANIM ALANLARI ve UYGULAMALARI

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 (Şekil 3.1)



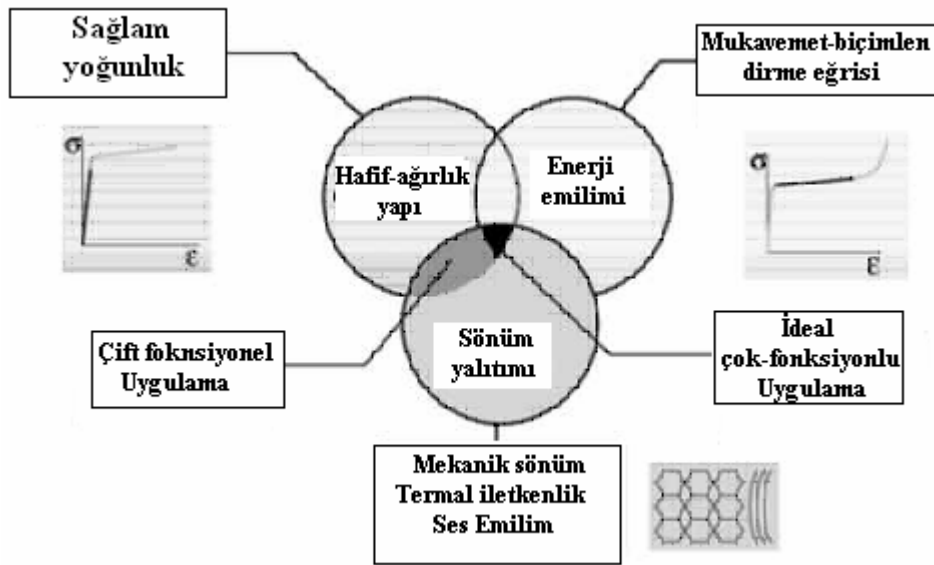
Şekil 3.1 Köpük metallerin kullanım alanları (Banhart, 2001)

Birçok uygulamada başta alüminyum olmak üzere magnezyum ve titanyum köpük metaller tercih edilmektedir (Banhart, 2001).

3.1 Köpük Metallerin Yapısal Uygulamaları

3.1.1 Otomotiv Endüstrisi

Şekil 3.2 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-.

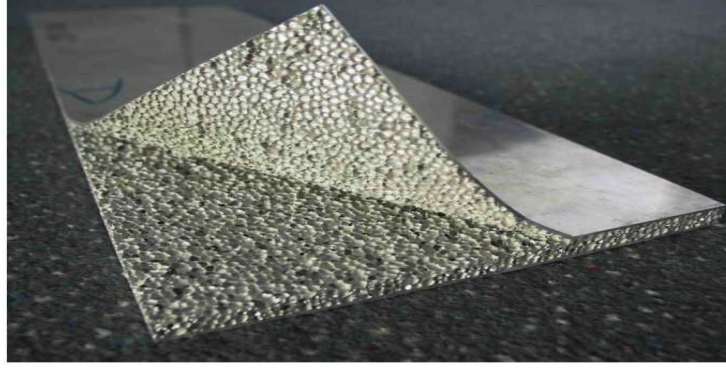


Şekil 3.2 Otomotiv alanında yapısal uygulamalar (Banhart, 2003).

3.1.1.1 Hafif-Ağırlıklı 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 (Yu ve Eifert, 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 (Patrick, 2000). Şekil 3.3'de alüminyum sandviç yapı görülmektedir (Banhart ve Weaire, 2002).



Şekil 3.3 Alüminyum hafif-ağırlıklı sandviç panel örneği. (Banhart ve Weaire, 2002).

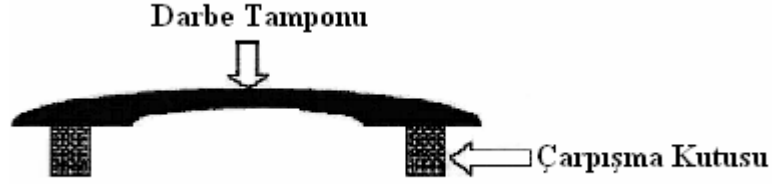
Yine Şekil 3.4 ‘de alüminyum sandviç panelin bir kullanım alanı görülmektedir.



Şekil 3.4 Alüminyum sandviç panelden yapılmış bir kaldırma kolu (Banhart, 2003).

3.1.1.2 Çarpışma Enerjisi Emilimi

Alüminyum köpüklerin otomotiv sanayindeki uygulamalarına bir diğer örnek çarpışma emicileridir. Bir çok şirket yolcuları koruyarak, arabada meydana gelebilecek hasarı azaltıp dolayısıyla tamir masrafını indirmek için çeşitli çalışmalar yapmıştır. Bunun sonucunda çarpışma kutuları keşfedilmiştir (Şekil 3.5). 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).



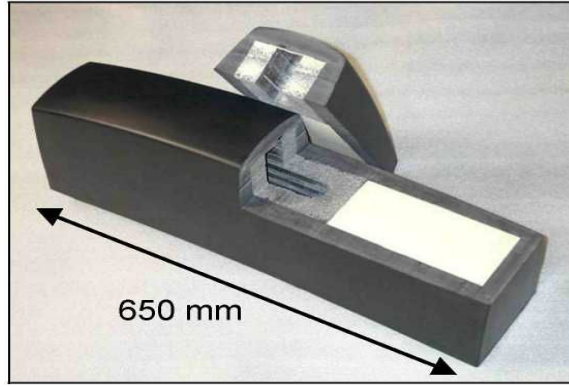
Şekil 3.5 Çarpışma kutusu kullanımı (Baron 2000).

Çarpışma kutuları, alüminyum ekstrüzyon veya çelik bir dış yapının içerisine köpük çekirdek (göbek) malzemenin yerleştirilmesi ile oluşur (Şekil 3.6). İçerisinde alüminyum köpük bulunan bu kutular, içi boş çarpışma kutularına nazaran çok daha fazla enerji emebilirler (Banhart, 2003).



Şekil 3.6 Çarpışma kutusu örnekleri (Banhart, 2003).

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 Schunk Sintermetalltechnik) tarafından tasarlanan tramvaylarda kullanılacak çarpışma emici sistemi şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7 Tramvaylar için çarpışma emici yapı (Banhart, 2003).

Bu yapı, ekstrüze tozlar tarafından endirekt olarak köpüren alüminyum köpük çekirdek tarafından oluşturulmuştur.

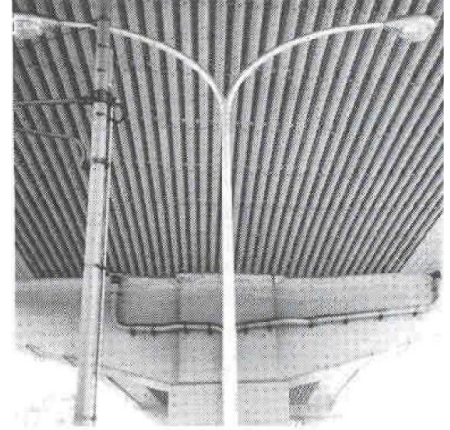
Bir başka örnek olarak LKR (Avusturya) ve BMW tarafından alüminyum köpük metali kullanılarak montaj bloğu geliştirilmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 LKR ve BMW tarafından geliştirilmiş motor blok örneği, soldan sağa; boş döküm, alüminyum köpük çekirdek içeren yekpare parça, kesit görüntü (Banhart, 2003).

3.1.1.3 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 Şekil 3.9’da görülmektedir (Miyoshi vd., 2000).



Şekil 3.9 Viyadük altında ses emen levha yapı (Miyoshi vd., 2000).

Viyadüğün altına levha halinde konan ALPORAS köpük metal yapısı viyadük altından geçen araçların seslerini emerek gürültü kirliliğini ortadan kaldırmaktadır (Miyoshi vd., 2000).

3.1.2 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).

3.1.3 Gemi İnşa 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).

3.1.4 Yapı endüstrisi

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

3.1.5 Spor Malzemeleri

Spor teçhizatları bu sektör için yüksek sayılabilecek maliyetlerine rağmen, uygulamaya değer alan bulmuştur. Spor malzemelerinde ,futbolcular için kaval kemiği koruyucuları (tekmelik) yapımında iyi enerji emiliminden dolayı alüminyum köpük kullanımı örnek olarak verilebilir (Banhart, 2001).

