

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOLU KALIBA DÖKÜM YÖNTEMİ İLE HÜCRESEL
METAL ÜRETİMİ**

Metalurji Müh. Ateş ÜSTER

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KISALTMA LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. HÜCRESEL METALLER	2
2.1 Hüreseller Metallerin Sınıflandırılması	4
2.1.1 Kapalı Hücreli Hücresel Metaller	4
2.1.2 Açık Hücreli Hücresel Metaller	6
2.1.3 Hücresel Metallerin Metal Dizilimlerine Göre Sınıflandırılması	8
3. HÜCRESEL METAL ÜRETİM YÖNTEMLERİ	9
3.1 Hücresel Metal Üretiminde Sıvı Faz Prosesleri	11
3.1.1 Sıvı Eriyiklerden Direkt Olarak Hücresel Metal Üretimi	12
3.1.1.1 Gaz Üfleme Yöntemi İle Hücresel Metal Üretimi	12
3.1.1.1.1 Gaz Üfleme Yöntemi İle Hücresel Metal Üretiminin Avantaj ve Dezavantajları	14
3.1.1.2 Köpükleştirici Ajanlar Yardımıyla Hücresel Metal Üretimi	14
3.1.1.2.1 Köpükleştirici Ajanla Hücresel Metal Üretiminin Avantaj ve Dezavantajları	16
3.1.2 FORMGRIP Yöntemi İle Hücresel Metal Üretimi	16
3.1.3 Sıkıştırılmış Tozlardan Hücresel Metal Üretimi	18
3.1.3.1 Sıkıştırılmış Tozlar İle Hücresel Metal Üretiminin Avantaj ve Dezavantajları	21
3.1.4 Gaz - Katı Ötektikleri İle Hücresel Metal Üretimi	21
3.1.5 Döküm İle Hücresel Metal Üretimi	22
3.1.5.1 Polimer Köpüklerle Yapılan Hassas Döküm İle Hücresel Metal Üretimi	22
3.1.5.2 Boşluk Tutucu Malzemelerin Etrafına Hassas Döküm	24
4. KULLANIM ALANLARI VE UYGULAMALAR	25
4.1 İnşaat Sektöründe	25
4.2 Otomotiv Endüstrisi	26
4.3 Havacılık ve Uzay Sanayi	28
4.4 Gemi İnşaa Endüstrisi	29
4.5 Ses İzolasyonu	30
4.6 Farklı Alanlarda Kullanılan Hücresel Metal Ürünler	30
4.7 Hücresel Metal Üreticileri	32

5.	DOLU KALIBA DÖKÜM YÖNTEMİ.....	33
5.1	Döküm Yöntemlerinin Kalıp Tiplerine Göre Sınıflandırılması.....	33
5.2	Dolu Kalıba Döküm Prosesleri.....	34
5.2.1	Dolu Kalıba Döküm Tarihçesi.....	34
5.2.2	Dolu Kalıba Döküm Yönteminin Esasları.....	36
5.2.3	Köpük Model Üretimi.....	38
5.2.4	Polistiren Bloklardan İşleme Yoluyla Model Yapımı	42
5.2.5	Polistiren Modellerin Kaplanması ve Modelin Kumla Desteklenmesi	43
5.2.6	Döküm Prosesi.....	45
5.3	Dolu Kalıba Döküm Yönteminin Avantajları.....	46
5.4	Kullanım Alanları	47
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	48
6.1	Deneylerde Kullanılan Cihaz ve Malzemeler.....	48
6.1.1	Polistiren Isı Yalıtım Levhaları	48
6.1.2	Dik Kesim Şablonu.....	49
6.1.3	Delme Şablonu.....	50
6.1.4	Sütunlu Matkap	51
6.1.5	Kaplama Boyası (Refrakteri).....	51
6.1.6	Yapıştırıcı	51
6.1.7	Polistiren Modellerin Kalıplanmasında Kullanılan Dereceler.....	51
6.1.8	Kum	51
6.1.9	Karıştırıcı	51
6.1.10	Titreşim Makinesi.....	52
6.1.11	İndüksiyon Güç Kaynağı (LEPEL)	52
6.1.12	Kullanılan Alaşımlar.....	53
6.2	DeneySEL Çalışmalar	53
6.2.1	Polistiren Küplerin ve Yolluğun Hazırlanması.....	54
6.2.2	Delme.....	54
6.2.3	Salkımın Oluşturulması	55
6.2.4	Refrakter İle Kaplama ve Kurutma.....	55
6.2.5	Yolluk Ağzı Hazırlama.....	56
6.2.6	Dereceye Yerleştirme	57
6.2.7	Yolluk Ağzının Konulması.....	57
6.2.8	İndüksiyon Ocağında Ergitme İşlemi	58
6.2.9	Döküm	58
6.2.10	Dökülen Parçaların Dereceden Çıkarılması.....	59
6.3	Deney Koşulları	60
6.4	Deney Numunelerinin İncelenmesi	61
6.4.1	% Ağırlık Değişimi (Dolu Malzeme - Hücresel Metal)	61
6.4.2	Basma Dayanımları	62
6.4.3	% Deformasyon	64
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	66
	KAYNAKLAR.....	68
	ÖZGEÇMİŞ.....	71

KISALTMALAR

Al	Alüminyum
Hg	Cıva
μ	Mikron
°C	Derece
mm	Milimetre
cm	Santimetre
m	Metre
MMC	Metal Matrisli Kompozit
gr/cm ³	Yoğunluk Birimi
TiH ₂	Titanyum Hidrat
Ca	Kalsiyum
Kg/m ³	Yoğunluk Birimi
PVD	Physical Vapor Deposition
CVD	Chemical Vapor Deposition
LCD	Dissociation in Solid
LBM	Powder Fiber Network
SiC	Silisyum Karbür
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
MgO ₂	Magnezyum Oksit
FORMGRIP	Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor
atm	Atmosfer birimi
USA	United State of America
BCACT	Balkan Center for Advanced Casting Technologies

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Süngerimsi insan kemiği ve Duocel Al. hücresel metal.....	1
Şekil 2.1	Hücresel metallerin gelişim senaryosu.....	3
Şekil 2.2	Hücre, hücre duvarı, hücre köşesi.	4
Şekil 2.3	Alporas Al. kapalı hücreli hücresel metal, Shinko Wire Company Ltd, Japonya.....	5
Şekil 2.4	Cymat Al. kapalı hücreli hücresel metal, Cymat Aluminium Corporation, Canada.	6
Şekil 2.5	Alcan Al. kapalı hücreli hücresel metal, Alcan International Ltd., Kingston, ON, Canada.....	6
Şekil 2.6	Recemat Al. açık hücreli hücresel metal, Recemat International BV, TheNetherlands.	7
Şekil 2.7	Duocel Al. açık hücreli hücresel metal, ERG Oakland, California, USA.....	7
Şekil 2.8	Dizilimlerine göre sınıflandırma.	8
Şekil 2.9	Rastgele ve periyodik dizilmiş hücresel metaller.....	8
Şekil 3.1	Hücresel metal üretim yöntemleri	9
Şekil 3.2	Hücresel metal üretim yöntemleri.	10
Şekil 3.3	Hücresel metal üretim yöntemleri	10
Şekil 3.4	Farklı üretim metotlarında oluşabilecek hücre boyutları ve yoğunluk aralığı	11
Şekil 3.5	Gaz üfleme yöntemi	13
Şekil 3.6	Gaz üfleme yöntemi	13
Şekil 3.7	Gaz üfleme yöntemi ile üretilmiş hücresel metal, Cymat. Yoğunluk: 0,3 gr/cm3..	14
Şekil 3.8	Köpükleştirici ajan yardımı ile hücresel metal üretimi, Alporas	15
Şekil 3.9	Köpükleştirici ajan yardımı ile üretilmiş hücresel metal Alporas.....	16
Şekil 3.10	FORMGRIP yöntemi ile hücresel metal üretimi.....	17
Şekil 3.11	FORMGRIP yöntemi ile üretilen hücresel metaller.....	17
Şekil 3.12	Toz metalurjisi ile üretilen hücresel metaller	18
Şekil 3.13	Toz metalurjisi ile hücresel metaller üretim yöntemleri	19
Şekil 3.14	Toz metalurjisi ve metal enjeksiyon yöntemi ile hücresel metal üretimi	20
Şekil 3.15	Toz metalurjisi ile üretilmiş hücresel sandviç metal.	20
Şekil 3.16	GASAR prosesi ile hücresel metal üretimi.	21
Şekil 3.17	GASAR prosesi ile üretilmiş hücresel metal.....	22
Şekil 3.18	Hassas döküm yöntemi ile hücresel metal üretimi.....	23
Şekil 3.19	Boşluk tutucular kullanarak hücresel metal üretimi.....	24
Şekil 4.1	Hücresel alüminyum sandviç panel.....	26
Şekil 4.2	Hücresel metal mimari çalışmaları, Cymat.	26
Şekil 4.3	Audi A8'in hücresel metallerle güçlendirilme dizaynı.	27
Şekil 4.4	Alüminyum hücresel panelden yapılmış hidrolik kol.	27
Şekil 4.5	Darbe emici çarpışma kutuları.	27
Şekil 4.6	İçleri Al hücresel metallerle doldurulmuş darbe emici çarpışma kutuları.	28
Şekil 4.7	AMS-02 uydularda koruyucu panel olarak TRD Duocel alüminyum hücresel metaller kullanılmıştır.	28
Şekil 4.8	Uzay mekiklerinde ana taşıyıcı gemiden ayrılma sırasında enerji absorblayıcı olarak hücresel metaller kullanılmaktadır	29
Şekil 4.9	F 22 Savaş uçaklarında ani irtifa değişikliklerinde basınç değişimlerini kontrol eden havalandırıcılar, elektromanyetik dalgaları önleyicileri ve nem tutucular alüminyum hücresel metalden üretilmiştir.....	29
Şekil 4.10	Hücresel alüminyum susturucular, metro tünelleri, otoyol izolasyonu.....	30

Şekil 4.11 Hücresel alüminyum eşanjörler.....	30
Şekil 4.12 Hücresel alüminyum kalkanlar.....	31
Şekil 4.13 Pinomatik araçlarda kullanılan ses önleyicileri ve dinleme cihazlarında rüzgar sesini absorbe eden hücresel Alüminyum.....	31
Şekil 4.14 Raylı sistemlerde kullanılan darbe emiciler.....	32
Şekil 4.15 Hava yağ ayrıştırıcıları.....	32
Şekil 5.1 Çoklu döküm için üretilen salkım (ağaç).....	36
Şekil 5.2 Dolu kalıba döküm prosesleri.....	37
Şekil 5.3 Polistiren köpüğün hazırlanması.....	40
Şekil 5.4 Polistiren model üretiminde kullanılan kalıplar.....	41
Şekil 5.5 Polistiren model ve üretilen metal parça.....	41
Şekil 5.6 Polistiren model.....	42
Şekil 5.7 Kaplama ve kum boyutuna bağlı olarak ilerlemenin incelenmesi.....	44
Şekil 5.8 Polistiren modellerin kaplaması.....	44
Şekil 5.9 Metalin polistiren boyunca ilerlemesi.....	45
Şekil 5.10 Polistiren modellerin derece içerisine kumla yerleştirilmesi.....	45
Şekil 6.1 Polistiren levhalar.....	48
Şekil 6.2 Polistiren tane çapları.....	49
Şekil 6.3 Dik kesim şablonu.....	49
Şekil 6.4 Şablon tasarımı.....	50
Şekil 6.5 Üstü ve altı açılabilen sac delik şablonu.....	50
Şekil 6.6 Refrakter çamurunun su ile karıştırılması için kullanılan karıştırıcı.....	52
Şekil 6.7 Titreşim makinesi.....	52
Şekil 6.8 İndüksiyon güç ünitesi ve pota.....	53
Şekil 6.9 Boyutlandırılmış polistiren.....	54
Şekil 6.10 Delinmiş polistiren bloklar.....	55
Şekil 6.11 Yolluğa sabitlenmiş iki adet hücresel metal modeli.....	55
Şekil 6.12 Refrakter boya ile kaplama ve kurutma.....	56
Şekil 6.13 Kurumuş hazır harcanabilir model.....	56
Şekil 6.14 Yolluk ağzı üretimde kullanılan model ve üretilen yolluk ağızları.....	57
Şekil 6.15 Derece içerisine yerleştirilmiş model.....	57
Şekil 6.16 Yolluk ağzının yerleştirilmesi.....	58
Şekil 6.17 Ergitme işlemi.....	58
Şekil 6.18 Ergimiş alüminyum ve döküm.....	59
Şekil 6.19 Dökülen parçalar.....	59
Şekil 6.20 Yolluğundan alınmış parçalar.....	59
Şekil 6.21 6063 ve Etial – 140 numuneler.....	60
Şekil 6.22 Deney 5 eksik döküm.....	61
Şekil 6.23 6063 ve Etial-140 basma testleri.....	63
Şekil 6.24 Etial - 140 numuneler basma deneyleri sonrasında kırılan numuneler.....	63
Şekil 6.25 Basma deneyleri sonrasında numuneler.....	64

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1	Gaz üfleme yoluyla üretilen hücresel metallerde kullanılan tipik alaşım ve parçacıklar.	13
Çizelge 5.1	Kullanılan alüminyum üretim prosesleri.	35
Çizelge 5.2	Polistiren tanelerinin şişirme öncesi ve sonrası tane boyutu ve kullanım alanı. ..	38
Çizelge 5.3	Döküm alaşımlarına göre kullanılacak polistiren yoğunluğu.	39
Çizelge 5.4	Kullanım alanları.	47
Çizelge 6.1	Polistirenin fiziksel ve kimyasal özellikleri.	49
Çizelge 6.2	Polistiren modelin kaplanması için kullanılan polytop FS 6' nın özellikleri.	51
Çizelge 6.3	Etial 140 kimyasal bileşimi.	53
Çizelge 6.4	Etial 60 kimyasal bileşimi.	53
Çizelge 6.5	Deneyler.	60
Çizelge 6.6	Ağırlık değişimi %.	62
Çizelge 6.7	Basılan numunelerin % deformasyonları.	65

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında bana yol gösteren ve büyük destek veren danışmanım Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM'e yürekten teşekkür ederim.

Gerek deneysel, gerek araştırma çalışmalarım sırasında benden yardımını hiç bir zaman esirgemeyen, Balkan İleri Döküm Teknolojileri Merkezi'nde çalışan araştırma görevlisi Kerem Altuğ GÜLER'e, yine araştırma ve testler sırasında bana yardımcı olan Gökhan ÖZER, Zeynep TAŞLIÇUKUR ve teknisyen Şaban CEYLAN'a sonsuz teşekkürler.

Ayrıca, çalışmalarımın başlangıcında bana umut veren ve destek olan Doç. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Sabırla beni destekleyen eşim Esin Aydın ÜSTER'e

ÖZET

Hücresel Metallerin karakteristik özellikleri olan ve onları diğer malzemelerden ayıran düşük yoğunluklarıdır. Düşük yoğunluklarına karşılık sıra dışı fiziksel, mekanik, termal, akustik ve elektriksel özellikler göstermektedirler.

Hücresel metaller boşluklar içermelerine rağmen dolu yapılarla kıyaslandıklarında tek bir dolu malzemenin ihtiva edemeyeceği birkaç farklı özelliği tek başlarına barındırarak ön plana çıkmaktadır.

Hücresel metaller çok çeşitli üretim metotları kullanılarak üretilmektedir. Günümüzde hücresel metal üretimi için birçok yeni yöntem geliştirilmeye çalışılmaktadır. Çalışmada sıvı eriyiklerden elde edilen hücresel metallerden bahsedilmiş, diğer yöntemler detaylandırılmamıştır.

Dolu kalıba döküm erimiş metalin polistiren köpük modeli buharlaştırma esasına dayanan, hassas döküm yönteminin proses aşamalarını kolaylaştıran, birçok farklı geleneksel yöneme de alternatif olabilecek bir yöntemdir.

Çalışmada teorik olarak hücresel metallerin üretim yöntemleri ve dolu kalıba döküm yöntemi incelenmiş olup, açık hücreli alüminyum hücresel metal numuneleri dolu kalıba döküm yöntemi ile üretilerek, üretilen numunelerin dolu hacimlere göre ağırlık farkları, basma dayanımları ve deformasyon oranları hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Metalik köpük, kapalı hücre, açık hücre, hücresel metal, dolu kalıba döküm, kaybolan kalıp tekniği, polistiren,

ABSTRACT

Cellular metals differ from the other materials with low density which is their characteristic property. Besides their low density they show unusual physical, mechanical, thermal, acoustic and electrical properties.

Even though they have lots of pores, when cellular materials compared with solid materials they can show a unique combination of several properties that can not be obtained in one conventional material at the same time.