3.2 Köpük Metallerin Fonksiyonel Uygulamaları

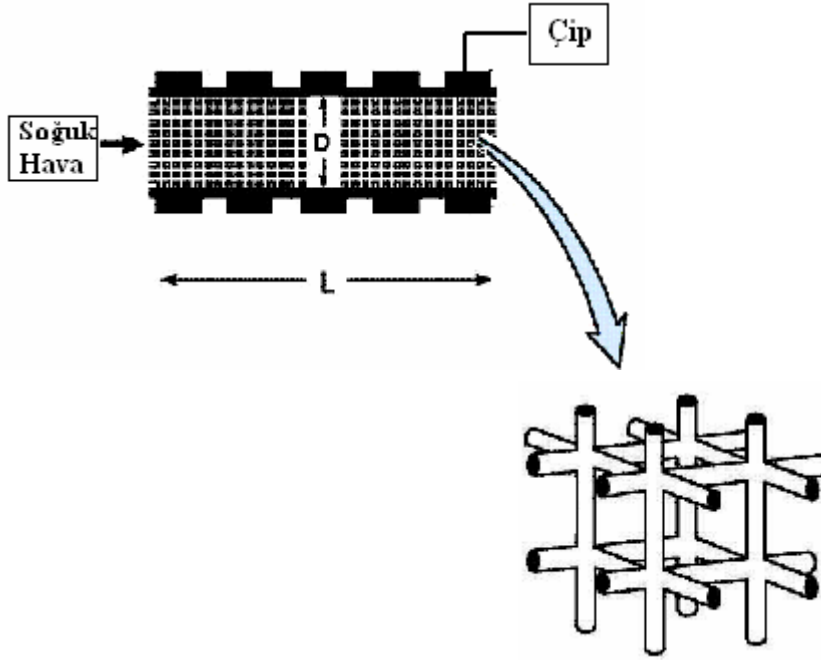
3.2.1 Isı Değiştiriciler (Eşanjör)

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). Şekil 3.10'da metal köpük matrisi içine gömülmüş tüplerden oluşturulan gelişmiş yüksek sıcaklık radyatörü görülmektedir (Haack vd., 2002).



Şekil 3.10 Köpük metal ısı değiştirici (Haack vd., 2002).

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 3.11'de görülen sistem yardımıyla soğutma başarılabilmektedir.



Şekil 3.11 Açık hücreli köpük metal boyunca basınçlı devir daim ile soğutulan çoklu-çip modül dizaynı (Lu vd., 1997).

Şekil 3.11'de görüldüğü gibi çipler açık hücreli köpük metal sandviç yapının üzerinde bulunan iki plakanın üzerine yerleştirilmiştir. Basınçla devir daim edilen soğuk hava çipleri soğutmaktadır.

3.2.2 Su Arıticılar

Köpük metaller, suda çözünmüş 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).

3.2.3 Susturucular

Gürültüyü azaltmak için (örneğin, kompresörler için pnömatik aletlerde), Şekil 3.12’de örneği görülen uygun susturucular kullanılarak gerçekleştirilebilir. (Banhart, 2000b).



Şekil 3.12 Alüminyum köpükten yapılmış susturucular (Banhart, 2000b).

3.2.4 Filtreler

Katı parçacıkları gaz veya sıvıdan, veya iki sıvıyı birbirinden ayırmak için, büyük depo hacminden dolayı açık hücreli alüminyum köpük metaller kullanılabilir (Banhart, 2000b) .

3.2.5 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 metallerden yapılabilir. Alüminyum köpük kullanımım sadece yüksek sağlamlık ve mekanik özellikler sağlamaz aynı zamanda geleneksel eşyalara göre daha çekicidir (Banhart, 2001).

4. ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN EKONOMİSİ ve GELECEĞİ

Alüminyum köpükler ucuz bir malzeme çeşidi değildir. Birçok değişik ve yararlı uygulaması olmasına rağmen, yapımında kullanılan hammaddelerden dolayı (mesela 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 kasıt 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. ALULIGHT yeni tesisler kurarak büyük miktarlarda öncü malzeme üretmiş ve bu sayede üretim maliyeti 20 €/kg (1995) den 5 €/kg (2005) düşürülmüştür.

Alüminyum köpük maliyetlerini düşürmek için bir yöntemde üretimde ikincil alüminyum, metal matris hurdalar ve daha düşük fiyatlı köpürtücü ajanlar (TiH_2 yerine kalsiyum karbonat) kullanımıdır (Åsholt, 1999).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yıldız Teknik Üniversitesi Balkan İleri Döküm Teknolojileri Merkezi (BCACT) laboratuvarında alüminyum esaslı köpük metal üretimi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla geliştirilen köpük metal üretme makinesiyle kapalı hücreli alüminyum köpük üretme çalışması yapılmış, denemelerden sonra kapalı hücreli köpük metal üretilmiştir.

5.1 Kapalı Hücreli Köpük Metal Üretme Deneyleri

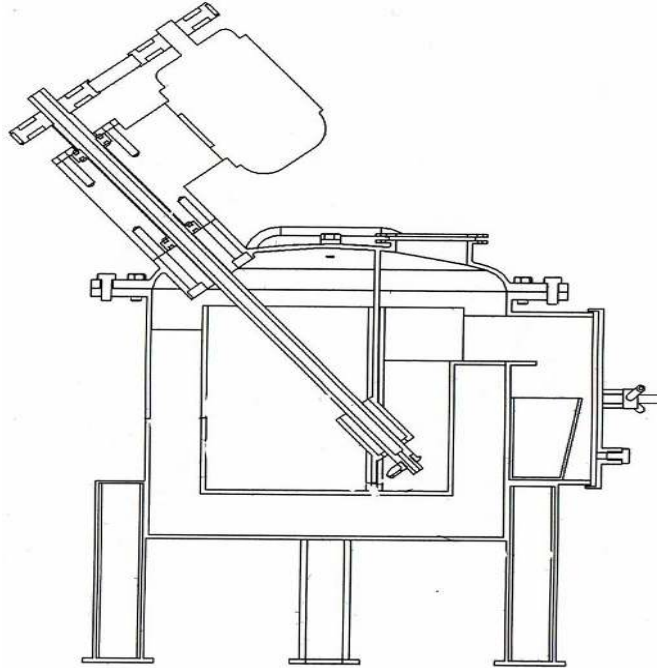
Köpük metal üretmek için deney düzeneği tasarlanarak imal ettirilmiş, gerekli malzemeler temin edilerek, deneylere başlanılmış, problemler çözülerek kapalı hücreli alüminyum köpük metal üretilmiştir.

5.1.1 Deneylerde Kullanılan Cihaz ve Malzemeler

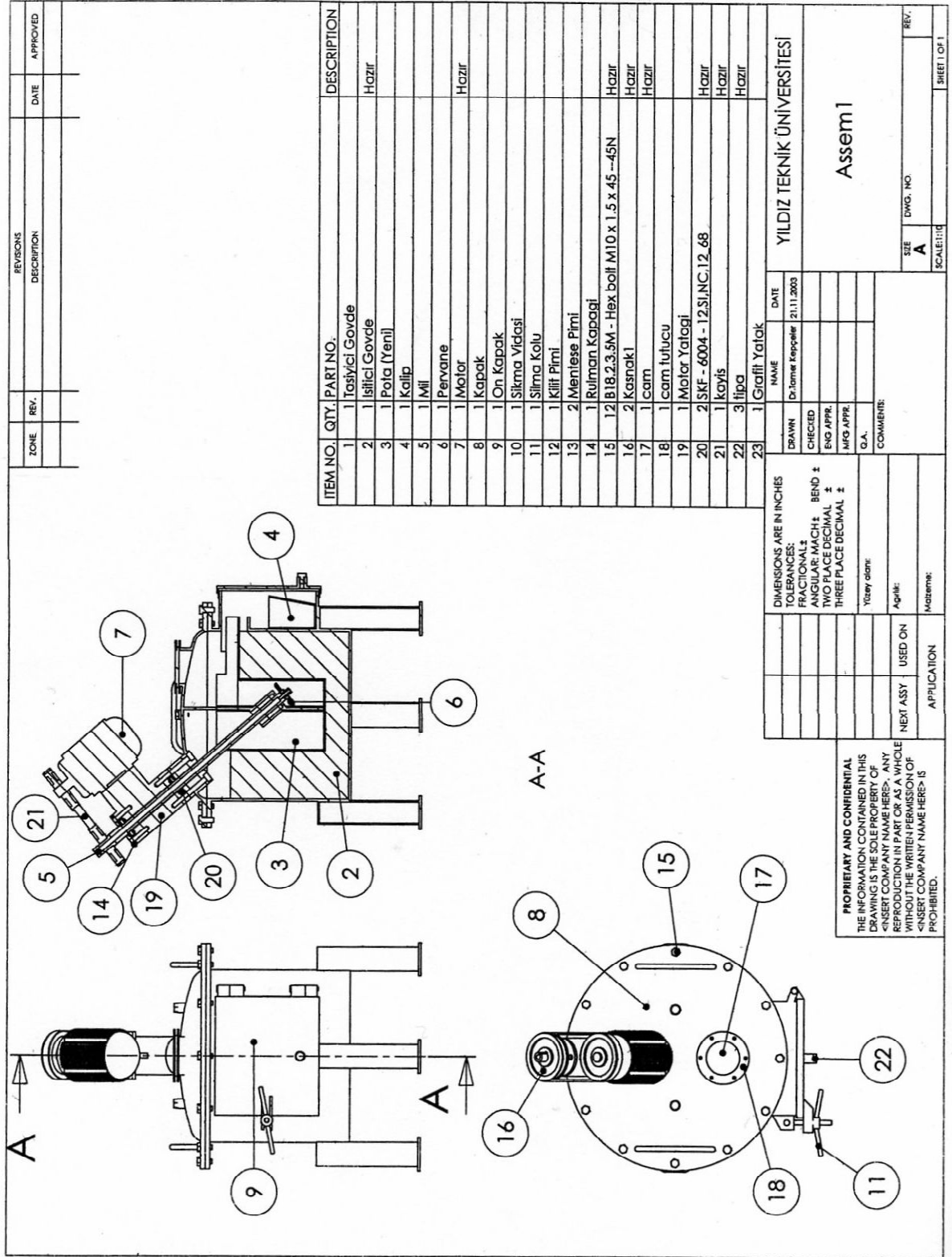
Deneylerde kullanılan cihaz ve malzemeler aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

5.1.1.1 Köpük Metal Üretim Makinesi

İlk olarak yönteme uygun makine tasarımı düşünülmüş ve düşünülen taslak üniversite bünyesi makine mühendisliği bölümünde dizayn edilip, teknik resmi çizilmiştir (Şekil 5.1, Şekil 5.2).



Şekil 5.1 Makinenin basit şematik resmi.



Şekil 5.2 Makinenin teknik resmi.

Daha sonra makine İstanbul'da bulunan Kasso makine imalat firmasına sipariş edilerek karşılıklı görüşmeler ve düzeltmelerle imal ettirilmiştir. Makinenin tamamında yüksek sıcaklığa dayanıklı AISI 310S paslanmaz çelik kullanılmıştır. Makinenin içinde döküm için kalıbı (Şekil 5.3) ve potası mevcuttur (Şekil 5.4).



Şekil 5.3 Döküm kalıbı.



Şekil 5.4 Döküm potası.

5.1.1.2 Fırın Tasarımı ve İmalatı

Makinenin içersinde alüminyum eritmek için bir ısıtma sistemine ihtiyaç vardır. Bunun için konusunda uzman bir tasarımcıdan yardım alınmış, makineye uygun özelliklerde ve istenilen sıcaklıklarda çalışılabilecek fırın tasarımı yapılmıştır. Fırın için özel tuğlalar dökülmüştür. Tuğla malzemesi olarak Süperateş Vibcast 190 malzemesi kullanılmıştır.

Bu malzeme %7-9 arası su ile karıştırılarak yarı-katı bir kıvamda daha önceden hazırladığımız kalıba, titreşim yardımıyla dökülmüştür.

1 gün beklendikten sonra tuğla çıkarılmıştır. Bu şekilde 6 adet tuğla dökülmüş ve en sonunda tuğlalar 1100°C’de 1-3 saat sinterlenerek hazır hale getirilmiştir. Şekil 5.5’de hazırlanmış bir tuğla görülmektedir. Direnç malzemesi olarak Kanthal kullanılmış ve sanayide hesaba uygun sardırılmıştır. Makinenin gövdesine direnç telleri ve termokupl için delikler açılmış ve metalle teması engellemek için deliklere seramik boncuklar yerleştirilmiştir.



Şekil 5.5 Fırın tuğlası.

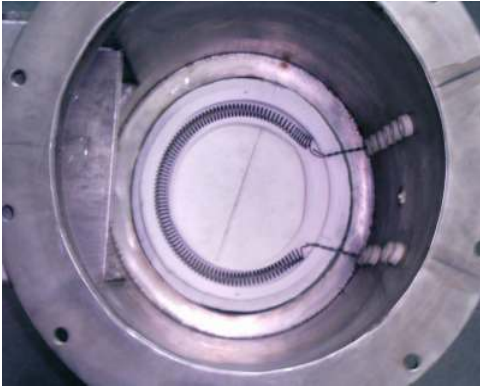
Daha sonra fırın imalatı yapılmıştır. Burada izlenen adımlar Şekil 5.6’da görülmektedir. İlk olarak makinenin tabanına refrakter tuğla döşenmiştir (a), daha önceden yapımı anlatılan tuğlaların içerisine dirençler tek tek yerleştirilir (b), dirençli tuğlalar fırına üst üste yerleştirilir (c, d), dirençler bağlantı yapılmak üzere fırın deliklerinden çıkarılır (e) ve termal battaniye fırın etrafına sarılarak yalıtım sağlanır (f). Son olarak elektrik bağlantıları yapılarak fırın çalışır hale getirilmiştir.



(a)



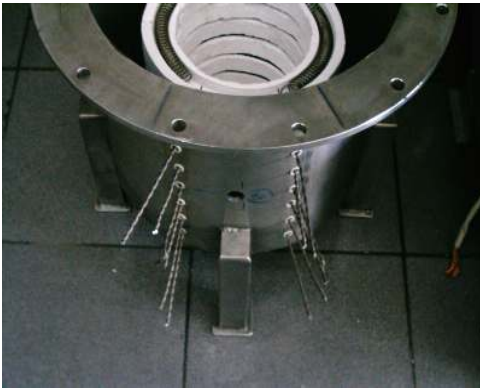
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 5.6 Fırın imalatının adımları.

Fırın dirençten sıcaklık alan termokupl ile kontrol edilmekte olup, panodan istenilen sıcaklık ayarı yapılmaktadır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Fırın sıcaklık kontrol ünitesi.

5.1.1.3 Kullanılan Alaşım

Alüminyum köpük metal üretmek için kullanılan alaşımlar literatürde taranarak, kullanmamız için en uygun olan alaşım olarak ETİAL - 160 belirlendi. Çizelge 5.1’de bu alaşımın bileşimi görülmektedir.

Çizelge 5.1 ETİAL-160’ın bileşimi (TMMOB, Metalurji Mühendisleri Odası ajandası).

Cu	Fe	Si	Zn	Mg	Ni	Ti	Mn	TSE
3.0-4.0	1.0	7.5-9.00	1.0	0.30	0.20	0.20	0.50	Al-Si8Cu3Fe

5.1.1.4 Kalıp Boyası

Kalıp boyası olarak “ZYP Coatings” marka bor nitrür esaslı malzeme kullanılmıştır.

5.1.1.5 Kararlaştırıcı Parçacıklar

Alüminyum köpük üretmek için gerekli olan kararlaştırıcı parçacık olarak SiC ve Al₂O₃ kullanıldı. Kullanılan SiC ve Al₂O₃ tanecik boyutu 23µ’ dur.

5.1.1.6 Karıştırıcı

İlk olarak kullanılan makinenin imalatında olan karıştırıcı kullanıldı. İçerisinden gaz akışı sağlanan karıştırıcı 1300 rpm’e kadar devir sağlıyordu.

Daha sonra sistem değiştirilerek elle karıştırma yapıldı, bunun için kullanılan karıştırıcı Şekil 5.8’de görölmektedir. Karıştırıcı pervane olarak her biri 4 cm uzunluğunda üç kanatlı pervane kullanıldı (Şekil 5.9).



Şekil 5.8 Mekanik karıştırıcı.



Şekil 5.9 Pervane.

5.1.1.7 Üfleme Gazı

Baloncuk oluşturmak için eriyiğe üflenerek gaz olarak soygaz olan Argon gazı kullanıldı. Argon gazı hortumla sisteme verildi. Daha sonraki sistemde çelik bir boruya hortumla bağlanarak elle eriyiğe daldırıldı, bu sistem Şekil 5.10’da görülmektedir.



Şekil 5.10 Gaz üfleme sistemi.

5.1.2 Deneyler

Deneylerin anlatımının ve anlaşılmasının kolaylaştırılması için deneylerin yapılışında takip edilen yol aşağıda özetlenmiştir:

1. Kalıbın ve potanın kalıp boyası ile boyanması.
2. Metalin eritilmesi.
3. Eriyiğe parçacık eklenmesi.
4. Karıştırma.
5. Gaz Üfleme.
6. Kalıbın çıkarılarak, ürünün havada soğutulması.

5.1.2.1 Deney Koşulları

Kullanılan deney düzeneği şekil 5.11 ve şekil 5.12’de görülmektedir.