There are several kinds of production methods for cellular materials. Nowadays there are lots of researches done for new production methods. In this study especially the production of cellular metals from molten metal methods described.

Lost foam process which basis on evaporating the polystyrene foam model reduces the process steps of investment casting and can be an alternative method to many production methods.

In this study process methods for cellular metals are studied theoretical and open cell aluminum produced with lost foam method. After production weight differences, % deformations and stiffness volumes are calculated.

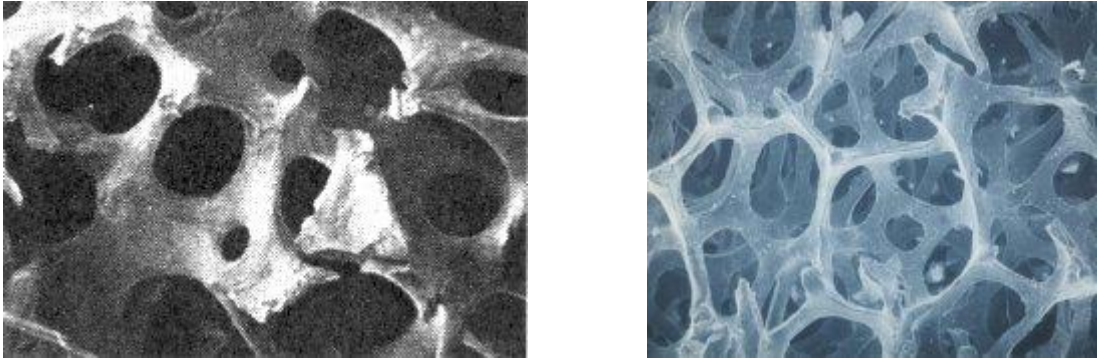
Keywords: Metallic foam, closed cell, open cell, cellular metal, lost foam, polystyrene

1. GİRİŞ

Boşluk sınırları çizilmiş ve içinde bir şey olmayan bir hacim veya uzaysal sınırlara sahip olan bir hacim olarak nitelendirilebilir. Ancak boşluğu dizayn etmek veya boşlukları yönlendirerek şekil vermek için yüksek teknolojiye ve bilgiye ihtiyaç bulunmaktadır. (Zhao, 2006)

Bünyesinde boşluklar içeren malzemelerin yalıtımda, paketlemede veya filtrelemede kullanıldığı birçok kişi tarafından bilinmektedir ancak çok az kişi boşlukların yapısal (strüktürel) uygulamalarda kullanılabileceğine dair bilgi sahibidir. Üzerine yük binen parçalar içerisindeki boşluk (porozite) oranını düşürmek için yapılmış ve yazılmış binlerce çalışma ve makale bulunmaktadır. Mühendisler bir üretim hatası gibi nitelendirdiği bu boşlukları döküm parçalarda, toz metalurjisi ile üretilmiş parçalarda, kaynak bölgelerinde ve hatta kaplamalarda engellemek amacı ile birçok teknik geliştirmiştir. Bu bağlamda yük altında bulunacak yapılarda boşluk bulunması fikri mühendisler için algılaması güç bir durum oluşturmuştur. Ancak doğa örnek alınacak olduğunda yüke maruz kalan büyük doğal yapılar boşluk içermektedir hatta bazıları büyük olarak nitelendirilecek boşluklara sahiptir. Kemik, ahşap ve mercanlar iyi birer örnektir. (Degischer ve Kirstz, 2002)

İnsan kemiği ile Duocel Al. arasındaki benzerlik Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Süngerimsi insan kemiği ve Duocel Al. hücresel metal [1]

Dolu kalıba döküm yöntemi ise harcanan model tekniklerinden biri olan ve ergimiş metalin köpük modeli buharlaştırması esasına dayanan bir döküm yöntemidir. Harcanacak model genellikle hacmi genişletilmiş polistirendir. Bu model refrakter bir malzeme ile kaplanarak bir metal derece içerisine yerleştirilir. Etrafı serbest kuru kum ile beslenir. Vibrasyon yardımı ile sıkıştırılan kumun içerisinde bulunan polistiren model üzerine direkt olarak döküm yapılmaktadır. Hızla buharlaşan polistiren modelin yerini metal alır. (Caulk, (2006); ASM Handbook, 1998)

2. HÜCRESEL METALLER

Hücresel metal, köpük metal veya metalik köpük olarak nitelendirilen bu malzemelere ilgi ilk 1943 yılında Benjamin Sosnick'in aldığı patent ile artmıştır. Sosnick, Al ve Hg karışımını kapalı bir hücrede basınç altında ergiterek, cıvanın alüminyumun ergime derecesinden düşük olan buharlaşma derecesinden yararlanarak ilk köpük metali elde etmiştir.

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. Bu çalışmayı William Elliott ve Stuart Fiedler Amerikan donanması için ortak yürütmüşlerdir.

1959'da ise United Aircraft Corporation tarafından patenti alınan tamamen farklı bir yöntem geliştirilmiştir. Toz halde bulunan metal yine toz halde bulunan gaz yapıcı madde ile karıştırılır. Bu karışım, metalin ergime sıcaklığına ısıtıldığında gaz salıcı madde ayrılarak çözünür ve büyük miktarda gaz salarak köpük yapıyı oluşturur. Bu toz karışımı, soğuk olarak sıkıştırılmış ve ekstürüde edilmiştir. Bu sayede metal ve gaz yapıcı tozlara katı bir hal verilir. Bu katı yapı metalin ergime sıcaklığına ısıtıldığında gaz yapıcı madde çözünerek sıvı metale gaz salar. Metal köpük yapıyı oluşturur. Gaz yapıcı olarak metal hidritler kullanılmıştır. (Banhart ve Weaire, 2002)

Bir diğer patent olan köpürtücü ajanları direkt olarak yarı eriyik haldeki metale ekleme yöntemi 1967 yılında Hardy ve Peisker tarafından alınmıştır. Bu yöntem toz temelli üretime göre daha ucuz bir maliyete sahipti. Çalışmada farklı olarak viskoziteyi arttırmak ve yapıdaki dağılan gazı yakalamak için eriyik alüminyuma silisli bir malzeme ilave edildi. Ayrıca köpürtücü ajan olarak metal hidritler kullanmak yerine hidrat killeri kullanıldı.

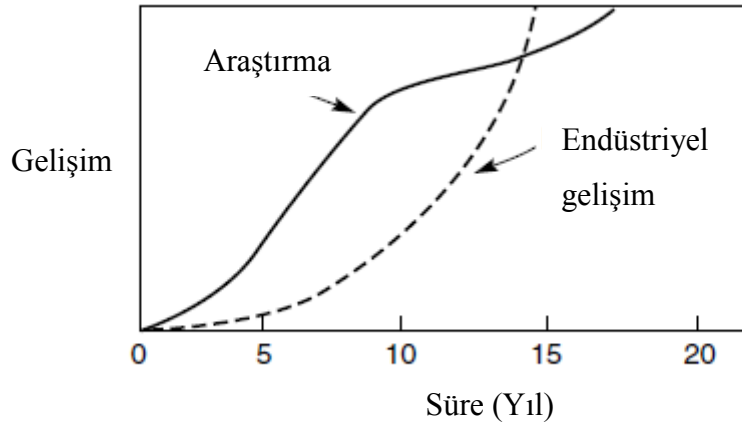
Eriyik temelli üretim yöntemleri ticari olarak üretilen köpük metallere egemen olmuştur. Bir çok şirket metalik köpük üretmeye başlamıştır "ALPORAS" adıyla bilinen alüminyum esaslı köpük metal üretimini bir Japon firması olan The Shinko Wire Co. (Japonya) gerçekleştirmiştir. Hydro (Norveç) ve Cymat (Kanada) eriyiğe direkt gaz üfleyerek seri bir şekilde alüminyum köpük metal üretmektedir. Inco ve ERG yüksek kalitede açık hücreli metalik köpük üretim yöntemi geliştirmiştir. ALULIGHT toz metalurjisi ile alüminyum köpük metal üretmektedir. Rusya'da ise Gasar firması hidrojen gazı yardımı ile köpük metal üretimi gerçekleştirmektedir. (Banhart ve Weaire, 2002; Degischer ve Kirstz, 2002)

Hücresel metaller ve özellikleri Gibson ve Ashby tarafından detaylandırılarak anlatılmıştır.

Bu sayede daha çok ilgi çekmeye başlamış ve son 10 senede çok hızlı yükselişe geçmiştir. (Banhart, 2001)

Yeni geliştirilen bir malzemenin günümüzün rekabetçi ortamında ticari olarak geçerlilik kazanması için; çalışma prensiplerinin belirlenmesi, üretilen malzemenin özelliklerinin belirlenmesi ve önceden yapılan dizayn çalışmaları gerekmektedir. (Ashby vd., 2000)

Hücrel metallerin gelişim senaryosu Şekil 2.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Hücrel metallerin gelişim senaryosu (Ashby vd., 2000).

Günümüzde bu çok düşük yoğunluğa sahip, sıra dışı mekanik, elektriksel, termal ve akustik özellikler gösteren hücrel malzemeleri, yüksek kalitede ve düşük maliyetle üretebilmek için birçok üniversite ve ticari kuruluş çalışmalarını sürdürmektedir. (Körner ve Singer, 2000; Hur vd., 2003; Vendra ve Rabiei, 2007)

Köpük metaller, eğme ve basma dayanımları, sönümleme kapasiteleri, enerji absorblama gibi özellikleri açısından eşsiz bir birleşim sunar. Morfolojilerine bağlı olarak metalik matrislerinden birçok önemli özellik kazanmaktadırlar. (Brothers, vd., 2005; Baumeister, vd., 1997; Evans, vd., 1998)

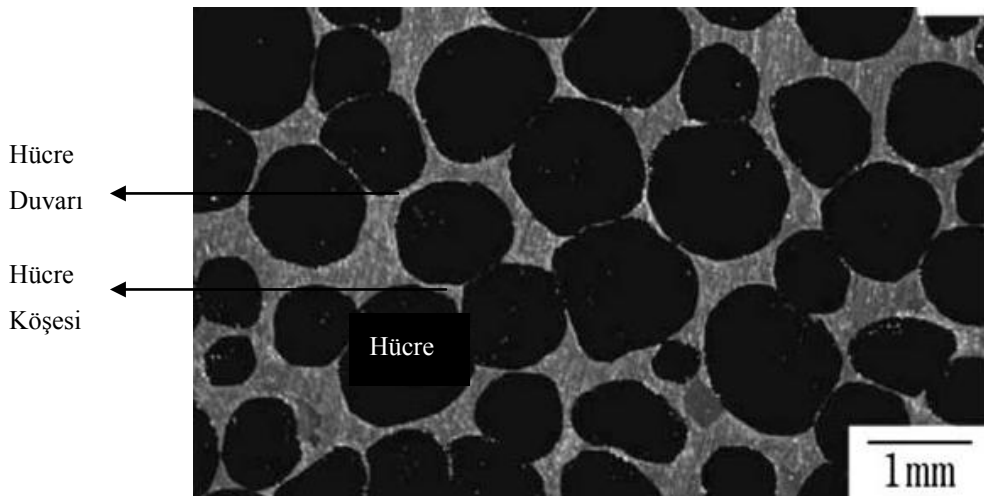
Enerji absorbe etmek için tasarlanan yapılarda en önemli konular boşlukların kontrolü, süneklik ve üretim maliyetlerdir. Ses yalıtımı, ısı indirgeme ve termal izolasyon gibi fonksiyonel uygulamalarda hücrenin açık ve mümkün olduğu kadar küçük olması gerekmektedir. (Zhao, vd., 2005; Dukhan ve Chen, 2007)

Günümüzde demir, nikel, kurşun, çinko, titanyum gibi değişik metallere köpük metaller üretilmektedir. Ancak ticari anlamda düşük yoğunluk, korozyon direnci ve düşük ergime sıcaklığından dolayı günümüzde en çok kullanılan metalik köpük alüminyum köpük metaldir.

2.1 Hücresel Metallerin Sınıflandırılması

Hücresel metaller birçok literatürde üretim yöntemlerine, gözenek büyüklüklerine veya hücre yapılarına göre ayrı ayrı sınıflandırılmışlardır. Ancak en belirgin ayrımı açık hücreli hücresel metal ve kapalı hücreli hücresel metal göstermektedir. Sadece üretim yöntemlerinin farklı olması açısından değil kullanım alanlarının da farklılık göstermesi bu ayrımı yapmamızı kolaylaştırmaktadır. Tüm hücresel metallerde olduğu gibi her ikisi de oldukça hafiftir veya her ikisi de basmaya karşı yüksek dayanıklılık göstermektedir ancak bu özellikleri gözenekli yapıdan kaynaklanmaktadır. Diğer birçok özellik ise mikro yapıya (hücre yapısı, hücre duvarlarının şekli) bağlı olarak değişmektedir. (Degischer ve Kirstz, 2002)

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. Hücre, hücre duvarları ve hücre köşelerinden oluşur. Bunlar şekil 2.2’de gösterilmiştir. 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 Hücre, hücre duvarı, hücre köşesi

Wadley ise daha farklı bir sınıflandırma yaparak hücresel metalleri metal dizilimlerine (topolojilerine) göre ayırmıştır. (Wadley, 2002)

2.1.1 Kapalı Hücreli Hücresel Metaller

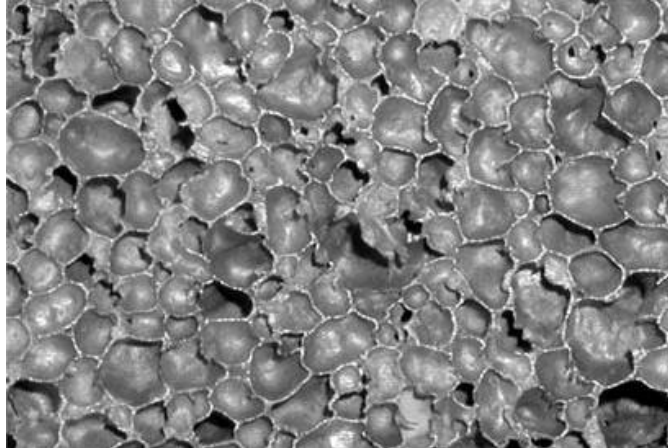
İlk başlarda ümit verici bir şekilde yığın halinde bulunan malzemelerden ucuz yöntemlerle oluşturulan kapalı hücreli hücresel metaller zaman içinde hep yapısal malzeme olarak kullanılmış (özellikle alüminyum) ve dikkatler hep inşaat sektörü için toplanmıştır.

Daha çok enerjiyi absorbe etmeye yarayan çeşitli yapı malzemeleri olarak üretilen bu metaller açık hücreli hücresel metallere nispeten daha düşük yüklere dayanabilmektedir. Prensipde katı malzemelere göre incelmış hücre duvarlarına sahiptir. Metal içerisinde oluşturulan boşluklar birbirinden bağımsızdır.