Şekil 5.11 Alüminyum köpük metal üretiminde kullanılan deney düzeneğinin genel görünüşü



Şekil 5.12 Alüminyum köpük metal üretiminde kullanılan deney düzeneğinin üst görünüşü

Yapılan deneylerdeki parametreler Çizelge 5.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2 Deney koşulları

	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Deney 5
Karıştırma Süresi (dk.)	-	2	2	3	3
Gaz Üfleme Süresi (dk.)	1.5	1.5	2	3	3.5
Üfleç Derinliği(cm)	25	25	25	25	25
Kullanılan Parçacıklar	SiC %10	SiC %10	Al ₂ O ₃ %20	SiC %10	SiC %10
Çalışma Sıcaklığı (°C)	820	750	720	720	775

	Deney 6	Deney 7	Deney 8	Deney 9	Deney 10
Karıştırma Süresi (dk.)	5	7	10	15	20
Gaz Üfleme Süresi (dk.)	1.5	1.5	4	5	2
Üfleç Derinliği(cm)	25	25	25	25	25
Kullanılan Parçacıklar	SiC %12	SiC %13	SiC %15	Al ₂ O ₃ %20	SiC %17
Çalışma Sıcaklığı (°C)	730	735	740	745	750

	Deney 11	Deney 12	Deney 13	Deney 14	Deney 15
Karıştırma Süresi (dk.)	20	25	25	30	25
Gaz Üfleme Süresi (dk.)	5	6	4	3	2
Üfleç Derinliği(cm)	25	25	25	25	25
Kullanılan Parçacıklar	SiC %12	SiC %17	SiC %15	SiC %20	SiC %22
Çalışma Sıcaklığı (°C)	800	850	750	650	635

	Deney 16	Deney 17
Karıştırma Süresi (dk.)	35	20
Gaz Üfleme Süresi (dk.)	2	2
Üfleç Derinliği(cm)	25	25
Kullanılan Parçacıklar	SiC %20	SiC %17
Çalışma Sıcaklığı (°C)	610	585

5.1.2.2 Deney Sonuçları

Deney 1. Sonucu: İlk olarak eritilen metale % 10 oranında SiC ilave edildi. Daha sonra karıştırıcı döndürülmeye başlandı, fakat hız artırılınca karıştırıcı çalışmadı. Sisteme gaz üflenmesine karar verildi ve nozül yardımıyla gaz üflenerek taşan metal kalıpla birlikte dışarı çıkarılarak havada soğutuldu. Çıkan parça Şekil 5.13’de görülmektedir.



Şekil 5.13 Birinci deney sonucu.

Görüldüğü gibi köpükleşme olmamıştır. Bunun nedeni olarak karıştırıcının çalışmaması ve SiC parçacıklarının alüminyum tarafından ıslatılamamasıdır. Buna karşı önlemler alınarak ikinci deneye geçilmiştir.

Deney 2. Sonucu: İkinci deneyde karıştırıcının bozulmasından ötürü mekanik karıştırıcı ile karıştırma yapılmasına karar verildi. Bunun için kullandığımız karıştırıcı Şekil 5.8’de görülmektedir. Potaya uygun pervane yapılarak (Şekil 5.9) karıştırma 800 rpm’de 2 dk yapıldı, aynı anda gaz üflenerek SiC parçacıkların ıslatılmasına çalışıldı. Fakat yine SiC ıslatılamadı ve eriyik SiC içermediğinden gaz baloncukları hemen söndü ve köpükleşme olmadı (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 İkinci deney sonucu.

Deney 3. Sonucu: Kararlaştırıcı SiC parçacıkların ıslatılmasındaki zorluklar nedeniyle bu deneyde kararlaştırıcı olarak Al_2O_3 parçacıkların kullanılmasına karar verildi. % 20 oranında eriyiğe eklenerek karıştırıldı ve gaz üflendi, fakat bu deneyde de ıslatılma problemi yaşandı ve köpük metal elde edilemedi (şekil 5.14).



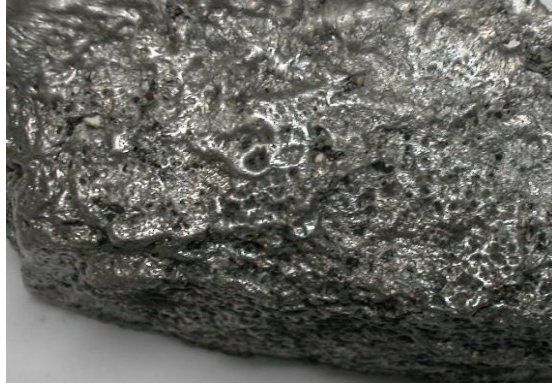
şekil 5.14 Üçüncü deney sonucu.

Deney 4. Sonucu: SiC tozların ön ısıtılarak sisteme katılmasına karar verildi. Bunun için SiC parçacıklar 250°C ön ısıtılarak katıldı ve karıştırılarak gaz üflemeden sonra alınan üründen görüldüğü gibi (şekil 5.15) karışma yine olmadı ve köpükleşme tam olarak sağlanamadı.



şekil 5.15 Dördüncü deney sonucu.

Deney 5. Sonucu: Bu deneyde SiC takviyeli alüminyum metal matrisi üretim çalışması yapıldı. Daha sonra dökülen bu parçalardan diğer deneylerdeki yöntemler uygulandı elde edilen üründen anlaşılacağı gibi SiC yeterince ıslanmadığı için köpükleşme sağlanamadı (şekil 5.17).



Şekil 5.17 Beşinci deney sonucu.

Deney 6. Sonucu: Bu deneyde karıştırma 800 rpm’de 5 dakika yapıldı, sisteme %12 oranında SiC verilerek kararlaştırma yapılmaya sağlandı, fakat istenilen düzeyde köpük metal üretilemedi. Bundan sonra yüksek basınçta gaz uygulanmasının faydası olmadığı anlaşılarak gaz üfleme basıncı düşürüldü.



Şekil 5.18 Altıncı deney sonucu.

Deney 7. Sonucu: Bu sefer karıştırma süresi biraz daha arttırılarak 7 dakikaya çıkarıldı, SiC tanecikler karışma eğilimi göstererek sonuçta gözenek oluştu fakat bu yine istediğimiz düzeyin çok altındaydı.



Şekil 5.19 Yedinci deney sonucu.

Deney 8. Sonucu: Karıştırma süresini artmasıyla SiC-Al karışımının daha iyi bir şekilde olduğu görülerek karıştırma süresi arttırıldı ve SiC oranı da biraz arttırılarak %15 olarak belirlendi, ayrıca üflecin derinliği azaltılarak 10 cm derinlikten gaz üflendi fakat köpük oluşuma olumsuz etki yaptığı fark edildi, sonuçta oluşan köpük kararlı kalmayarak baloncuklar kırıldı.



Şekil 5.20 Sekizinci deney sonucu.

Deney 9. Sonucu: Biraz daha fazla karıştırma yapılarak gözenek sayısının arttığı görüldü fakat gazın yapı içerisinde boşluk oluşturmada kaçtığı gözlemlenerek istenilen ürün elde edilemedi.



Şekil 5.21 Dokuzuncu deney sonucu.

Deney 10. Sonucu: Sic takviyesi olarak oran %17 olarak öngörüldü, 750°C’de sıvı alüminyuma eklenerek karıştırma 20 dakikaya çıkarıldı daha sonra 2 dakika argon gazı üflenerek yüzeyde oluşan baloncuklar kaba alındı, soğuduğu zamanki yapıda SiC taneciklerinin tam olarak karışmadığı tespit edildi.



Şekil 5.22 Onuncu deney sonucu

Deney 11 Sonucu: Bu deneyden sonra SiC takviyesiyle oynanmasına karar verildi ve değişik karıştırma oranları uygulanarak sonuçlar irdelendi.



Şekil 5.23 Onbirinci deney sonucu

Deney 12. Sonucu: İstedğimiz yapıyı elde etmek için gaz üfleme oranının yüksek olmasının bir etkisi olmadığı görülmekle birlikte daha az zamanda gaz üflemenin daha etkili olduğu anlaşılmıştır. Bu yüzden bundan sonraki deneylerde gaz üfleme zamanı düşürülmüştür.



Şekil 5.24 Onikinci deney sonucu

Deney 13. Sonucu: Çizelge 5.2'deki bilgilere göre deney yapıldı fakat sonuca ulaşamadı.



Şekil 5.25 Onüçüncü deney sonucu.

Deney 14. Sonucu: Çizelge 5.2'deki bilgilere göre deney yapıldı fakat sonuca ulaşılamadı.



Şekil 5.26 Ondördüncü deney sonucu

Deney 15. Sonucu: Sıcaklığın ve gaz basıncının azalması ile birlikte oluşan yapıda kararlı olan gözenekleri olduğu görüldü. Yapıdaki gözenekleri artırılması için daha düşük sıcaklık ve gaz basıncında çalışılmaya karar verildi. Ayrıca SiC taneciklerinin %10-18 arasında optimum düzeyde olduğuna karar verildi.



Şekil 5.27 Onbeşinci deney sonucu.

Deney 16. Sonucu: Alüminyum yarı-katı hale yaklaştıkça gaz kabarcıkları daha net görülmeye başlandı. Yapı soğutulduğu zaman hücrelerin kararlı bir şekilde kalabildiği görüldü. Böylece alüminyum yarı-katı bir haldeyken gaz üflenerek köpük metal üretilmesine karar verildi.



Şekil 5.28 Onaltıncı deney sonucu

Deney 17. Sonucu: Daha önce saptanan verilere dayanarak sisteme 1100°C’de ön ısıtılmış olarak verilen SiC tozlar öncelikle 775°C’de sıvı alüminyumla 800 rpm’de mekanik karıştırıcıyla 20 dakika karıştırıldı. Daha sonra sıcaklık likidüs sıcaklığının hemen altına-ETİAL 160 için yaklaşık 585°C- soğutularak yarı katı bir kıvamda tutuldu. Sisteme yarı-katı halde gaz üflendiği zaman köpürme olduğu gözle rahatlıkla görüldü tam bu esnada köpüren kısım gelberi yardımıyla kalıba çekildi ve suda hızlı soğutuldu. Sonuç incelendiği zaman oldukça yoğun gözenekli kapalı hücreli bir köpük metal yapısı elde edildiği görüldü.

Ayrıca ıslanabilme probleminin aşılması için çizelge 5.3’de gördüğümüz gibi temas açısının düşürülmesi amacıyla SiC sisteme 1100°C’de verilerek alüminyum-SiC karışımı sağlanabilmiştir. Bu durum tartışmalar bölümünde detaylı olarak irdelenmiştir.

Çizelge 5.3 Sıvı alüminyum ve çeşitli seramik parçacıkların arasındaki temas açıları (Hashim, vd., 2001).

Seramik Fazı	Sıcaklık (°C)	Açı, θ (°)
SiC	900	150
	1100	34
	1100	42
Al ₂ O ₃	900	90
	1100	70
	1100	8

Elde ettiğimiz köpük metal, şekil 5.29, 5.30, 5.31, 5.32’de görülmektedir. Elde edilen veriler ışığında alüminyum-SiC karışımına yarı-katı halde gaz üfleyerek köpük metal üretilebileceği anlaşılmıştır.

5.1.2.3 Üretilen Köpük Metalin Makroskobik İncelemesi

Üretilen köpük metalin makroskobik görüntülerinde oldukça boşluklu yapıya sahip olduğu açıkça görülmektedir.



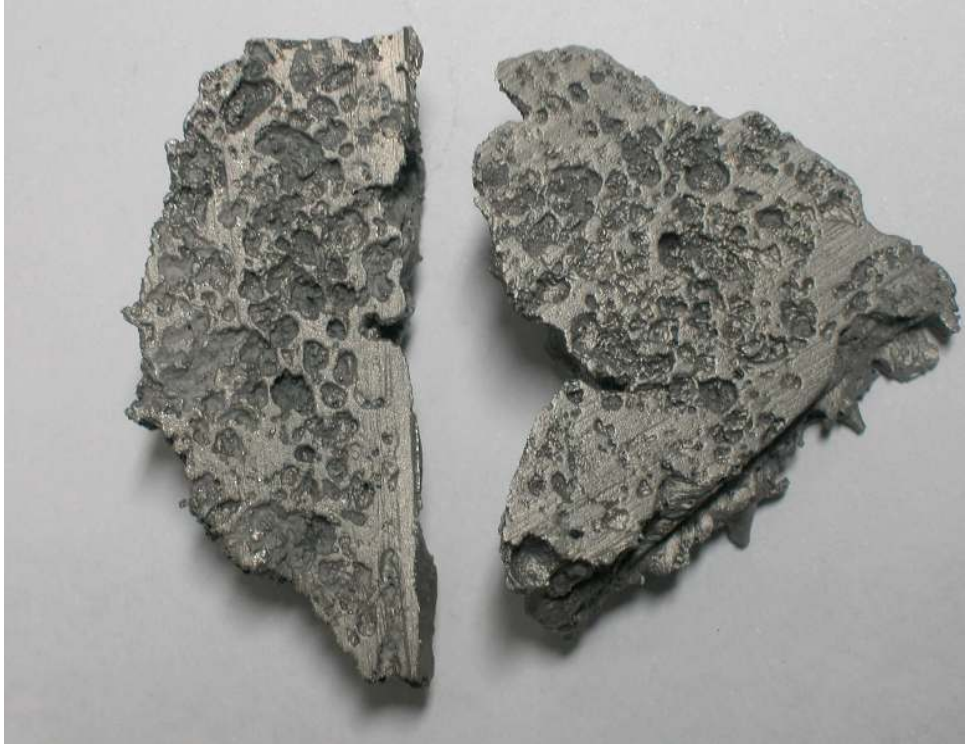
Şekil 5.29 Üretilen köpük metal



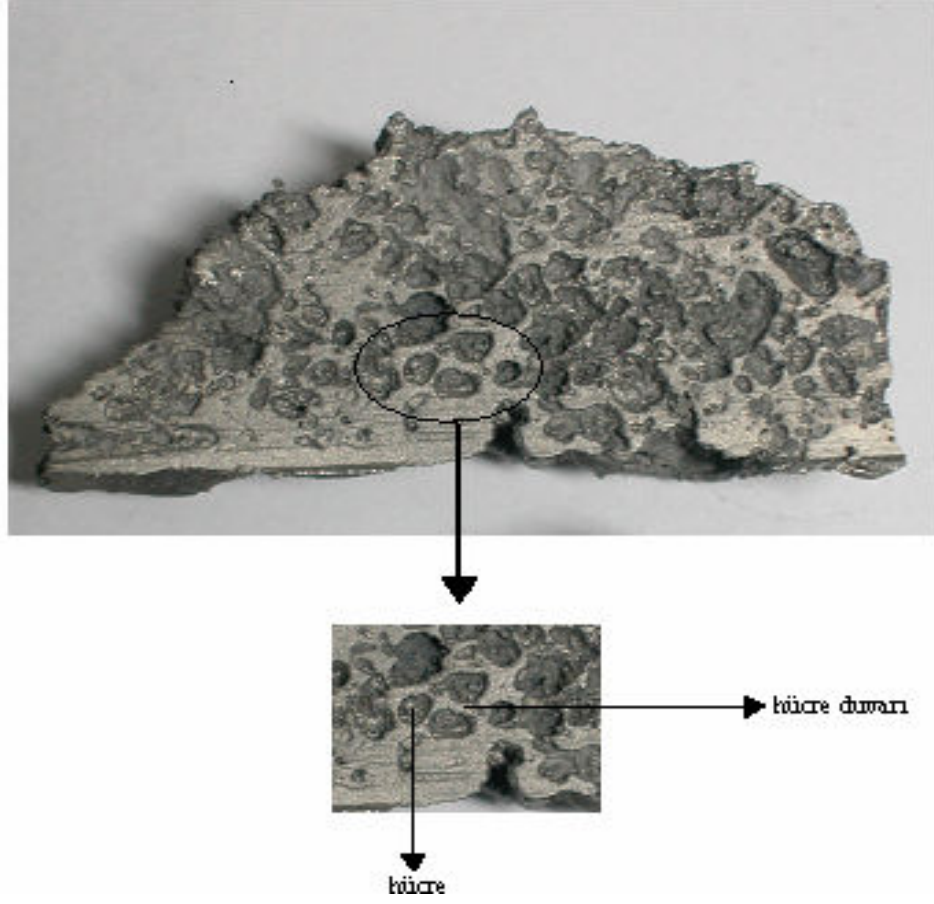
Şekil 5.30 Üretilen köpük metal



Şekil 5.31 Üretilen köpük metal



Şekil 5.32 Üretilen köpük metalin kesit görünüşü

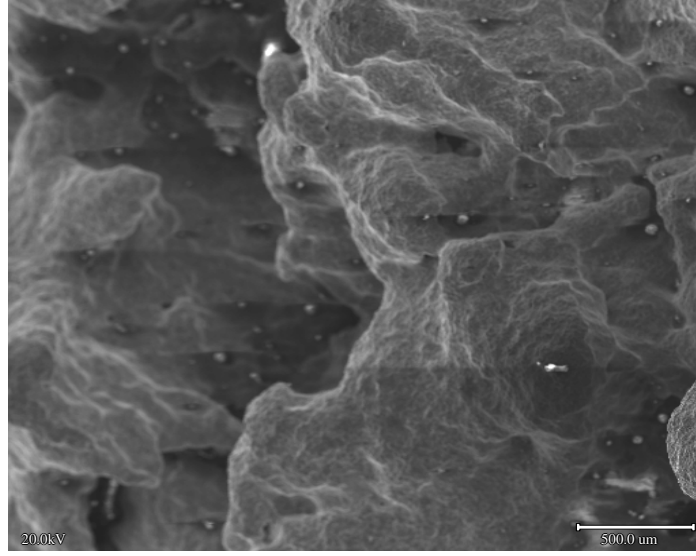


Şekil 5.33 Üretilen köpük metaldeki hücreler.

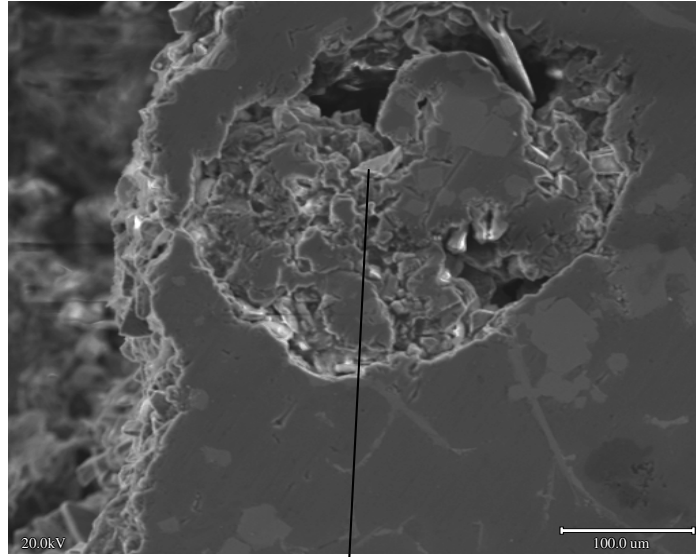
Şekil 5.33’de üretilen köpük metalin hücre yapısı görülmektedir. Görüldüğü gibi köpük metal yapısı hücrelerin yan yana gelmesiyle oluşmaktadır. Hücreler birbirinden hücre duvarlarıyla ayrılır.