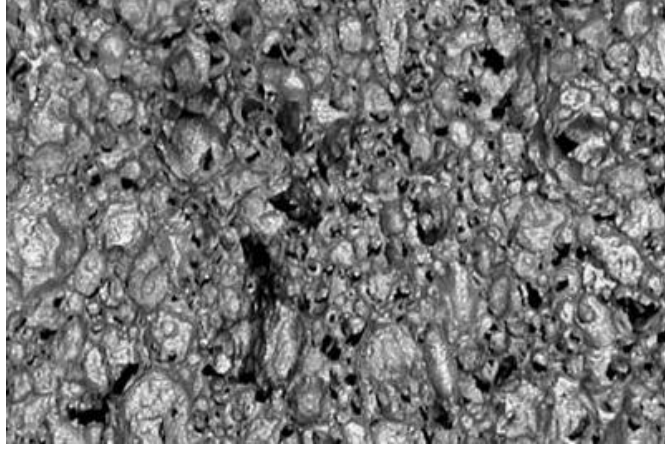
Küçümsenmeyecek derecede enerjiyi absorblamakla beraber başlarda performansları kayma bantlarında meydana gelen prematüre (birincil) çatlaklar nedeni ile eleştirilmiştir. Fakat hücre boyutları (mm' den az) kontrol altına alınarak eş ve biçimsel olarak düzgün şekillendirildiklerinde bu problemleri ortadan kaldırmak mümkün olmuştur. (Degischer ve Kirstz, 2002)

Üretim metotlarından dolayı hücre duvarlarında büyük seramik parçacıklar ya da hücre duvarlarında kalın oksit filmler ihtiva etmektedirler. Bunlar yapıyı kırılgan hale getirmektedir. Aslında bu gibi bileşenlerin birçoğu üretim süreçleri esnasında akışkanlığı arttırmak veya hücrelerin kabalaşmasını engellemek amacı ile bünyeye istenilerek katılmaktadır. Fakat yapılan son çalışmalarda bu tarz malzemelerin kapalı hücreli hücresel metallerin mekanik özellikleri üzerinde çok kötü etkileri olduğu kanıtlanmıştır. (Gergely vd., 2001)

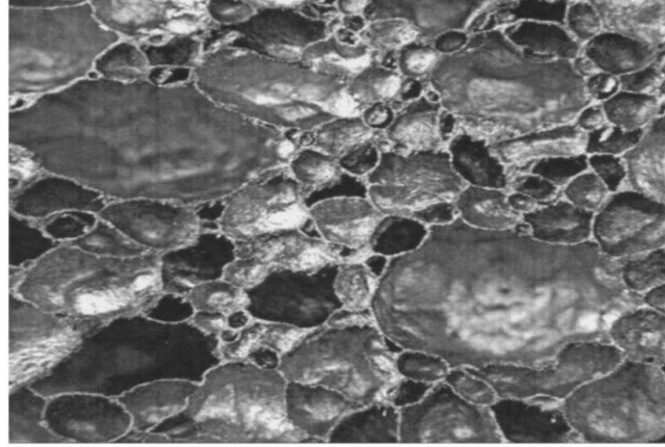
Farklı yöntemlerle üretilmiş Al. kapalı hücreli hücresel metaller Şekil 2.3, Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Alporas Al. kapalı hücreli hücresel metal, Shinko Wire Company Ltd, Japonya, (Onck vd., 2005)



Şekil 2.4 Cymat Al. kapalı hücreli hücresel metal, Cymat Aluminium Corporation, Canada, (Onck vd., 2005)



Şekil 2.5 Alcan Al. kapalı hücreli hücresel metal, Alcan International Ltd., Kingston, ON, Canada. (Wadley, 2002)

2.1.2 Açık Hücreli Hücresel Metaller

Hücreler birbirine açık durumda olmasından dolayı tahmin edileceği gibi en büyük kullanım alanı filtrelerdir. Bununla birlikte katalizör desteği, ısı değiştiricileri, medikal protez, içten soğutmalı hareketlendiricilerde, Havacılıkta akülerde, şok dalgaları emmek amacı ile sıvı nakil boru hatlarının bağlantı bölgelerinde (daha bir çok alanda şok dalga emici olarak kullanılmaktadır), koruyucu geçirgen cidar veya kılıf olarak kullanılmaktadır.

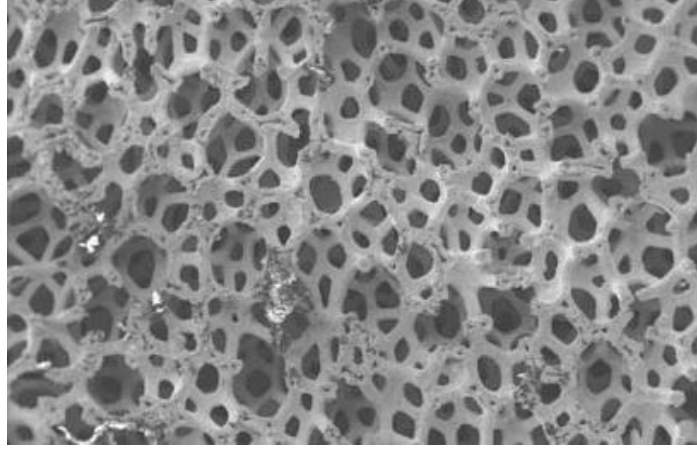
Açık hücreli hücresel metaller, kapalı hücreli hücresel metallerle karşılaştırıldığında kullanım alanları yapı sektörü ile sınırlı kalmayıp katma değeri daha fazla olan alanlarda kullanılmaktadır. Ancak üretim metotları da daha pahalıdır.

Fonksiyonel karakteristiklerinin oluşumunda hücre yapısının ölçüleri etkin rol oynamaktadır.

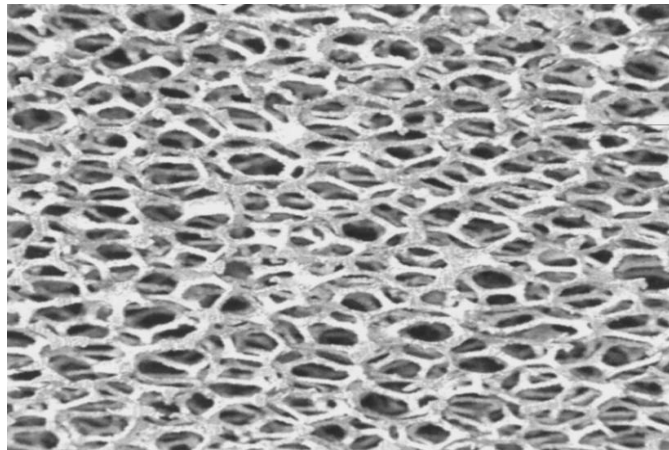
Özellikle hücre ölçüsü filtrelerde ve sıvı akış limitleyicilerinde çok önem kazanır. Isı değiştiricilerinde ise daha az önem ihtiva etse de düzgün bir yapı arzulanır (Hücrelerin tıkanmasını önlemek amaçlı bazı limitler getirilebilir). Kemik içi implantlar ise kaba hücrelere ihtiyaç duyar.

Genellikle kullanım alanlarında yüksek dayanım ya da sünekliğe ihtiyaç duyulmamakla beraber düzgün dağılmış hücre boşlukları ve hatalardan ayıklanmış bir mikroyapı kullanım koşullarını sağlamakta yeterli olmaktadır.

Açık hücreli hücresel metallerin (Şekil 2.6, Şekil 2.7) kullanım alanları ve farklı üretim metodları üzerinde çalışmalar hızlı bir şekilde devam etmektedir. (Degischer ve Kirstz, 2002)



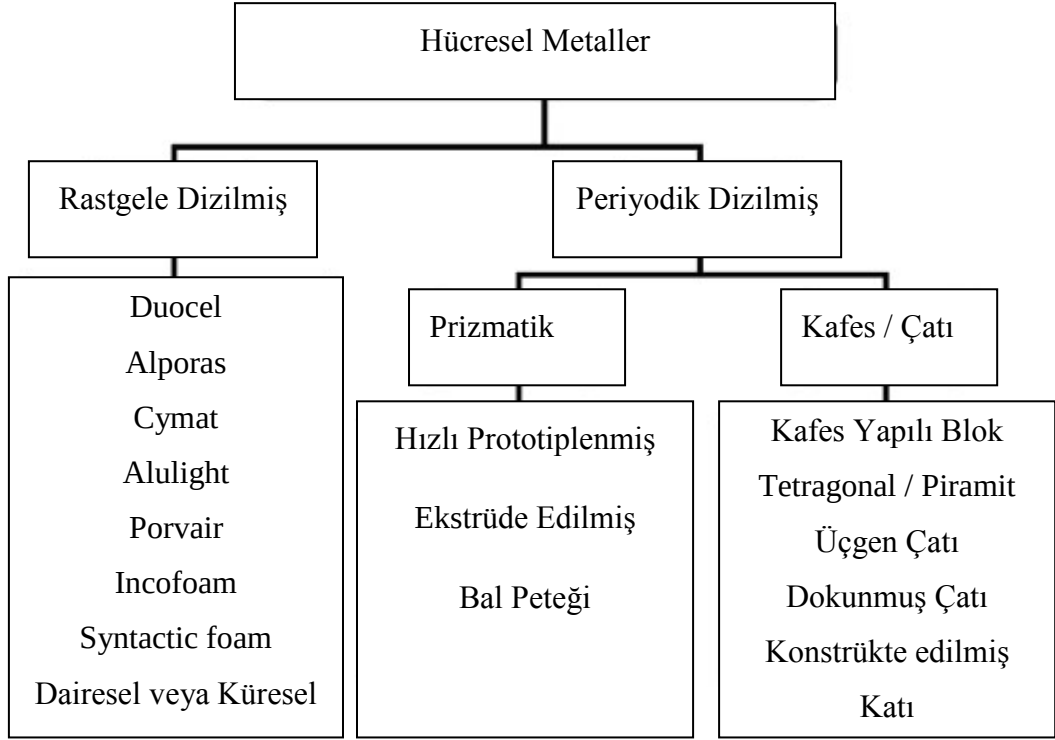
Şekil 2.6 Recemat Al. açık hücreli hücresel metal, Recemat International BV, TheNetherlands. (Onck, vd., 2005)



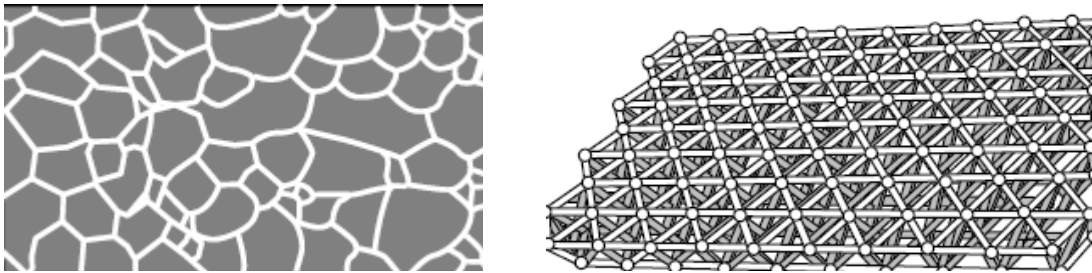
Şekil 2.7 Duocel Al. açık hücreli hücresel metal, ERG Oakland, California, USA, (Wadley, 2002)

2.1.3 Hücresel Metallerin Metal Dizilimlerine Göre Sınıflandırılması

Metal dizilimlerine göre hücresel metalleri sınıflandırmak mümkündür (Şekil 2.8). Bu sınıflandırma yapılırken hücresel metaller rastgele dizilmişler ve periyodik olarak dizilmişler olarak iki ana başlıkta toplanırlar (Şekil 2.9). Periyodik malzemeler ise iki yöne hareket eden prizmatik veya üç yöne hareket eden kafes olarak ayırabiliriz. (Wadley, 2002)



Şekil 2.8 Dizilimlerine göre sınıflandırma. (Wadley, 2002)



Şekil 2.9 Rastgele ve periyodik dizilmiş hücresel metaller (Evans vd., 2000)

3. HÜCRESEL METAL ÜRETİM YÖNTEMLERİ

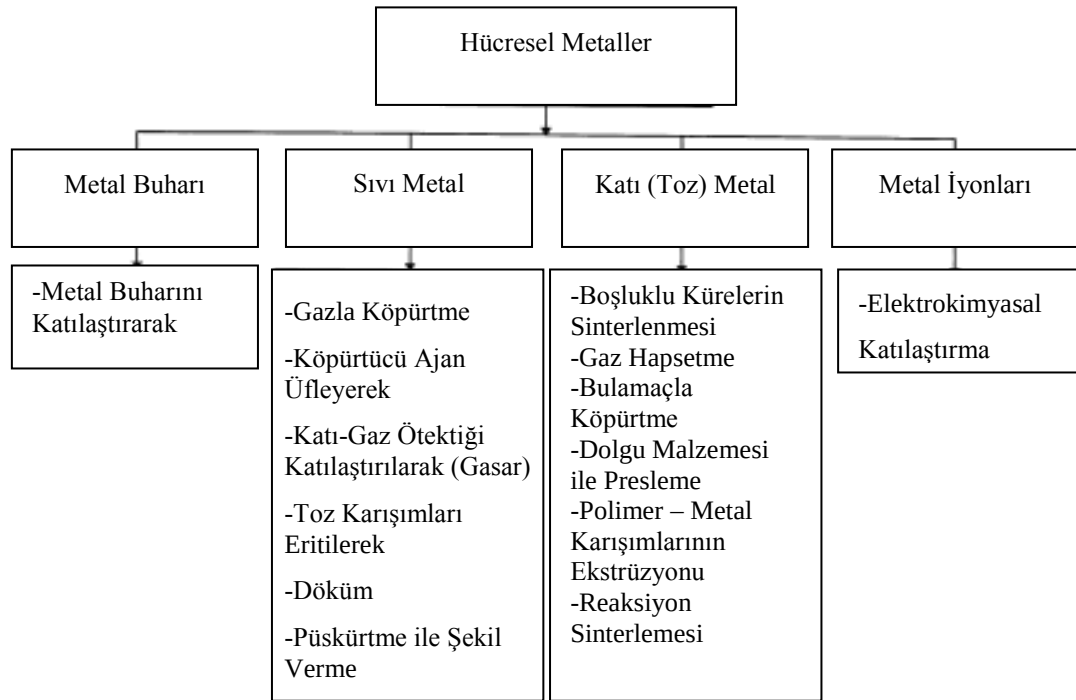
Hücresel Metaller ticari geçerlilik kazanmaları ile birlikte birçok özel firma kendi yöntemini geliştirerek patent sahibi olmuştur. Halen kullanım alanlarına göre maliyetleri düşürecek yöntemler geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Birbirine benzer ancak küçük farklılıklar gösteren çok fazla metot ortaya çıkmıştır. Birçok araştırmacı üretim yöntemlerini uygulanan prosese, kullanılan malzemeye ya da oluşan hücre yapısına göre sınıflandırmıştır.

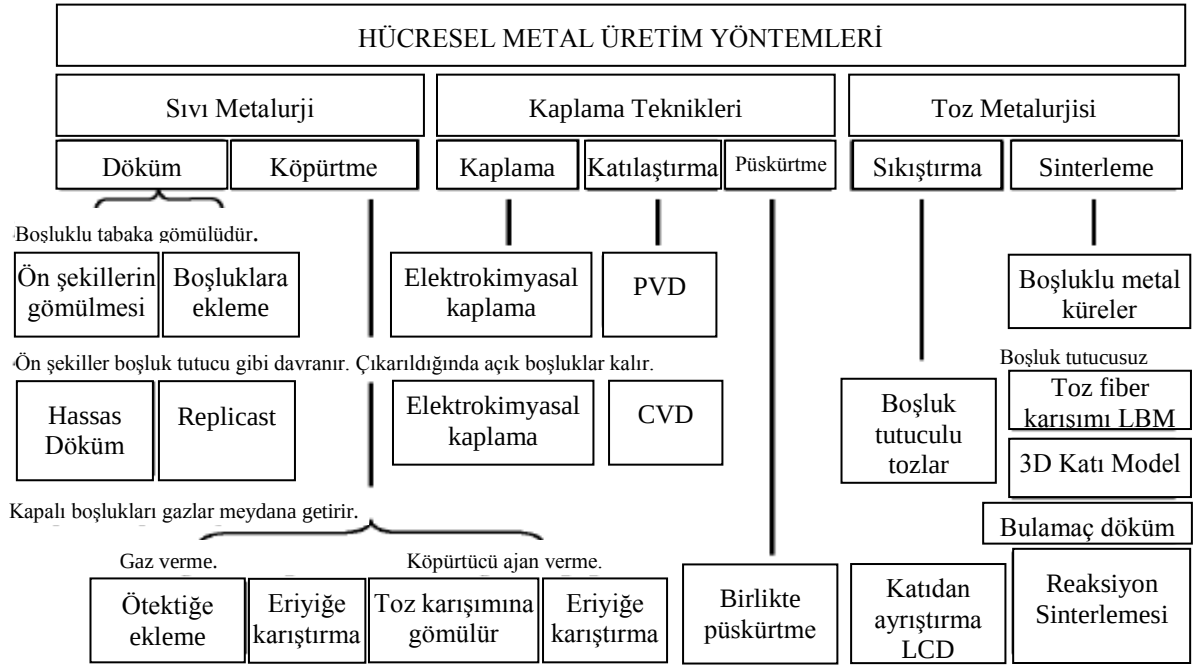
Banhart üretim yöntemlerini 4 ana sınıfta toplamıştır (Şekil 3.1).