5.1.2.4 Üretilen Köpük Metalin Mikroskopik İncelemesi

Üniversitemizde bulunan SEM ile çekilen görüntülerden boşluklu yapı açıkça görülmektedir.



Şekil 5.34 Elde edilen köpük metalin SEM görüntüsü (parlatılmamış).



boşluk

Şekil 5.35 Elde edilen köpük metalin SEM görüntüsü (parlatılmış).

5.1.2.5 Üretilen Kapalı Hücreli Köpük Metale Uygulanan Testler ve Sonuçları

Elde edilen numunemiz üniversitemiz bünyesinde bulunan laboratuvarlardaki cihazlarla çeşitli testlere tabi tutulmuş olup elde edilen sonuçlar aşağıdadır.

5.1.2.5.1 Sertlik Testi

Üretilen köpük metale üniversitemiz bünyesinde bulunan sertlik ölçme laboratuvarında uygulanan testler sonucunda köpük metalin 99 HV sertliğinde olduğu bulunmuştur. Etial 160 alaşımının da sertliği ölçülmüş ve sertliğinin 89 HV olduğu görülmüştür. Köpük metalin sertliğinin üretildiği alüminyum alaşımından daha yüksek olmasının nedeni kompozit bir yapıda olmasından kaynaklanmaktadır.

5.1.2.5.2 Gözeneklilik Oranı

Üretilen parçanın 1 cm² lik değişik alanları baz alınarak yapılan ölçümlerden sonra numunemizin % 64,33 gözenekliliğe sahip olduğu bulunmuştur.

5.1.2.5.3 Yoğunluk

Yoğunluk Archimades Prensibine göre hesaplanmıştır.

Havadaki Ağırlık = m_1

Sudaki Ağırlık = m_2

olmak üzere,

$$d = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (5.1)$$

Numunemizin ölçüm sonuçları;

$m_1 = 78,29$ g.

$m_2 = 36,10$ g.

Değerleri denklem 6.1’de yerine konursa;

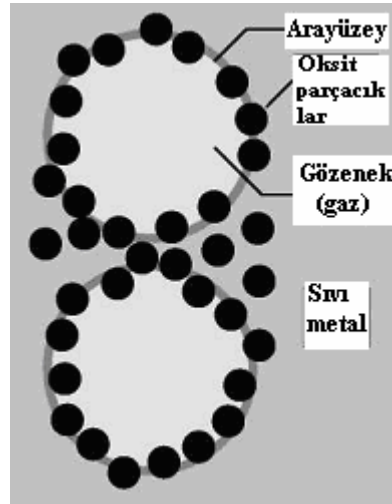
$$d = \frac{78,29}{78,29 - 36,10} = 1,85 \text{ g/cm}^3 \quad \text{olarak bulunur.}$$

5.1.2.5.4 Ortalama Gözenek Çapı

Numune yüzeyinde atölye mikroskobunda yapılan ölçümler sonucunda üretilen köpük metalin ortalama gözenek çapı 2,592 mm olarak bulunmuştur.

6. TARTIŞMALAR

Köpükler, doğası olarak yüksek serbest enerjilerinden dolayı termodinamik olarak kararsız yapıdadır. Bundan dolayı, “köpük kararlılığı” teriminden ima edilen sadece kinetik kararlılıktır. Köpük kararlılığı birbiriyle etkileşimli birçok faktöre bağlıdır (Ip vd., 1998). Bu faktörlere örnek olarak, hücre duvar kalınlığı, yüzey emilimi, yüzey devinimi, viskozite ve elastitise verilebilir. Köpük kararlılığı terimi hücre duvarlarında kırılma olmaması ve köpüğün drenajının sınırlandırılması manasına gelmektedir. Kırılma doğal olup, her zaman meydana gelebilecek bir olaydır (Babcsán vd., “baskıda”). Köpükler, köpük yüzeyinde tek katmanlı bir film oluşturan yüzeye aktif maddeler vasıtası ile kararlı hale getirilebilir. Bu katmanlar yüzey gerilimini azaltır, yüzey viskozitesini artırır ve elektrostatik kuvvetler (ayırılma kuvvetleri) oluşturarak köpük filmi çökmeden korur (Banhart, 2000a). Şekil 6.1’de katman oluşumu görülmektedir (Wübben vd., 2002).



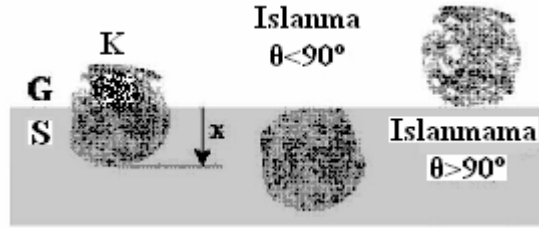
Şekil 6.1 Metalik olmayan parçacıkların metalik köpük içinde sıvı-gaz ara yüzeyinde katmanlar oluşması (Wübben vd., 2002).

Katı parçacıklar içeren sıvı köpük yapılarda köpük kararlılığı, gaz baloncuklarını ayıran ince filmin drenaj ve kırılmasına bağlıdır. Parçacıklar üzerindeki drenaj ve kırılma işlemine bağlı olarak, köpük kararlılığı artmakta veya azalmaktadır. Katı parçacıkların davranışının baş özelliği sıvı tarafından ıslanabilmeleridir. Islanabilme, genellikle katı ve sıvı yüzeyleri arasındaki temas açısıyla karakterize edilir. Parçacık boyutu, biçimi ve konsantrasyonu gibi diğer faktörler de köpük kararlaştırmada önemli rol oynarlar.

Deneylerde elde ettiğimiz sonuçlara göre SiC taneciklerin alüminyum tarafından ıslatılabilme problemi vardır. Köpük metal elde etmek için ilk olarak aşılması gereken problem ıslanabilmedir.

$$\gamma_{KG} = \gamma_{KS} + \gamma_{SG} \cdot \cos\theta \quad (6.1)$$

Burada γ_{KG} , katı-gaz; γ_{KS} , katı-sıvı; γ_{SG} , sıvı-gaz arasındaki yüzey enerjilerini ve $\cos\theta$ temas açısını ifade etmektedir.



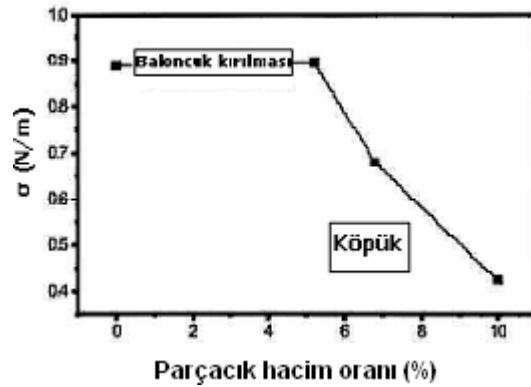
Şekil 6.2 Temas açısı (θ). Temas açısı $\theta < 90^\circ$ olduğunda sıvının katıyı ıslattığı söylenebilir , eğer temas açısı $\theta > 90^\circ$ ise ıslatma olmamaktadır, x ise batma derinliğini gösterir (Körner, 2005).

Sonuç olarak uygun derecede hidrofobik (temas açısı 40° - 70° arasına tekabül eden) parçacıklar kullanılarak en uygun köpük kararlılığı elde edilebilir. (Körner, 2005).

Çizelge 5.3'den görüldüğü gibi SiC taneciklerin sıcaklığı yükseldikçe temas açısı düşmektedir. Yukarıda bahsedilen ideal ıslatma için gerekli olan $\theta < 90^\circ$ temas açısı SiC taneciklerin 1100°C ısısında olmasıyla mümkün olmaktadır. Gerçekten de deney 17 sonucunda sisteme 1100°C 'de verilen SiC tanecikleri alüminyum tarafından ıslatılabilmiştir.

Sıvı alüminyum alaşım sistemine parçacıkların eklenmesi sıvı-metal ayrımının yüzey gerilimi düşürür. Yüzey gerilimi ile parçacık ilavesi arasındaki bağıntı Şekil 6.3'de görülmektedir.

Buradan da anlaşılaacağı üzere yüksek parçacık konsantrasyonu alüminyum köpüğü kararlı yapmaktadır (Babcsán vd., 2003).



Şekil 6.3 Yüzey gerilimi- σ - (N/m) ve parçacık hacim oranı (%) arasındaki ilişki (Babcsán vd., 2003).