- Sıvı metallere
- Toz olarak kullanılan katı metallere
- Metal buharından veya gaz fazındaki bir metal bileşiminden
- Metal iyonları içeren bir çözeltilerden

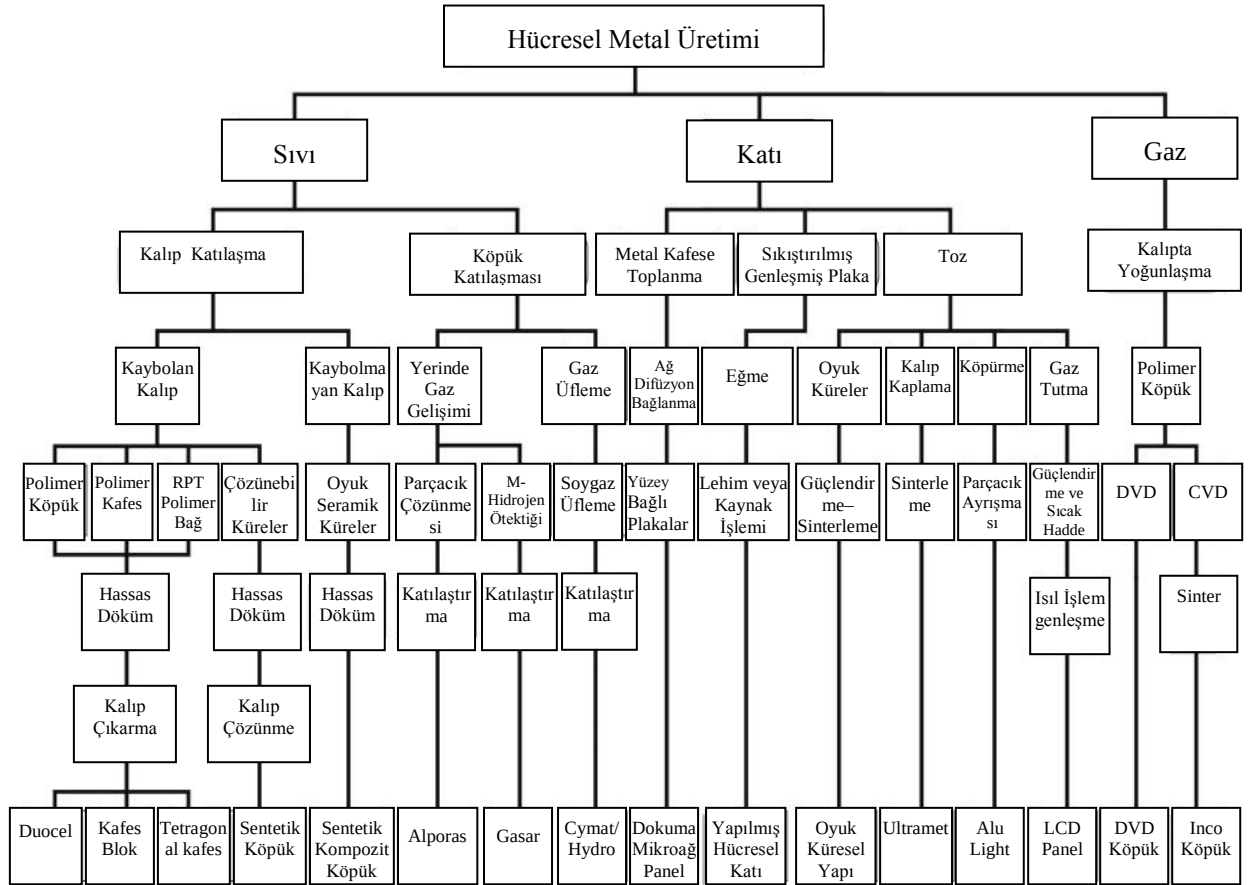
(Banhart, 2001)



Şekil 3.1 Hücresel metal üretim yöntemleri (Banhart, 2001)



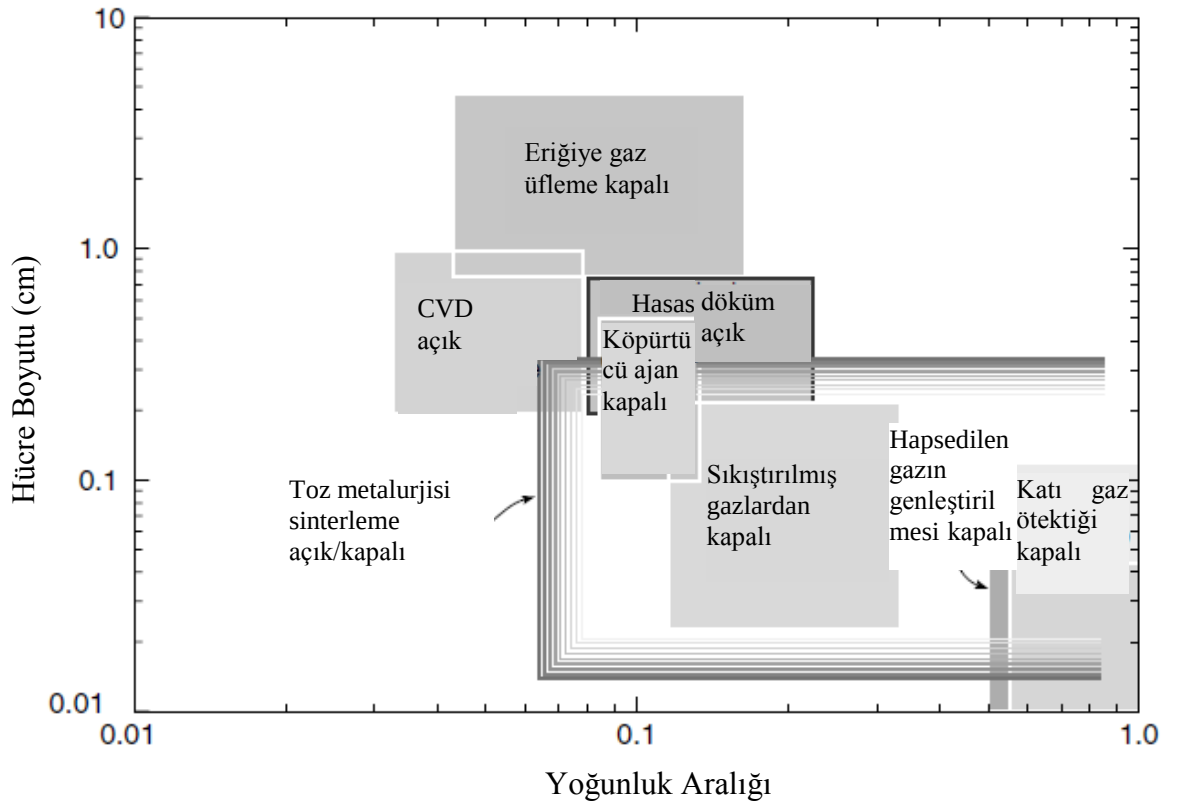
Şekil 3.2 Hücresel metal üretim yöntemleri (Degischer ve Kirstz, 2002)



Şekil 3.3 Hücresel metal üretim yöntemleri (Wadley, 2002)

Degischer ve Kirstz 2002' de yayınlanan Handbook of Cellular Metals adlı kitaplarında üretim yöntemlerini hücresel metal oluşumunda bulunan metalin faz durumuna, oluşan hücre yapısına ve Hücreyi oluşturan ek malzemelere göre sınıflandırmışlardır (Şekil 3.2). Ancak Wadley şekli çok daha genişleterek detaylandırmıştır (Şekil 3.3).

Farklı üretim metodları kullanıldığında farklı hücre yapıları ve hücre boyutları elde edilmektedir (Şekik 3.4). Oluşan hücrelerle birlikte yoğunluklarda da göreceli değişiklikler ortaya çıkmaktadır. (Ashby vd., 2000)



Şekil 3.4 Farklı üretim metodlarında oluşabilecek hücre boyutları ve yoğunluk aralığı (Ashby vd., 2000)

3.1 Hücresel Metal Üretiminde Sıvı Faz Prosesleri

Metaller sıvı halde iken hücrelerin oluşturulabilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir halen de geliştirilmektedir. Sıvı haldeki bir metalden hücresel metal elde edebilmek için direkt olarak köpürtme işlemi kullanılacağı gibi, endirekt bir yöntem olan kattı boşluk tutucular üzerine döküm yaparak sonraki adımlar yardımı ile hücrelerin oluşturulması mümkündür. (Banhart, 2001)

3.1.1 Sıvı Eriyiklerden Direkt Olarak Hücresel Metal Üretimi

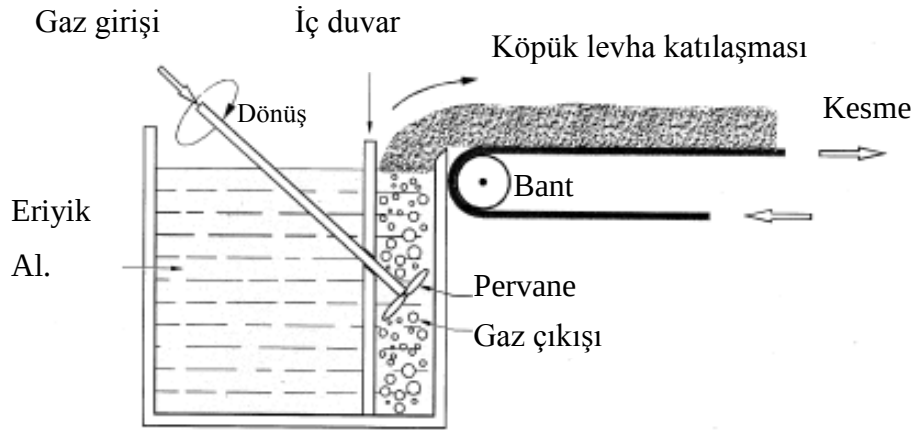
Hücresel metaller, belirli koşullar sağlandığında eriyik metal içerisine gaz üfleme metodu ile üretilirler. Normal olarak gaz tanecikleri sıvı metal içerisinden hızla yükselerek yüzeye ulaşırlar. Gaz taneciklerin daha hızlı hareket etmesi sıvı metalin akışkanlığını arttırarak mümkün olmaktadır. Akışkanlığın artması için bazı seramik tozlar ve alaşım elementleri kullanılmaktadır. 1960 ne 1970’li yıllar arasında farklı malzemeler kullanılarak çeşitli denemelerde bulunulmuştur. Direkt olarak hücresel metal oluşumu için ana iki yöntemden bahsedilebilir. Sıvı metal içerisine gaz üfleme veya sıvı metal içerisine köpürtücü ajanlar katmak. (Banhart, 2001; Degischer ve Kirstz, 2002; Ashby vd., 2000)

3.1.1.1 Gaz Üfleme Yöntemi ile Hücresel Metal Üretimi

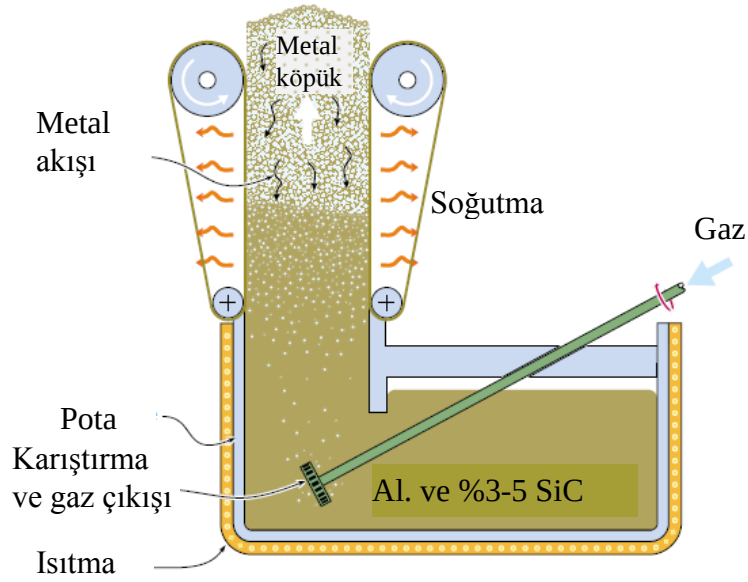
Yöntem ilk olarak Hydro Aluminium (Norveç) ve Cymat Aluminium (Kanada) tarafından kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda geliştirilmesi ve patent alımı Alcan International tarafından gerçekleştirilmiştir. Yönteme Silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3) veya magnezyum oksit (MgO_2) tozları eriyiğin viskozitesini yükseltmek için ilave edilmektedir. Takviye parçacıklarının hacmi eriyik hacminin %10-15’sini aşmamalıdır ve boyutları $0,5-25\mu$ arasında değişir. Eriyiğe ilave edilen parçacıkların eriyik tarafından ısıtılabilmesi ve eriyik içinde homojen bir şekilde karışabilmesi gerekmektedir. Bunun için özel bir karıştırma tekniği kullanılmaktadır (Şekil 3.5, Şekil 3.6).

Köpüklenmekteki ikinci adım ise oluşan bu metal matrisli kompozit MMC malzemeye gaz ilave edilmesidir. Gaz olarak soy gazlar tercih edilmektedir (argon, hidrojen, vb.). Gaz, özel olarak tasarlanan bir nozül yardımıyla eriyiğe ilave edilir. Böylece eriyik içinde iyi derecede dağılmış çok ince gaz kabarcıkları oluşur. Gaz kabarcıklarının etrafı metal matrisle çevrilidir. Oluşan köpük görünümdeki hücreler 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. Kalınlık genellikle 10 cm. civarındadır. Üretilen malzemenin uzunluğu ve kalınlığı konveyör hızı ve uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. (Banhart, 2001; Wadley,2002; Ashby vd., 2000; Babcsan vd., 2003; Degischer ve Kirstz, 2002)

Bu yöntemle üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluğu $0,069-0,54\text{ g/cm}^3$ arasında, ortalama hücre boyutları 3-25 mm arasındadır (Şekil 3.7). Ortalama hücre boyutları gaz akış hızına, pervane dönüş hızına ve diğer parametrelere bağlıdır (Banhart, 2001).



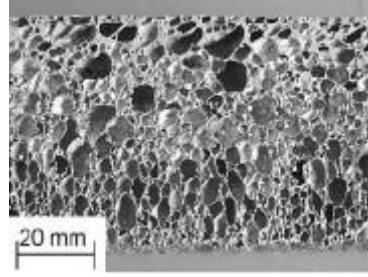
Şekil 3.5 Gaz üfleme yöntemi (Banhart, 2001)



Şekil 3.6 Gaz üfleme yöntemi (Wadley, 2002)

Çizelge 3.1 Gaz üfleme yoluyla üretilen hücreli metallerde 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



Şekil 3.7 Gaz üfleme yöntemi ile üretilmiş hücresel metal, Cymat. Yoğunluk: $0,3 \text{ gr/cm}^3$ (Degischer ve Kirstz, 2002)

3.1.1.1.1 Gaz Üfleme Yöntemi ile Hücresel Metal Üretiminin Avantaj ve Dezavantajları

Üretim yönteminin en büyük avantajı bir sürekli döküm yöntemi olmasıdır. Bu sayede büyük miktarlarda üretim yapmak mümkündür. Cymat'ın üretim bandı saatte 1000kg hücresel metal üretirken genişliği 1,5 m olup kalınlığı 2,5 ila 15cm arasında değişmektedir. Diğer yöntemlere göre ucuz ve nispeten basit bir işlemdir.

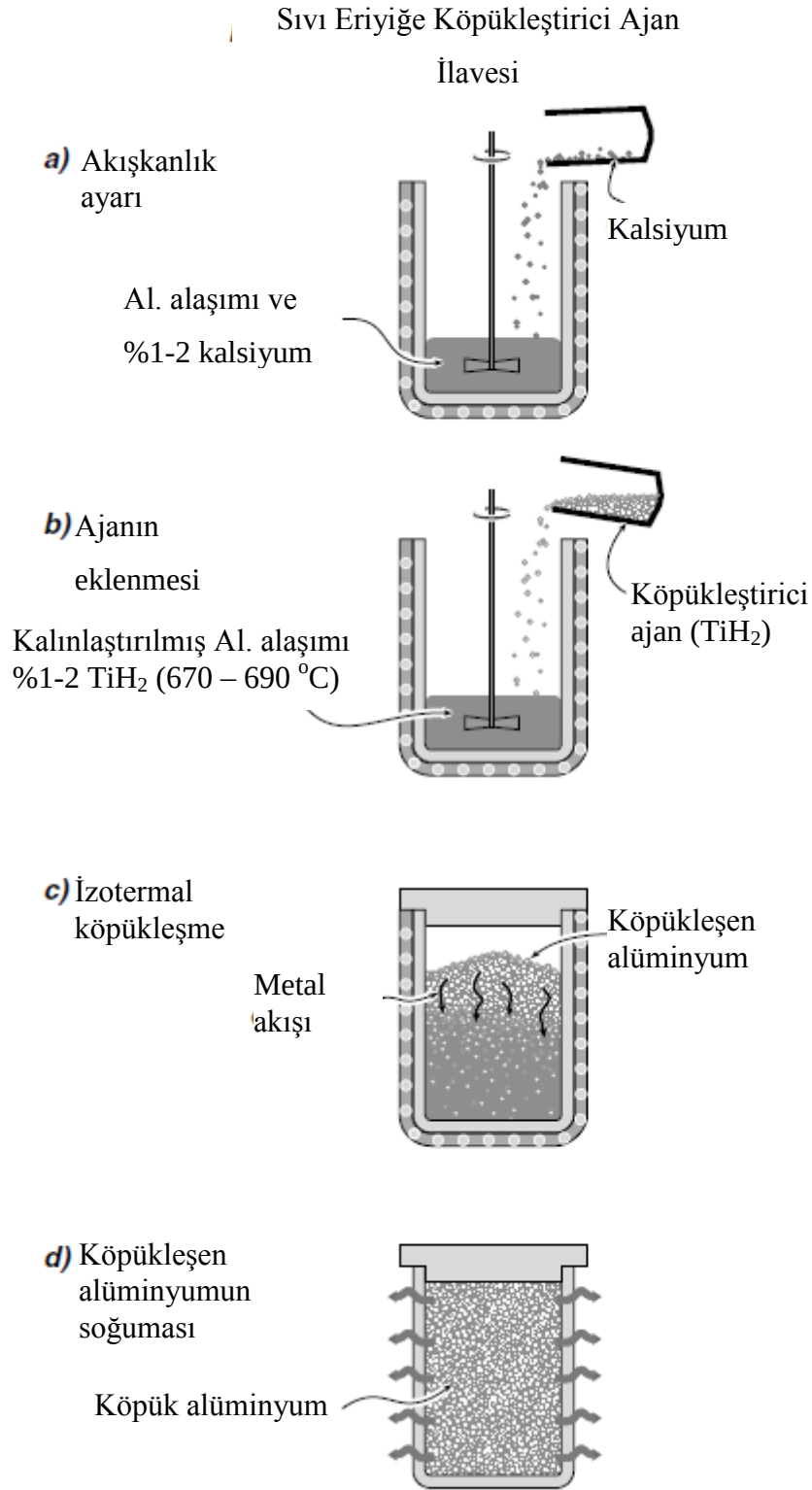
Ancak gaz dağılımını kontrol etmek zordur büyük gözenekler oluşabilir buda mukavemeti kötü etkiler. Sadece levha dökümüne uygundur ve yüzey kesimi düzensizdir. MMC'ler diğer hücresel metallere göre daha kırılgandırlar. Bunun sebebi ise hücre duvarlarında biriken katışıklardır. Önceden seramik parçacıkların karıştırılması gerekir. Bu bütün alaşımlar için uygun değildir (bazı alaşımlar yeteri kadar akışkan değildir). (Banhart, 2001)

3.1.1.2 Köpükleştirici Ajanlar Yardımıyla Hücresel Metal Üretimi

Sıvı Metal Eriyiklerden Hücresel metal üretimi için kullanılan bu yöntem Gaz üfleme yöntemine çok benzemektedir. En büyük farkı ise gaz yerine köpük oluşturunca ajanların katılmasıdır. Köpükleştirici ajan etkili sıcaklıkta çözünerek gaz salmakta ve köpükleşmeyi sağlamaktadır. En çok kullanılan ajan titanyum hidratıdır (TiH_2). 465°C 'nin üzerine çıkıldığında TiH_2 Ti ve H_2 (gaz) olarak ayrışır. Büyük hacimlerde hidrojen gazı açığa çıkarak baloncuklar oluşturmaktadır. Yöntemin ticari adı “ALPORAS” olarak bilinmektedir (Şekil 3.8). Üretici firma ise Shinko Wire Company, Japonya'dır.

Ancak sistemin iyi işlemesi için baloncukların kararlı hale getirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden eriyiğin viskozitesini arttırmak ve yüzen baloncukları korumak için eriyiğe kalsiyum ilave edilerek eriyiğin viskozitesi ayarlanır. Bu yöntemde Kalsiyum (Ca), sıvı alüminyuma $670 - 690^\circ\text{C}$ sıcaklıkta % 1-2 oranında ilave edilir. Viskozite istenilen değere ulaşıncaya % 1.6 oranında titanyum hidrid (TiH_2) eklenerek uygun viskozitede ve sıcaklıkta hidrojen gazı

salması beklenir. Ca hızla okside olarak CaO ve CaAl_2O_4 oluşturur. (Miyoshi vd., 2000; Banhart, 2001; Ashby vd., 2000)

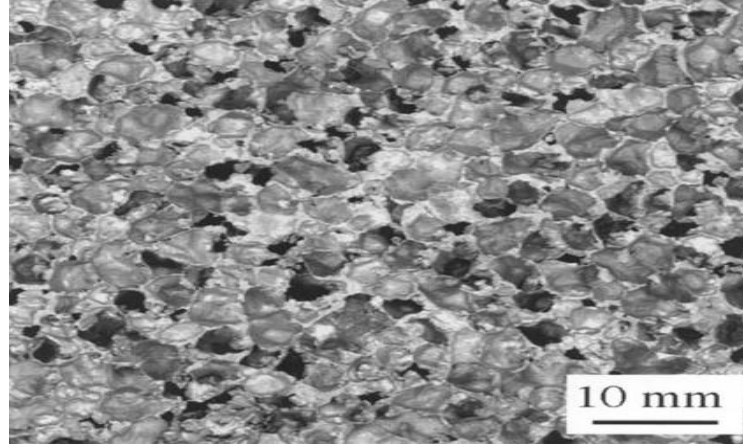


Şekil 3.8 Köpükleştirici ajan yardımı ile hücreli metal üretimi, Alporas (Ashby vd., 2000)

Bu yöntemle elde edilen alüminyum köpük metalin yoğunluğu $0.18-0.24 \text{ gr/cm}^3$ arasında

olup, gözenek boyutları 2-10 mm arasındadır (Şekil 3.9).

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).



Şekil 3.9 Köpükleştirici ajan yardımı ile üretilmiş hücresel metal Alporas. (Gergely vd., 2001)

3.1.1.2.1 Köpükleştirici Ajanla Hücresel Metal Üretiminin Avantaj ve Dezavantajları

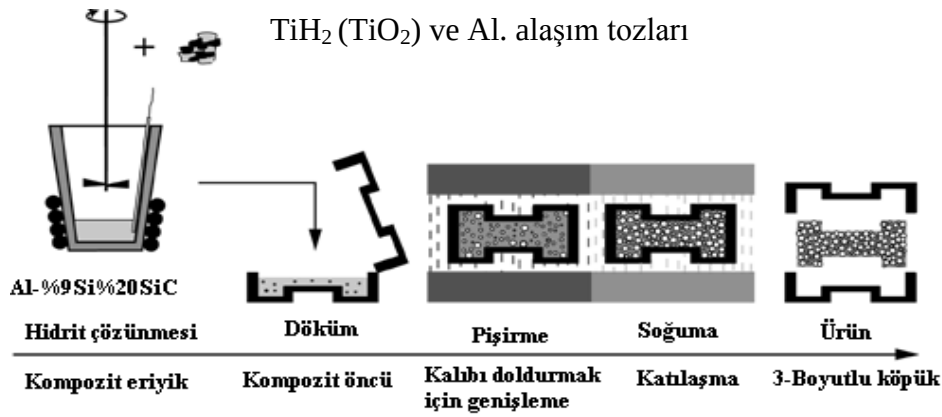
Üretilen parçalar son şeklidir. Ayrıca büyük değişimler yaratacak şekillendirme süreçlerine ihtiyaç duyulmaz. Oluşan hücre boyutları birbirine yakın olup homojen dağılmıştır. Dezavantajları ise hidrojen içeriği alüminyum dışındaki birçok metali kırılgan hale getirdiğinden yöntem daha çok alüminyum hücresel metal üretimi ile sınırlıdır. Katışkılardan dolayı nispeten daha pahalı bir yöntemdir. (Ashby vd., 2000)

3.1.2 FORMGRIP Yöntemi ile Hücresel Metal Üretimi

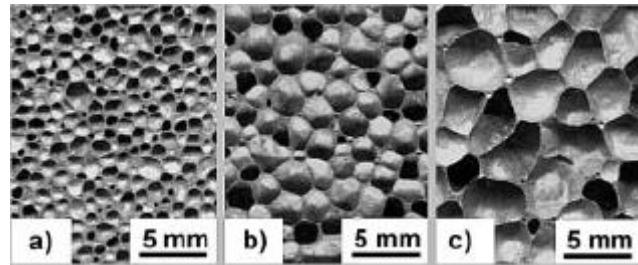
Köpükleştirici ajanların kullanıldığı yöntemin bazı dezavantajlarını ortadan kaldırmak için geliştirilmiş bir yöntemdir. Köpürtücü ajanlar kullanılarak üretilen metalik köpüklerin hücre yapısının kontrolü ajanların sıvı metale atılır atılmaz reaksiyona başlamaları nedeni ile çok zordur. Bu yüzden yöntemde köpürtücü ajan, katı metal tozlarıyla karıştırılarak ısıtılarak sıvı metale karıştırılır. Yöntem adını **Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor** kelimelerinin baş harflerinde almıştır (Şekil 3.10). Kullanılacak ajan bir fırın yardımı ile ısıtılarak oksitlenmesi sağlanır bu sayede eriyik içerisinde gaz haline geçmesi gecikecektir. Buda kontrolü kolaylaştırır. Yöntem toz metalurjisi kullanılarak hücresel metallerin elde edilmesi yöntemine çok benzese de ön ısıtılmış ajanlar eriyik içerisine katıldığından sıvı

prosesleri yardımı ile hücresel metal üretim başlığı altında incelenmiştir.

Proseste TiH_2 fırınlanarak yüzeyde titanyum oksit bir film tabakası oluşması sağlanmaktadır. (Hidrojen geçirgenliğinde sınırlayıcı rol oynamaktadır). 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 bir yapıyı meydana getirmektedir.



Şekil 3.10 FORMGRIP yöntemi ile hücresel metal üretimi (Gergely ve Clyne, 2000)



Şekil 3.11 FORMGRIP yöntemi ile üretilen hücresel metaller (Degischer ve Kirstz, 2002)

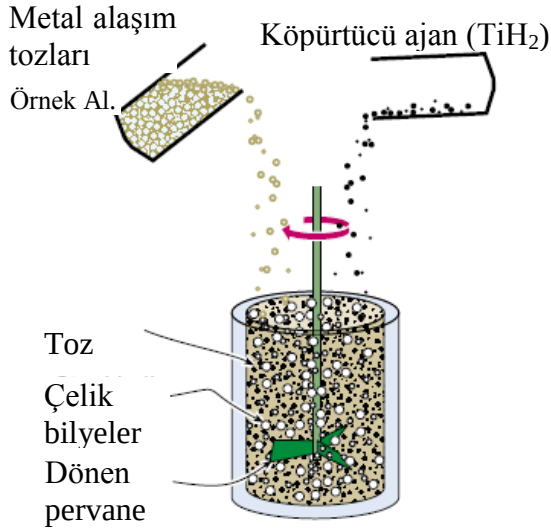
Farklı fırınlama koşullarında tutulan FORMGRIM hücresel metal numuneleri farklı boşluk oranına ve hücre boyutuna sahip olmuştur. Şekil 3.11' de gösterildiği gibi a) numunesi % 69 boşluğa sahip olup hücre boyutu 1,1mm, b) numunesi %79 boşluğa sahip olup hücre boyutu 1,9 mm, c) numunesi ise %88 boşluğa sahip olup hücre boyutu 3,1 mm' ye ulaşmıştır. (Degischer ve Kirstz, 2002)

3.1.3 Sıkıştırılmış Tozlardan Hücresel Metal Üretimi

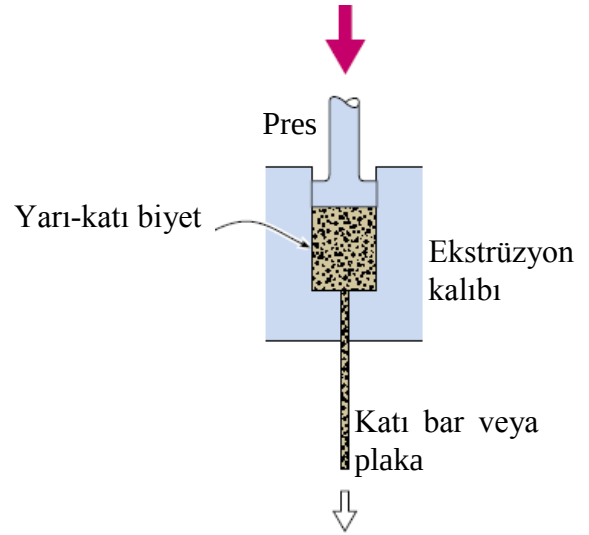
Hücresel Metaller Bremen’deki Fraunhofer Enstitüsü tarafından geliştirilen bir yöntemle üretilerek patentlenmiştir. Eski bir teknik olmasına rağmen ticari alana geçmesi süre almıştır. (Banhart, 2001).

ALULIGHT ve FOAMINAL ticari adlarıyla bilinmektedir. (Wadley, 2002). Aslında bir çok literatürde başlangıç elementleri toz olmasından dolayı toz metalurjisi ile üretilen hücresel metaller olarak ele alınsa da aktif hücrelerin oluşması sıvı fazda gerçekleşmektedir (Şekil 3.12). (Banhart, 2001)

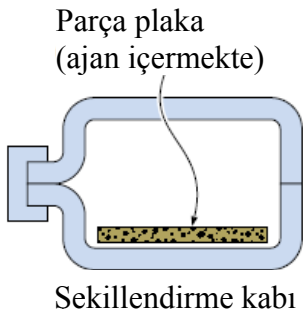
a) Malzemelerin seçimi ve karıştırılması



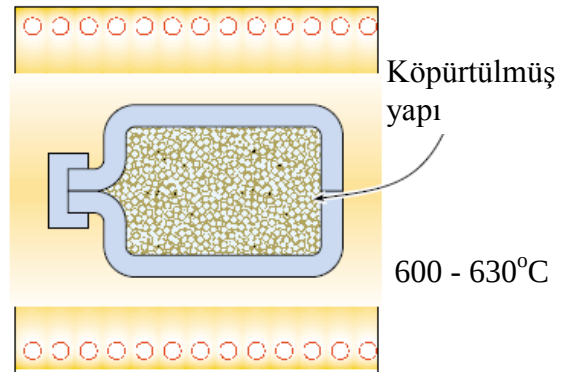
b) Ilık (<400°C) Ekstrüzyon



c) Şekillendirme kalıbı



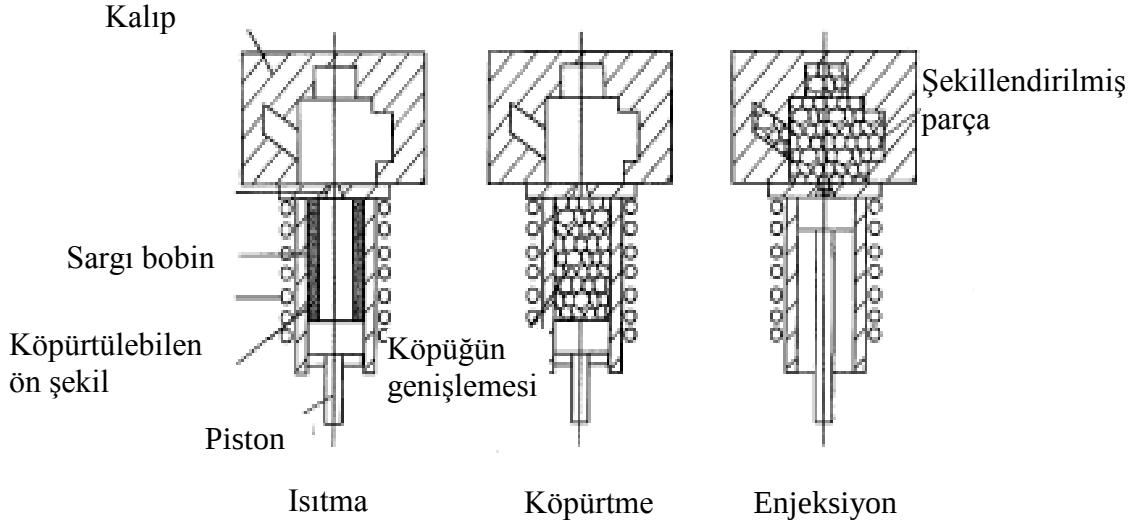
d) Köpürtme (katı/yarı-katı)



Şekil 3.12 Toz metalurjisi ile üretilen hücresel metaller (Evans, 2000)

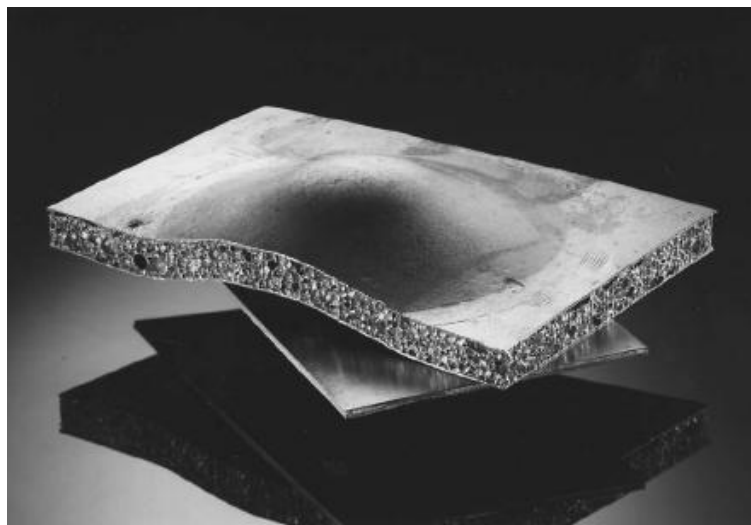
(Degischer ve Kirstz, 2002)

Toz metal prosesleri temel alınarak birçok yeni metot geliştirilmiştir. Metal enjeksiyon yöntemi ile birleştirilerek karmaşık şekilli hücresel metaller bile üretilebilmiştir.



Şekil 3.14 Toz metalurjisi ve metal enjeksiyon yöntemi ile hücresel metal üretimi
(Banhart, 2001)

Genel kullanım alanı 2xxx, 6xxx, ve 7xxx alüminyum alaşımları olsa da uygun köpük yapıcı madde ve işlem parametrelerinin seçilmesi suretiyle kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal alaşımları da üretilmektedir. (Degischer ve Kirstz, 2002; Güden ve Elbir, 2001).



Şekil 3.15 Toz metalurjisi ile üretilmiş hücresel sandviç metal (Banhart, 2001)

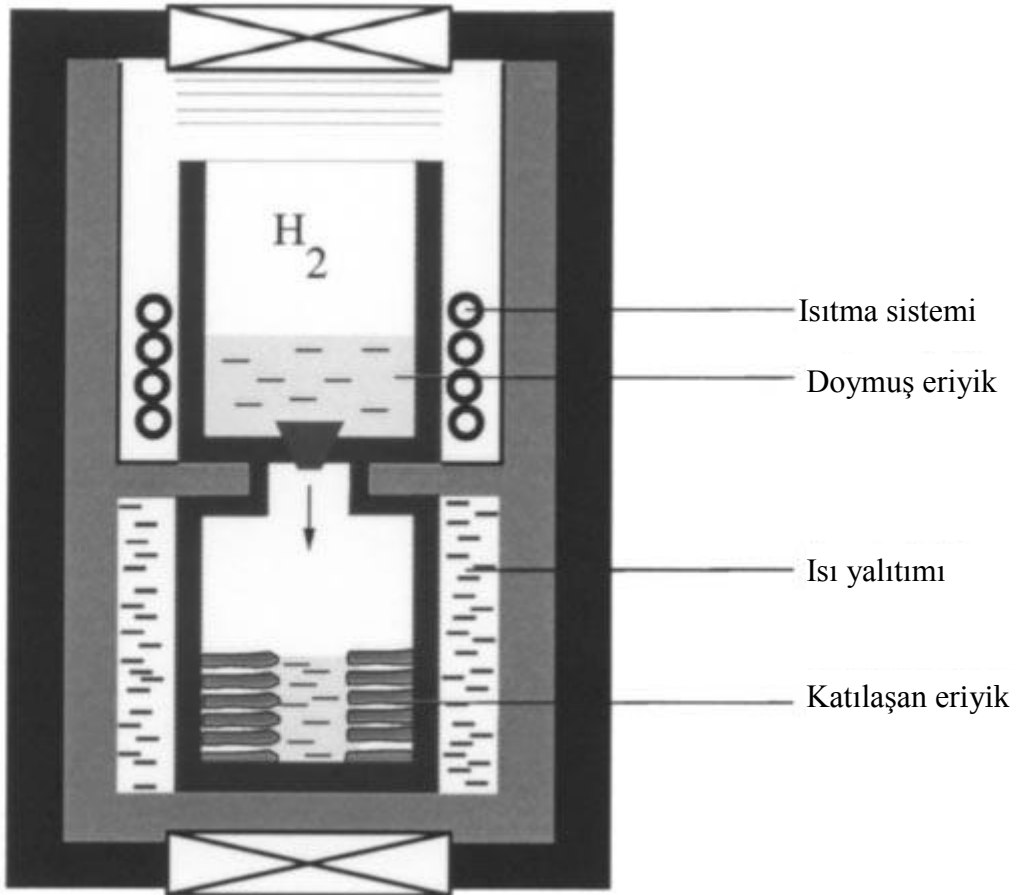
3.1.3.1 Sıkıştırılmış Tozlar ile Hücresel Metal Üretiminin Avantaj ve Dezavantajları

TiH₂ kullanılan diğer metotlara göre daha kolay üretim süreçleri bulunmaktadır. Hücreler oluşturulmadan önce malzemeye önceden istenilen şekil verilebilir. Kompozitler üretilebilir. Kararlaştırıcı ek malzemelere ihtiyaç duyulmamaktadır. Sandviç yapı yapımı için uygundur. Büyük parçaların üretilebilmesi zordur. Toz metalurjisi maliyetli yüksek bir yöntemdir.

3.1.4 Gaz – Katı Ötektikleri ile Hücresel Metal Üretimi

1993 yılında Shapalov tarafından geliştirilmiş tekniğe GASAR prosesi de denilmektedir. Gaz ile güçlendirilmiş cümlesinin Rusçadaki kısaltmasıdır.

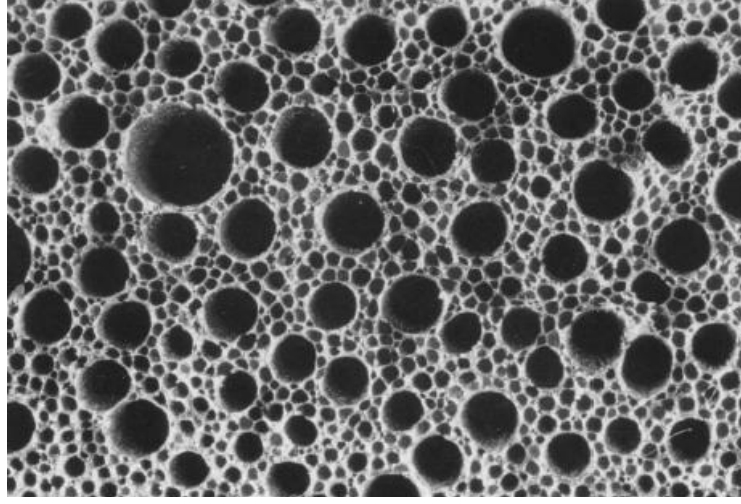
Yöntemde sıvıların ötektik reaksiyonundan yararlanılarak hidrojene aşırı doymuş yapılar oluşturulur. Ötektik oluşturmuş eriyik ortamında 50 atm gibi yüksek bir basınçta hidrojen bulunmakta ve bünyeye karışmaktadır. Böyle bir eriyik ötektik noktasında iken soğutulur ve bünyesinde gaz içeren katı bir hal alır. Hidrojenin hacim oranı şekli ve konuşlanması sistemden çekilen ısının oranı ve yönüne bağlı olarak değişmektedir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 GASAR prosesi ile hücresel metal üretimi (Gergely, 2001)

Patent içeriğinde uygulamanın bakır, alüminyum, nikel, magnezyum, demir ve kroma uygulanabileceği belirtilmiştir.(Gergely, 2001; Banhart, 2001)

Şekil 3.17’de GASAR prosesi ile üretilmiş hücresel metal gözükmektedir.



Şekil 3.17 GASAR prosesi ile üretilmiş hücresel metal (Banhart, 2001)

3.1.5 Döküm ile Hücresel Metal Üretimi

Bir çok döküm tekniği kullanılarak hücresel metaller üretilmeye çalışılmaktadır. Ancak ticari olarak iki ana yöntem öne çıkmıştır. Bunlardan biri polimer köpük kullanılarak yapılan hassas döküm tekniği bir diğeri ise boşluk tutucular kullanılarak yapılan döküm tekniğidir.

3.1.5.1 Polimer Köpüklerle Yapılan Hassas Döküm ile Hücresel Metal Üretimi

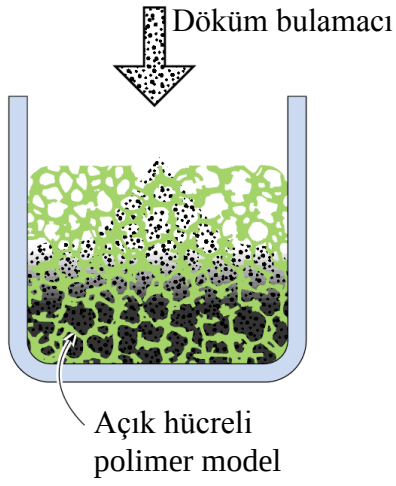
Sıvı metalden köpürtme işlemi direkt olarak kullanılmadan hücresel metal üretmek mümkündür.

Bu proseste poliüretan, polistiren vb. bir polimer köpük başlangıç noktası olarak kullanılır. Köpük yapısı açık hücrelidir. Müllit, kalsiyum karbonat ve fenolik reçine gibi yeterli ısı direnci olan malzemelerle veya basit bir alçıyla doldurulur. Kuruma işleminden sonra orijinal polimer köpük yapısının yerini alan açık boşluklara sıvı metal dökülür (Şekil 3.18). Eğer dar boşluklara sıvı metal dolumu tam olmazsa basınç ve kalıbı ısıtma gerekli olabilir.

Kalıp malzemesi çıkarıldıktan sonra orijinal köpük polimerin yerini metalik yapı tam olarak alır. (Banhart, 2001; Amjad, 2001)

Yöntemin ticari adı Duocel olarak bilinmektedir. Santimetrede görülen boşluk adedi 2 ila 16 arasında değişmektedir. Boşluk oranı %80 ila %90 arasında değişir. (Banhart, 2001)

a) Hassas Döküm

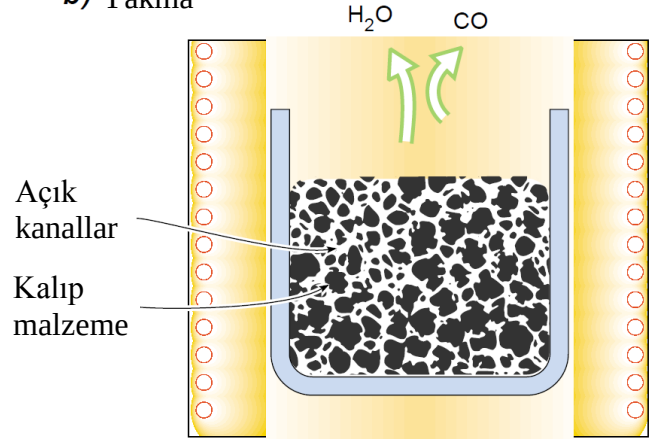


Modeller

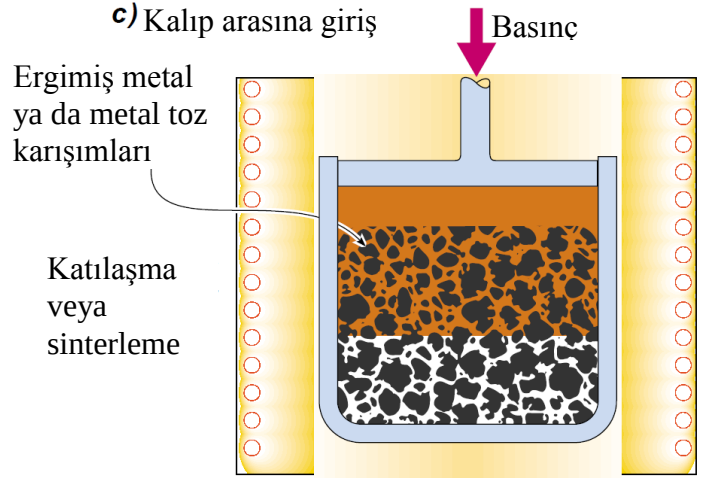
Gözenekli polimer köpük

Ekstrüzyon veya hızlı prototiplenmiş kafes yapılı polimer

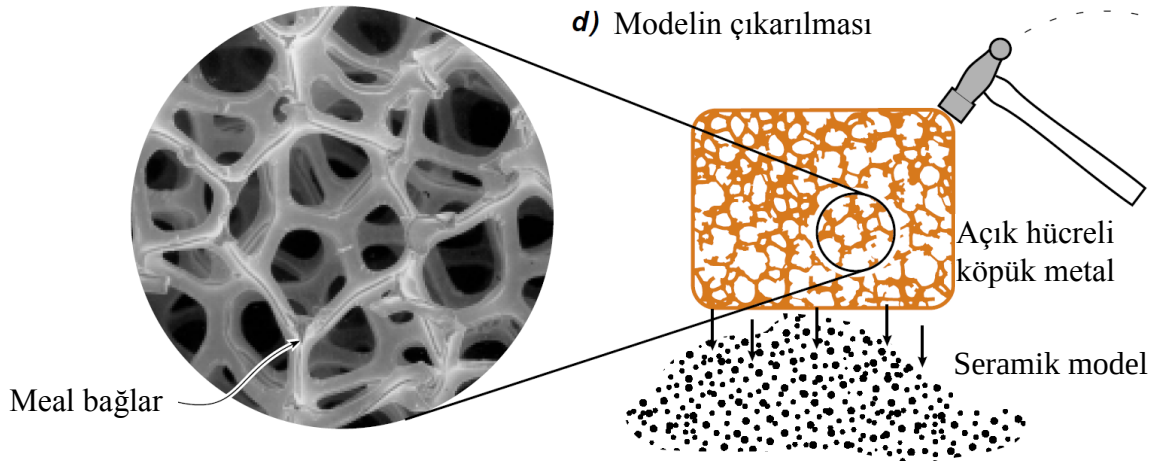
b) Yakma



c) Kalıp arasına giriş



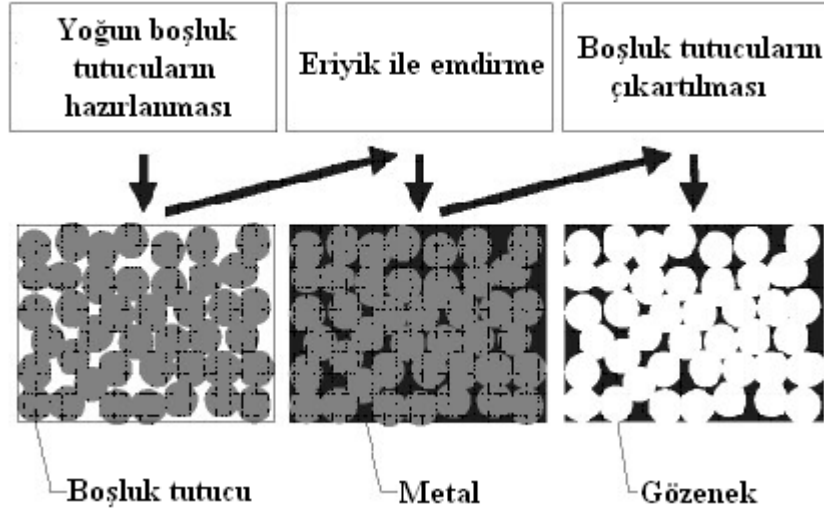
d) Modelin çıkarılması



Şekil 3.18 Hassas döküm yöntemi ile hücrel metal üretimi (Evans, 2000)

3.1.5.2 Boşluk Tutucu Malzemelerin Etrafına Hassas Döküm

Hücresel metaller organik veya inorganik tanecikler, küreler veya barlar etrafına sıvı metal dökümü yoluyla üretilebilir. Döküm sonrasında tanecikler metalik ürün içerisinde kalabilmekte ya da uygun bir çözücü veya asitle bünyeden uzaklaştırılmaktadır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Boşluk tutucular kullanarak hücresel metal üretimi (Banhart, 2001).

Tuzlar, genişleyen kil tanecikler, kum peletler, köpük cam küreler, veya alüminyum oksit boş küreler inorganik dolgu malzemeleri olarak kullanılabilirler. Alüminyum, Magnezyum, çinko, kurşun gibi malzemelerden bu yöntem yardımı ile Hücresel Metal üretilebilmektedir.

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 ile. (Banhart, 2001).

4. KULLANIM ALANLARI ve UYGULAMALAR

Birçok alan az ya da çok hücresele metale ihtiyaç duymaktadır. Hem strüktür yapılar için hem de fonksiyonel kullanım alanları olan hücresele metaller, kullanılacakları bölgeye göre seçilirler. Bazı uygulamalarda çok büyük hücrelere ihtiyaç duyulurken bazı uygulamalarda küçük hücrelere ihtiyaç duyulur. Yine aynı şekilde kullanım alanına göre açık hücre mi yoksa kapalı hücre mi kullanılacağına önceden karar verilir. Birçok uygulama için en çok alüminyum tercih edilmekle beraber magnezyum, nikel ve titanyum hücresele metallerde kendilerine kullanım alanları bulmaktadır. (Banhart, 2001; Degischer ve Kirstz, 2002)

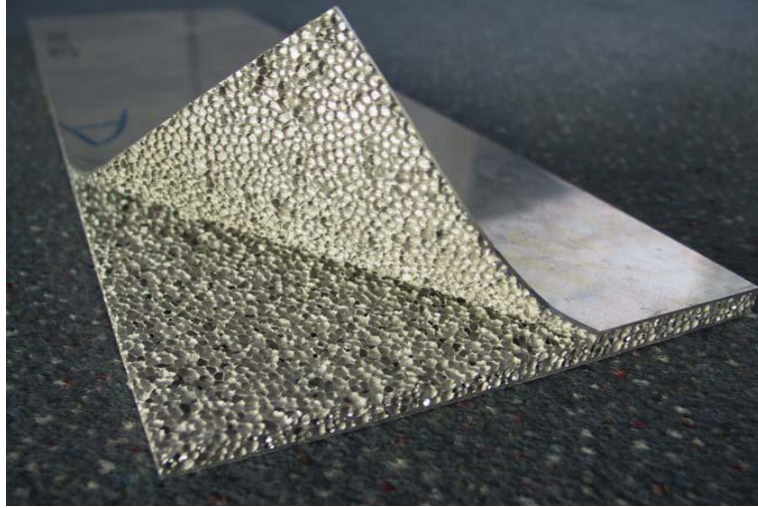
Hücresele Metallerin kendilerine geniş ölçüde kullanım alanı bulduğu bazı sektörleri şöyle sıralayabiliriz,

- İnşaat sektörü
- Otomotiv endüstrisi
 - Hafifletici konstrüksiyon
 - Çarpışmalarda enerji absorbe edici
 - Ses yalıtımı
- Havacılık ve uzay sanayi
- Gemi inşaat endüstrisi
- Ses izolasyon sistemleri
- Makine konstrüksiyon yapı sanayi
- Biyomedikal endüstrisi
- Ambalajlama sektöründe

4.1 İnşaat Sektöründe

Hafif Konstrüksiyon yapılar ve mimari çalışmalarda çok sık kullanılmaktadır.

Eğme yönünde yük bindiğinde mükemmel bir ağırlık/eğme oranına sahiptirler. Kayma ve kırılma dayanımları sayesinde sandviç yapı çekirdekleri olarak tercih edilirler (Şekil 4.1). (Evans, 2000)



Şekil 4.1 Hücresel alüminyum sandviç panel (Banhart, 2003)

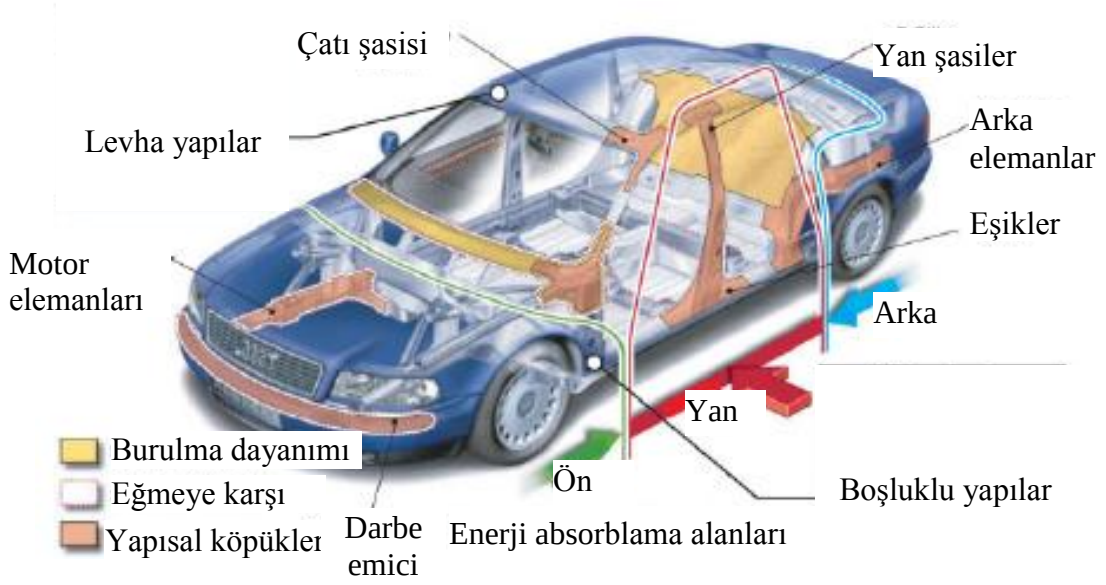
Mimari yapılarda restoran, bar, kafe veya fuar stantları gibi mekanlarda duvar kaplamaları, yer karosu, tavan kaplaması veya aydınlatma askıları olarak kullanılmakta. Ayrıca, son dönemlerde dış cephe kaplamaları olarak da kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 4.2). [2]



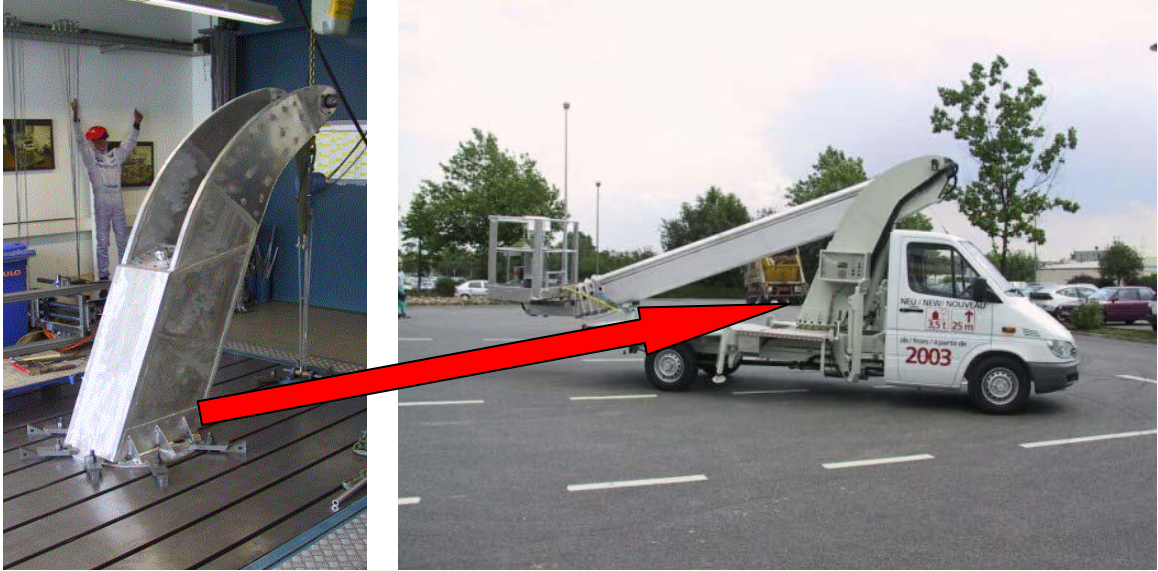
Şekil 4.2 Hücresel metal mimari çalışmaları, Cymat [2]

4.2 Otomotiv Endüstrisi

Otomobil endüstrisinde güvenlik gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Ancak güvenliği arttırıcı her eklenti ağırlığa olumsuz etki yapmaktadır. Bu olumsuz etkiler hücresel metallerin düşük yoğunlukları ve şaşırtıcı mekanik özellikleri sayesinde aşılmıştır. Otomotiv endüstrisinin hücresel metalleri seçmesinde üç ana özellik yatmaktadır. Düşük yoğunluklarından dolayı hafif olmaları, enerjiyi emebilmeleri ve üstün sönümleme özellikleri. (Banhart, 2001; Degischer ve Kirstz, 2002)

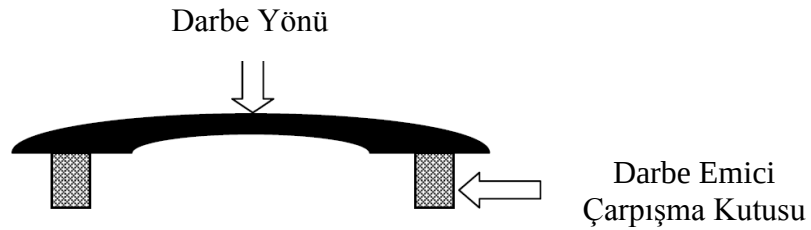


Şekil 4.3 Audi A8'in hücresel metallerle güçlendirilme dizaynı (Degischer ve Kirstz, 2002)

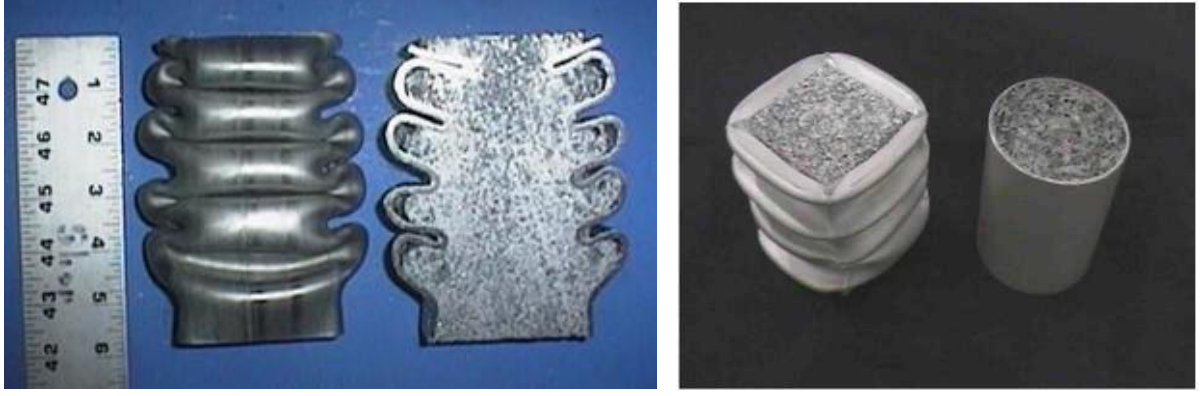


Şekil 4.4 Alüminyum hücresel panelden yapılmış hidrolik kol (Banhart, 2003).

Otomotiv endüstrisinde tampon darbe emicileri, olarak kullanılmaktadır (Şekil 4.5, Şekil 4.6). (Banhart, 2003; Schaeffler vd., 2005)



Şekil 4.5 Darbe emici çarpışma kutuları (Baron, 2000).



Şekil 4.6 İçleri Al hücreli metallerle doldurulmuş darbe emici çarpışma kutuları
(Schaeffler, 2005; Baron,2000)

Testlere tabi tutulan numuneler karşılaştırıldığında, dayanımın %58 arttığı tespit edilmiştir. (Schaeffler, 2005)

4.3 Havacılık ve Uzay Sanayi

Otomotiv endüstrisine benzer bir şekilde havacılık sektöründeki temel beklenti konstrüksiyonları hafif hale getirmektir. Üretimi pahalı olan bal peteği şeklindeki yapılar yerine hücreli metal paneller kullanılabilir. Yüksek ısıya dayanımından ve darbe sönümleme özelliğinden dolayı motor tribünlerde ve bazı motor parçalarında kullanılmaya başlanmıştır. USA Boeing titanyum hücreli metalleri üretimine kullanmaktadır. (Banhart, 2003)

Ayrıca turbo jet motorlarda yanma odası ile tribün bölümü arasında hücreli metal bir halka monte edilerek oluşan ısı düşürülmüştür. (Azzi, vd., 2005)



Şekil 4.7 AMS-02 uydularda koruyucu panel olarak TRD Duocel alüminyum hücreli metaller kullanılmıştır [1]



Şekil 4.8 Uzak mekiklerinde ana taşıyıcı gemiden ayrılma sırasında enerji absorblayıcı olarak hücreli metaller kullanılmaktadır [1]



Şekil 4.9 F 22 savaş uçaklarında ani irtifa değişikliklerinde basınç değişimlerini kontrol eder havalandırıcılar, elektromanyetik dalgaları önleyicileri ve nem tutucular alüminyum hücreli metalden üretilmiştir [1]

4.4 Gemi İnşa Endüstrisi

Gemi inşa sektöründe hafif yüzebilen parçalar dev bir yere sahiptir. Yolcu gemileri bütünüyle ekstrüze alüminyum, alüminyum levha veya bal peteği yapılarından oluşmaktadır. Alüminyum köpük çekirdekli sandviç paneller daha ekonomik olduğunu kanıtlamıştır. Eğer yüzey tabakaları çekirdek malzemesiyle oldukça elastik olan poliüretan yapıştırıcılarla bağlanırsa, mükemmel sönüm davranışlı hafif ve sağlam bir yapı elde edilir. Hücreli metaller ana gemi uygulamaları, ambar platformları, gemi bölmeleri, anten platformları ve fişek ambarları gibi alanları kapsamaktadır (Banhart, 2001).

4.5 Ses İzolasyonu

Alüminyum Hücresel metaller çok iyi ses yalıtımlarından dolayı hem otomotiv endüstrisinde hem de inşaat sektöründe kullanılmaktadırlar. (Miyoshi vd., 2000). Açıkçası tek bir özellik olarak ses yalıtımlarına bakıldığında polimer köpüklere göre ses yalıtım katsayıları daha düşüktür. Fakat bir çok sektörde bu özelliğin yanında farklı bir özellikte aranmaktadır. Örneğin otomotiv endüstrisinde ses yalıtılırken aynı zamanda ısı izolasyonu da sağlanmıştır. (Evans, vd. 2000) Egzoz susturucuları gibi bazı uygulamalarda ise ses yalıtımı ile birlikte titreşim etkileri de yok edilmiştir. (Banhart, 2000b) Buna ait bazı uygulamalar Şekil 4.10'da görülmektedir



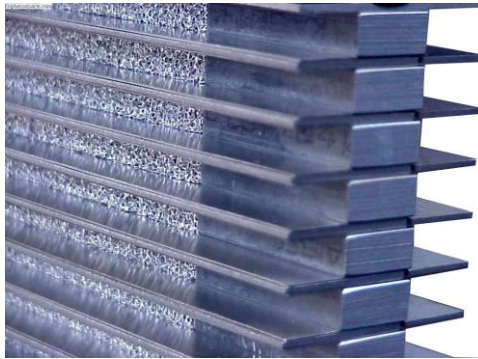
Şekil 4.10 Hücresel alüminyum susturucular, metro tünelleri, otoyol izolasyonu

(Degischer, 2002, [3], Miyoshi, 2000)

4.6 Farklı Alanlarda Kullanılan Hücresel Metal Ürünler

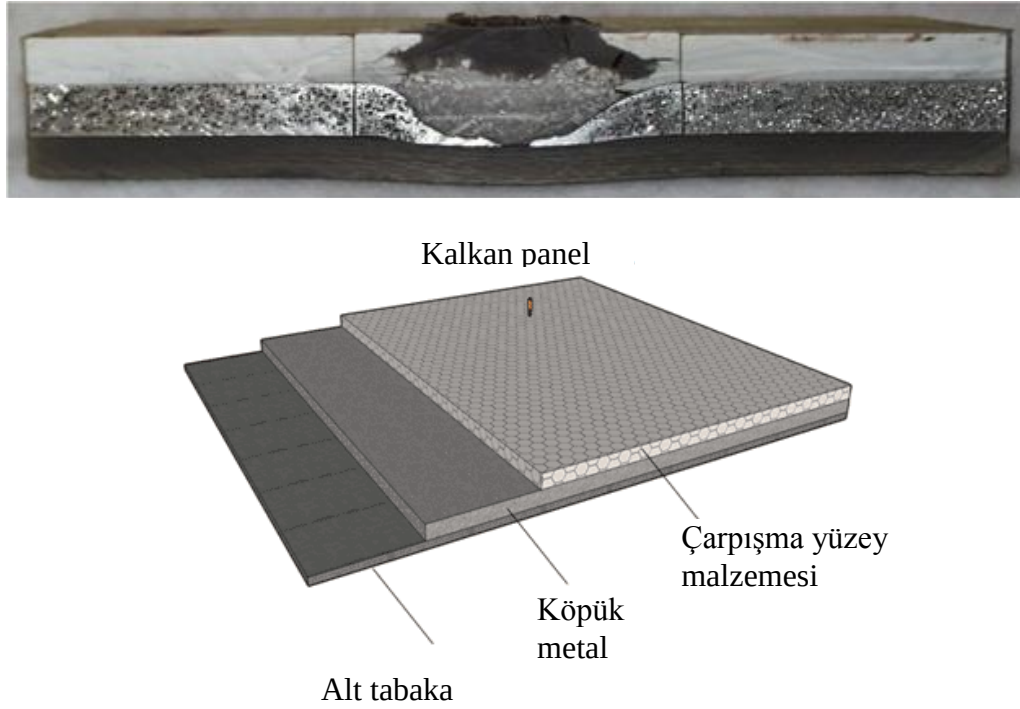
Yukarıda bahsedilen sektörlerin dışında birçok alanda fonksiyonel parça olarak hücresel metaller kullanılmaktadır. Aşağıda bunlara örnekler verilmiştir.

Isı Değiştiricileri: Hücresel alüminyum ısı değiştiricilerinin soğutma kapasiteleri çok yüksektir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Hücresel alüminyum eşanjörler [1]

Patlamalara Karşı Hafifletici Kalkan: Enerjiyi absorbe eder, hafiftir, lamine edilebilir ve geri dönüştürülebilir (Şekil 4.12). (Schaeffler, 2005; [1])



Şekil 4.12 Hücreli alüminyum kalkanlar (Schaeffler, 2005; [2])



Şekil 4.13 Pinomatik araçlarda kullanılan ses önleyicileri ve dinleme cihazlarında rüzgar sesini absorbe eden hücreli alüminyum [1]

Yüksek sıcaklık altında çalışan filtreler, çevre için tehlikeli bir gaz olan NO_x egzoz gazını filtreleyen, büyük yüzey alanlarına sahip filtreler.

Titanyum veya kobalt – krom alaşımlarından üretilmekte olan diş implantları gibi biyomedikal malzemeler.

Kendi kendini yağlayan rulmanlar.

Sıvı akışkanları veya havayı kontrol eden valfler.

Kurşun yerine nikel hücresel metal kullanılan akü elektrotları.



Şekil 4.14 Raylı sistemlerde kullanılan darbe emiciler (Stöbener, 2003, Banhart, 2003)



Şekil 4.15 Hava yağ ayırıştırıcıları [1]

Elektrokimyasal reaktörler, alev tutucular, termal kalkanları, su arıtıcıları, ambalaj veya paketleme elemanları, jeotermal operatörler, tekmelik gibi spor malzemeleri, diğer kullanım alanlarıdır. (Dukhan ve Chen, 2007; Evans vd.,2000; Banhart, 2001)

4.7 Hücresel Metal Üreticileri

Shinko Wire (Japonya) “Alporas”

IFAM (Almanya) “Foaminal”

Cymat / Alcan / Hydro (Kanada)

Neuman (Avusturya) “Alu Foam”

Mepura (Slovakya) “Alulight”

Cambridge University (UK)

Inco (UK) “Incofoam”

ERG (Kanada) “Duocel”

SEAC International “Recemat”

5. DOLU KALIBA DÖKÜM YÖNTEMİ

5.1 Döküm Yöntemlerinin Kalıp Tiplerine Göre Sınıflandırılması

Harcanan kalıp prosesleri ve kalıcı kalıp prosesleri olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir. (ASM Handbook, 1998)

1) Harcanabilir Kalıp Prosesleri

A) Kalıcı Modeller

- Kıl/Su Karışımları: Silis kumu, Olivin kumu, Kromit (Fe – Cr Oksitleri), Zirkon Kumları
- Isıyla Sertleşen Reçine Bağlayıcılar: Kabuk kalıp prosesi, furan yöntemi, fenolik sıcak oda prosesleri, düşük sıcaklıkta sertleşen reçineli prosesler, fırınlanan bağlayıcılı kalıplar.
- Oda Sıcaklığında Sertleşen Bağlayıcılar: Fenolik üretan bağlayıcılı prosesler, furan / SO₂ prosesi, akrilik / epoksi içeren bağlayıcılı sistemler, Fenolik esterler.
- Isı Harici Etkenlerle Sertleşen Reçineler: Furan / asit katalizör kullanılan sistemler, Fenolik katalizör kullanılan sistemler, Üretan sistemleri, fenolik üretan içeren sistemler, poliüretan bağlayıcılı sistemler.
- Silikat ve Fosfat Bağlayıcılar: CO₂ ile sertleşen sodyum silikat bağlayıcılı prosesler, Shaw seramik kalıp prosesleri, Unicast seramik kalıp prosesleri, alümina fosfat bağlayıcılı sistemler.
- Alçı Bağlayıcılı Sistemler : Gypsum (CaSO₄) bağlayıcılı sistemler.
- Bağlayıcı İçermeyen Sistemler: Manyetik kalıplar, Vakum kalıpları

B) Harcanan Modeller

- Köpük Modeller: Dolu kalıba döküm, replicast döküm yöntemi
- Mum Modeller (Hassas döküm yöntemleri): Etil silikat bağlayıcılı blok kalıplar, etil silikat bağlayıcılı seramik kabuk kalıplar, koloidal silika

bağlayıcı sistemler, Alçı Bağlayıcı prosesler, alçak basınç döküm yöntemleri.

2) Kalıcı Kalıp Prosesleri

A) Metal Kalıplar

- Yüksek basınçlı (enjeksiyon) döküm
- Alçak basınçlı (vakum) döküm
- Metal kalıba serbest döküm

B) Santrifüj Döküm

- Dikey santrifüj döküm
- Yatay santrifüj döküm

C) Sürekli Döküm

D) Çoklu Prosesler

- Sıkıştırma döküm
- Yarı katı döküm
- Osprey Prosesi (atomize metal tozları)

5.2 Dolu Kalıba Döküm Prosesleri

5.2.1 Dolu Kalıba Döküm Tarihçesi

Harcanan model tekniklerinden biri olan ve ergimiş metalin köpük modelli buharlaştırması esasına dayanan kaybolan köpükle döküm yöntemi üzerine ilk patent 15.Nisan.1958’de Shroyer’in almış olduğu “Cavityless Casting Mold and Method of Making Same” adlı U.S 2,830,343 nolu patentdir. Shroyer’in yaptığı çalışmalarda modellerin yapımı polistiren yalıtım plakalarının işlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise köpük modellerin etrafı bağlayıcı içeren kum ile doldurularak metal döküm uygulamaları yapılmıştır. Bu yöntem günümüzde halen büyük boyutlu parçaların dökümünde kullanılmaktadır. 1962 yılında M. Flemings bağlayıcı içermeyen serbest kumda polistiren modeller yardımıyla heykel dökümü

gerçekleştirmiştir. T.R. Smith ise bu tarz döküm yöntemini 1964 yılında “ Method of Casting” adıyla patentini almıştır. 1970’lerin sonunda otomotiv sanayisine yönelik parça üreten dökümhanelerde genel maliyetlerin azaltılması ve döküm parçalarının en düşük ağırlıklarda dökülebilmesi amacıyla yaygın olarak kaybolan köpükle döküm yönteminin kullanımına başlanmıştır. (ASM Handbook, 1998)

1981 yılında Smith’in patent süresinin dolması, döküm sonrasında artan işleme maliyetlerini, döküm toleransları dolayısı ile düşürmekte olan ve karmaşık parçalı şekillerin en büyük sorunlarından biri maça sistemlerini devre dışı bırakmasından dolayı son yıllarda metot üzerine birçok çalışma yapılmıştır.

Dolu kalıba döküm tekniği literatürlerde birçok farklı isimle karşımıza çıkar. Bunların arasında kaybolan köpük, buharlaşan model dökümü, boşluksuz döküm, buharlaşan köpük dökümü, dolu kalıp, StyrocastTM, FoamcastTM, StyropurTM, ve PolicastTM örnek verilebilir. 1990’da AFS prosesi tanımlamak için “Harcanan Model Dökümü” (Expendable Pattern Casting) adının kullanılmasına karar vermiştir. (ASM Handbook, 1998; Brown, 2000)

Günümüzde dolu kalıba döküm yöntemi genellikle demir dışı metaller üzerinde uygulama alanı bulmuştur. Bunun en büyük sebeplerinden bir tanesi çeliğin polistiren modelden karbon emiyor olmasıdır. (Brown, 2000a)

1990’lı yıllarda dünyada alüminyum dökümün %10-12’si kum kalıba döküm şeklinde gerçekleşmekte ancak %2-5’i dolu kalıba döküm yöntemini tercih etmekte idi. 2000’li yılların başında dolu kalıba döküm yöntemi %10’u bulmuştur (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 Kullanılan alüminyum üretim prosesleri (Brown, 2000b)

Döküm Yöntemi % Ağırlık (1991)	Amerika	Almanya
Yüksek Basınç (Enjeksiyon) Döküm	60-65	55
Alçak Basınç (Vakum) ve Metal Kalıba Serbest Döküm	20	32
Kum Kalıba Döküm	10	12
Dolu Kalıba Döküm	2-5	Yok
Diğer Yöntemler	<5	<1

5.2.2 Dolu Kalıba Döküm Yönteminin Esasları

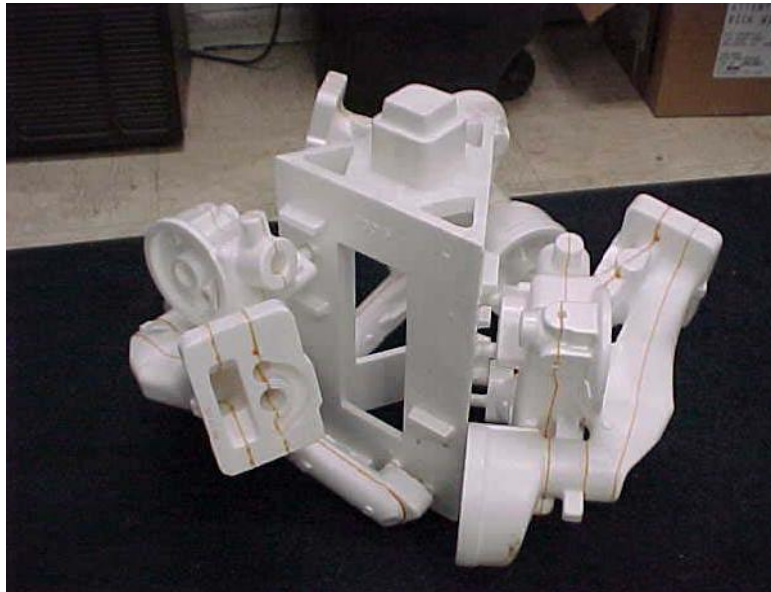
Dolu kalıba döküm hassas dökümdeki gibi harcanan model tekniği çatısı altında olup ana prensipleri ile birbirlerine çok benzemektedirler. Yöntemi hassas dökümden ayıran en büyük fark modelin kalıp içerisinde bırakılması ve eriyik metalin model üzerine dökülmesidir.

Düşük yoğunluktaki polistiren modeller veya ön şekillendirilmiş parçalar döküm sonunda elde edilmek istenen parçaların birer kopyasıdır.

Polistiren modeller çok çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedirler. Alüminyum kalıplar içerisinde buharla şişirilebilirler. Büyük bloklar halinde üretilip bıçaklar yardımı ile veya sıcak tel yöntemi ile kesilerek istenilen şekiller elde edilir. Bu parçalar istenildiğinde yapışkan yardımı ile yapıştırılarak daha büyük ve karmaşık parçalar ya da çoklu dökümler için ağaç (salkım) haline getirilebilir.

Prototip üretimi veya büyük parça dökümleri için çok uygun bir yöntemdir. (Beeley, 2001)

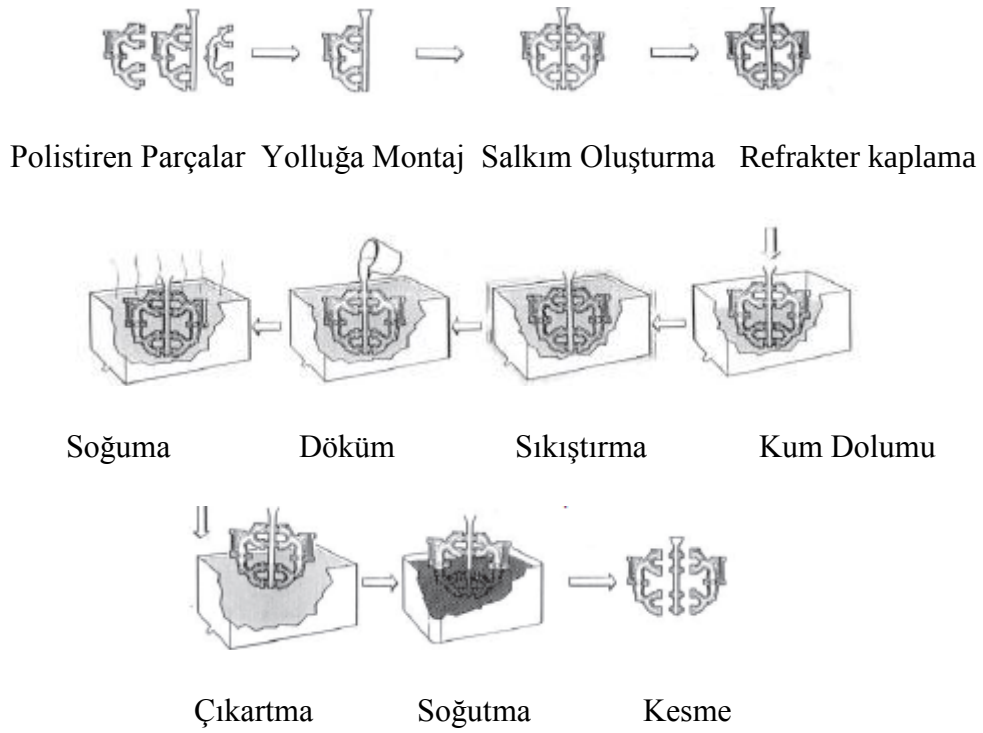
Diğer kum kalıp kullanılan döküm yöntemlerinin aksine bu döküm yönteminde kum bağlayıcısı kullanılmaz. Serbest haldedir. Üretilecek parçanın kopyaları hacmi genişletilmiş (şişirilmiş) polistiren veya özel kopolimerlerdir. Çoklu döküm için polistiren parçalar bir yolluk etrafına yapışkan yardımı ile dizilirler (Şekil 5.1). Oluşturulan ağaç özel refrakter malzeme ile boyanır. Bir derece içerisine yerleştirilerek etrafı kumla doldurulur. Kum vibratör yardımı ile sıkıştırılır. Döküm polistiren model üzerine gerçekleştirilir. Polistiren buharlaşırken yerini eriyik metal alır. (Brown; 2000a)



Şekil 5.1 Çoklu döküm için üretilen salkım (ağaç) [4]

Proses geliştirilirken birçok problemle karşılaşmış ancak tasarımcılar, dökümhaneler, parça üretici mühendisler, polimer üreticileri, refrakter boya üreticileri, ortaklaşa çalışarak bu problemlerin birçoğunu aşmayı başarmışlardır. Böylece yöntem daha az maliyetli ve kalitesel anlamda da daha yüksek seviyelere çıkmıştır (Şekil 5.2).

Örneğin daha önceden de bahsedildiği gibi demir alaşımlarının bu yöntemle dökülmesi bünyenin karbon toplamasından dolayı verimli olmamakta idi. Ancak yeni geliştirilen düşük karbon içerikli kopolimerler kullanılarak yüzey üzerindeki veya yüzey altındaki karbon hataları ortadan kalkmıştır. Yöntem Foseco tarafından geliştirilmiş olup “Low Carbon Bead” adı verilmiştir. (Brown; 2000a)



Şekil 5.2 Dolu kalıba döküm prosesleri (Brown, 2000a)

Döküm parçamız polistiren modelimizin bire bir aynısı olacağından en kritik aşama yüksek kalitede bir polistiren modelin hazırlanmasıdır. Yüzey kalitesi, boyutları, polistirenin yoğunluğu kalite üzerinde etkin rol oynamaktadır.

- Polistiren parçalar üretilir.
- Yolluğa monte edilir.
- Salkım oluşturulur.
- Yüzey refrakter özel boya ile boyanır.
- Dereceye yerleştirilen salkımın altı 25mm ve etrafı serbest kumla doldurulur.
- Kum sıkıştırılır.
- Döküm gerçekleştirilir.
- Parçaların katılaşması beklenir.
- Dereceden çıkarılır.
- Suda veya havada soğutulur.
- Salkımdan kesilerek parçalar çıkarılır.

5.2.3 Köpük Model Üretimi

Günümüze kadar harcanabilir model olarak polistiren tercih edilmiştir, farklı çalışmalar yapılsa da halen geçerliliğini koruyan model malzemesi polistirendir. Çizelge 5.2’de polistirenin şişirilmeden önceki tane boyutları ve kullanım alanları verilmiştir.

Çizelge 5.2: Polistiren tanelerinin Şişirme Öncesi ve Sonrası Tane Boyutu ve Kullanım Alanı
(ASM Handbook, 1998)