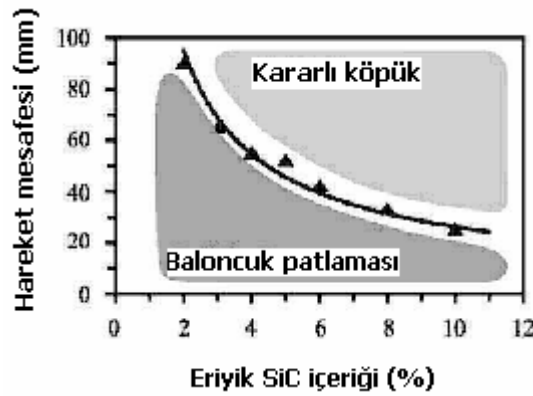
Katı parçacıklar tarafından köpüğün kararlı hale getirilmesinin uygun bir mekanizması da eriyik viskozitesini yükseltmesidir. Yüksek viskozitede sıvı akışı yavaşlayacak ve böylece film drenajının hızını düşecektir. Sonuçta köpük daha kararlı olacaktır. (Wübben vd., 2003).

Buradan anlaşılacağı gibi viskoziteyi yükseltmek yani sıvının akışkanlığını azaltmak köpükleri daha kararlı yapmaktadır. Bizim deneylerde bulduğumuz sonuç budur. Yarı-katı halde (yani düşük akışkanlıkta ve yüksek viskozitede) köpük yapı elde edilebilmiştir.

Normal yerçekimi koşulları altında oluşan katı metal köpük zamanla yarışmaktadır. Sıvı durumda olduğu zaman, çökme ve homojen olmayan bir yapı oluşturan drenajdan kaçınmak için, çabuk olarak soğutulmalıdır. Yerçekimi bundan dolayı düşman olarak görülebilir ve katı katkı malzemeleri kullanılarak bu durumdan kaçınılabılır (Wübben vd., 2003).

Direkt gaz üfleyerek üretilen köpük metal işleminde SiC parçacıkları eriyiğe eklenmektedir. Bu parçacıklar tipik olarak yaklaşık 10 μ m çapındadır ve hacim olarak %8-%20 arasında eklenmektedir (Banhart, 2000a).

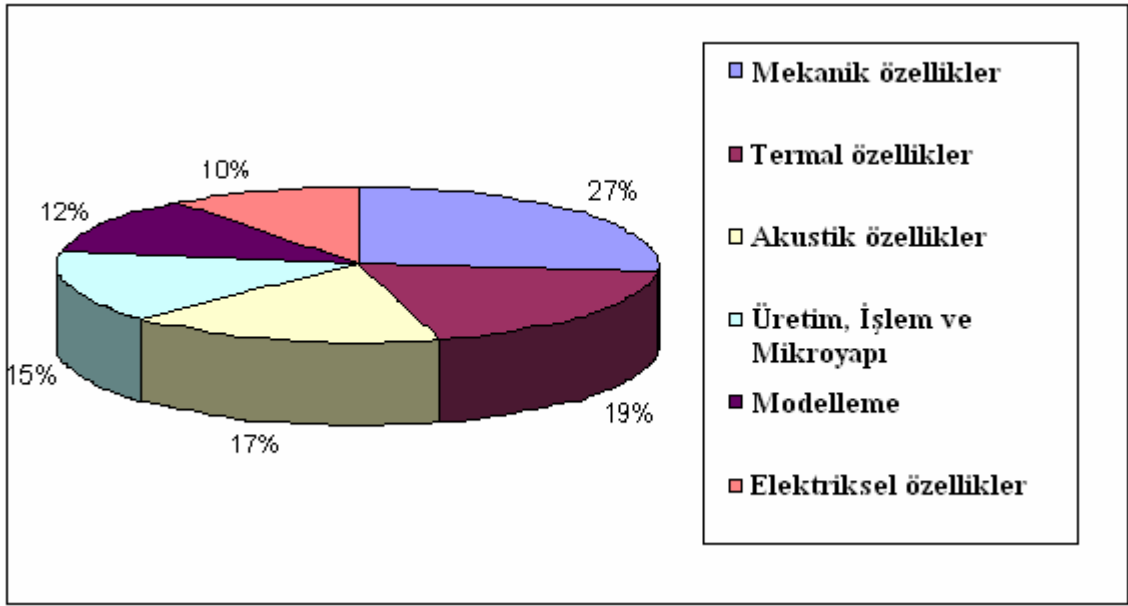
Bununla birlikte köpük kararlılığını etkileyen bir diğer faktör gaz üflemek için kullanılan üflecin eriyiğin içine daldırılma derinliğidir. Bu derinliğe bağlı olarak bazı sayıda parçacıkların çarpışması ve baloncuk tarafından toplanması söz konusudur. Bundan dolayı, yükselen baloncuklar ancak kritik yüzey kaplaması (parçacıklar ile) olduğu zaman kararlı olacaktır. Sonuçta, uzun baloncuk hareket yolu ve düşük kritik konsantrasyon, köpüğün karalaştırmak için gereklidir (Ip vd., 1998). Şekil 3.6'da SiC parçacık konsantrasyonu ile hareket mesafesi arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 6.4 SiC parçacık konsantrasyonu ile hareket mesafesi arasındaki ilişki (Leitlmeier vd., 2002).

Şekil 6.4'de görüldüğü üzere köpüklerin SiC içeriği ve hareket mesafesi arttıkça köpük kararlılığı da artmaktadır. Buna bağlı olarak, gaz üfleyici aletlerin düşük oranlarda eriyiğe batırılması eriyik yüzeyinde kararsız köpükler oluşturur ve sonuçta bu köpükler patlayıp, sönecektir. Yüksek seviyedeki baloncuk hareket mesafesi de kararlı baloncuk oluşumuna ve eriyikten ayrılabilmesine imkan verir. Deney 8'de de görüldüğü gibi üflecin daldırma derinliği 25 cm'den 10 cm'ye düşürüldüğünde oluşan köpüğün karalı kalmayarak kırıldığı tespit edilmiştir.

Alüminyum köpük metaller düşük özgül ağırlıkları, iyi mekanik özellikleri, iyi enerji emebilmesi gibi karakterlerinden dolayı oldukça popüler bir malzeme haline gelmiştir. Alüminyum köpük metallerin genel özellikleri aşağıda özetlenmektedir. Burada görülen pek çok iyi özelliklerden dolayı alüminyum köpük metaller gelecekte daha da artan bir oranda kullanım alanı bulacaktır.



Şekil 6.5 Köpük metallerin özellikleri [2].

6.1 Mekanik Özellikler

Köpük metaller düşük özgül ağırlıkları, düşük yoğunlukları gibi pek çok iyi mekanik özelliğe sahiptir. Bulduğumuz sertlik değeri (99 HV) köpük metalin yapıldığı alüminyumun sertlik değerinden (89HV) yüksek değerde olup bu da köpük metallerin yeterli derecede sağlam malzemeler olduklarını göstermektedir. Nitekim üretilen köpük metale uygulanan testlerde düşük yoğunluklu ve yüksek gözenekli bir yapı olduğu görülmüştür. Bunlara ilaveten köpük metaller aşağıdaki özelliklere de sahiptir.

6.2 Akustik Özellikler

Elde edilen örneğin boyutu akustik özelliklerin belirlenmesi için yeterli olmadığı için deney yapılamamıştır. Ancak köpük metallerin titreşim söndürücü, değişik frekanslarda ses emici, gürültü azaltıcı, elektromanyetik koruyucu özelliğinin olduğu bilinmektedir.

6.3 Termal özellikler

Gözenekli ve pöröz bir yapıda olduğu için, yüksek ısı kararlılık, ısı depolama, düşük ısı iletkenlik özelliklerine sahiptir (Grand ve Lord, 2000).

6.4 Diğer Özellikler

Plastik deformasyon esnasında yüksek enerji emilim, yanmama, geri dönüşümlü, iyi işlenebilir (Baumeister vd., 1997), dekoratif, atmosfer koşullarına dirençli, hafif olması önemli kullanım alanları sağlamaktadır (Körner ve Singer, 2000).

7. SONUÇ

Alüminyum malzeme ergitilerek katı fazda bulunan SiC ile bir taraftan boşluklu ve gözenekli bir yapı oluşturulurken, diğer taraftan da kompozit malzeme özelliklerini veren, mekanik özellikleri yükseltilmiş, ısıl kararlılığı artırılmış, yoğunluğu azaltılarak hafifletilmiş, gözenekli köpük metal üretimi laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Köpük metallerin yukarıda bahsedilen ve henüz ülkemizde üretimi sınırlı olan, birçok iyi özelliğinden dolayı tercih edilen alüminyum-SiC takviyeli köpük metal bu çalışma ile başarılmıştır. Ülkemiz açısından yeni bir araştırma alanına giriş yapılarak, gelecekte değerinin artacağı kabul edilen bu tür malzemelerin üretimine bir başlangıç olacaktır. Köpük metal üretim çalışmaları daha da geliştirilerek daha düşük yoğunluklu ve daha tekdüze hücre yapısına sahip köpük metaller üretilir. Bu çalışma sonunda:

1. Kapalı hücreli köpük metal üretimi için gerekli makine tasarlanıp imal ettirilmiş, fırın kısmı hesaplanıp üretilmiş ve gerekli deney düzeneği kurulmuştur.
2. Deneysel olarak sıvı faza getirilen alüminyum, SiC ile takviye edilerek argon gazı basıncı ile gaz boşluklarının oluşturulup büyütülmesi sağlanmıştır. Deneyler sonucunda kapalı hücreli köpük metal elde edilmiştir.
3. Kapalı hücreli köpük metalin karakterizasyon çalışmaları yapılmış olup, özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmıştır. Yapısal olarak gözenekler ölçülmüş ve ortalama 2,592 mm olduğu tespit edilmiştir.
4. Makro ve Mikroyapılar ışık ve elektron mikroskobu ile incelenmiş ve köpük metal yapısında olduğu görülmüştür.
5. Saf alüminyum ve alüminyum alaşımları düşük oranda katkı parçacıkları (SiC, Al_2O_3) içerdiğinde köpük oluşumu elde edilememiştir. Alüminyum alaşımları sadece kritik bir parçacık konsantrasyonu sağlandığında köpükleşmeye başlayacaktır. Kritik konsantrasyonun üzerinde alüminyum köpük yükseltisi, parçacık konsantrasyonun artmasıyla artmaktadır.
6. Artan sıcaklıkla köpük kararlılığı azalmaktadır. Daha düşük sıcaklıklarda yapılan deneyler daha başarılı olmuştur. Tekdüze dağılmış katı parçacıklar eriyiğin viskozitesini arttırmaktadır. Bu, sıvı metalin düşey hareketini ağırlaştırır ve köpük kararlılığı kinetiğine katkıda bulunmaktadır.

7. Islatma açısı (temas açısı) uygun olduğunda karalılık sağlanmaktadır, yüksek temas açısında (yetersiz ıslanma) ve düşük temas açısında (aşırı ıslanma) karalılık görülmemektedir. Temel olarak verilen sıcaklıkta seramik parçacıkların temas açıları bilindiğinde, parçacıklar en uygun kararlaştırma etkisinde seçilebilir.
8. Ayrıca açık ve kapalı hücreli köpük metalleri mukayese amacıyla açık hücreli bir köpük metal üretimi de yapılmıştır. Açık hücrenin elde edilmesindeki sıvı katı dönüşümünün denge koşulları mekanik, kinetik ve termodinamik olarak daha kolay kontrol edilirken, kapalı hücrede elde edilmesinin daha fazla değişkenin kontrol edilmesini gerektiği için üretim zorluklarının aşılması gereken önemli sorunlar içerdiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Amjad, S., (2001), "Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams" , A dissertation submitted for the degree of Master of Philosophy in Materials Modelling at the University of Cambridge.
- Ashby, M., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W. ve Wadley, H. N. G., (2000), "Metal Foams Design Guide", Short Course.
- Åsholt, P., (1999), "Aluminium Foam Produced by the Melt Foaming Route Process, Properties and Applications" Hydro Aluminium R&D Materials Technology, Sunndalsøra, Norway, 133-140.
- Babscán, N., Leitlmeier, D., ve Degischer, H. P., (2003), "Foamibility of Particle Reinforced Aluminium Melt", Mat.-Wiss. U. Werkstofftech., (34):22-29.
- Babscán, N., Leitlmeier, D., ve Banhart, J., "Metal Foams-High Temperature Colloids Part I. Ex Situ Analysis of Metal Foams", Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects "(baskıda)".
- Banhart, J., (2000a), "Manufacturing Routes for Metallic Foams", JOM, (12):22-27.
- Banhart, J., (2000b), "Properties and Applications of Cast Aluminum Sponges", Advanced Engineering Materials, (4):188-191.
- Banhart, J., (2001) "Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals And Metal Foams", Progress in Materials Science, (46):559-632.
- Banhart, J., ve Weaire, D., (2002) "On the Road Again: Metal Foam Find Favor", Physics Today, 37-42.
- Banhart, J., (2003), "Aluminium Foams for Lighter Vehicles", International Journal of Vehicle Design, 1-19.
- Banhart, J., (2004), "Industrialisation of Aluminium Foam Technology", 9th International Conference on Aluminium Alloys, 764-770.
- Baumeister, J., Banhart, J., ve Weber M., (1997), "Aluminium Foams for Transport Industry", Materials&Design (18):217-220.
- Baumgärtner, F., Duarte, I., ve Banhart, J., (2000), "Industrialization of Powder Compact Foaming Process", Advanced Engineering Materials, (4):168-174.
- Baron, J., (2000), "Aluminium Foam Technology Applied to Automotive Design", CYMAT.
- Elbir, S., Yılmaz, S., ve Güden, M., (1999), "Kapalı Hücreli Alüminyum Köpük Metallerin Üretim Metodları ve Mekanik Özellikleri", TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi,(120):35-42.
- Gergely, V., ve Clyne, B., (2000), "The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors", Advanced Engineering Materials, (4):175-178.
- Gergely, V., ve Clyne, T. W., ve Degischer, H. P., "Recycling of MMC and Production of Metallic Foams".

- Gergely, V., ve Clyne, T. W., "Drainage in Standing Liquid Metal Foams:Modelling and Experimantal Observations" *Acta Materilia*, "(baskıda)".
- Güden, M., Yılmaz, S., Elbir, S., (2001), "Kompozit Alüminyum Köpük Malzemesinin Hazırlanması ve Mekanik Özelliklerinin Karakterizasyonu" Proje No: MİSAG-135.
- Hashim, J., Looney, L., ve Hashmi, M. S. J., (2001), "The Wettability of SiC Particles by Molten Aluminium", *Journal of Materials Processing Technology*, (119):324-328.
- Haydn, N. , Wadley G., (2002), "Cellular Metals Manufacturing", *Advanced Engineering Materials*, (10):726-733.
- Ip, S. W., Wang, Y., ve Toguri, J. M., (1998),"Aluminum Foam Stabilization by Solid Particles", *Canadian Metallurgical Quarterly*, (38):81-92.
- Kennedy, A. R., (2002), "The Effect of TiH_2 Heat Treatment on Gas Release and Foaming Al- TiH_2 Preforms", *Scripta Materilia* (47):763-767.
- Körner, C., ve Singer, R. F., (2000), "Processing of Metal Foams-Challenges and Opportunities", *Advanced Engineering Materials*, (4):159-165.
- Körner, C., ve Singer, R. F., Arnold, M., (2005) "Metal Foam Stabilization by Oxide Network Particles", *Materials Science and Engineering*, A 396, 28-40.
- Leitlmeier, D., Degischer, H. P., ve Flankl, H. J., (2002), "Development of a Foaming Process for Particulate Reinforced Aluminium Melts", *Advanced Engineering Materials*, (10):735-740.
- Lord, J., ve Grant, P., (2000), "Review of Industrial Survey on Metallic Foams".
- Lu, T. J., Stone, H. A., Ashby, ve M. F., (1997), "Heat Transfer in Open-Cell Metal Foams", *Acta Materialia*,(46):3619-3635.
- Ma, L., ve Song, Z., (1998), "Cellular Structure Cntrol of Aluminium Foams During Foaming Process of Aluminium Melt", *Scripta Materialia*, (39):1523-1528.
- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., ve Kitahara, A., (2000), "ALPORAS Aluminium Foam: Production process,Prpperties, and Applications", *Advanced Engineering Materials* (4):179-183.
- Patrick, K., (2000), "Ultra-Light Aluminium Foam Materials Offer Advantages in Automotive Applications", *Idustrial Heating*, 35-36.
- Prakash, O., Sang, H., Embury, J. D., (1995), "Structure and Properties Al-SiC foam", *Materials Science and Engineering*, A199, 195-203.
- Song, Z. L., Zhu, J. S., Ma, L. Q., He, D. P., (2001), "Evoluion of Foamed Aluminium Structure in Foaming Process", *Materials Science and Engineering*, A298, 137-143.
- Wood, J. T., "Production and Application of Continuously Cast, Foamed Aluminium", *CYMAT*.
- Wübben, Th., Stanzick, H., Banhart, J., ve Odenbach, S., (2003), "Stability of Metallic Foams Under Microgravity", *Journal of Physics:Condensed Matter* (15): 427-433.

Yu, C. J., Eifert, H., Banhart, J., ve Baumeister, J., (1998), “Metal Foams”, Advanced Materials&Processes, 45-47.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] <http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/people/dave/dave.html>

[2] http://www.npl.co.uk/materials/metal_foams/index.html

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 22.01.1978

Doğum yeri Zonguldak

Lise 1992-1995 Kdz. Ereğli Endüstri Meslek Lisesi

Lisans 1996-1998 Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fak.
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü1998-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme
Mühendisliği Bölümü (Yatay Geçiş)Yüksek Lisans 2002-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji Müh. Anabilim Dalı, Malzeme Programı**Çalıştığı kurumlar**

2001-2002 MİGROS Türk A. Ş.

2002-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi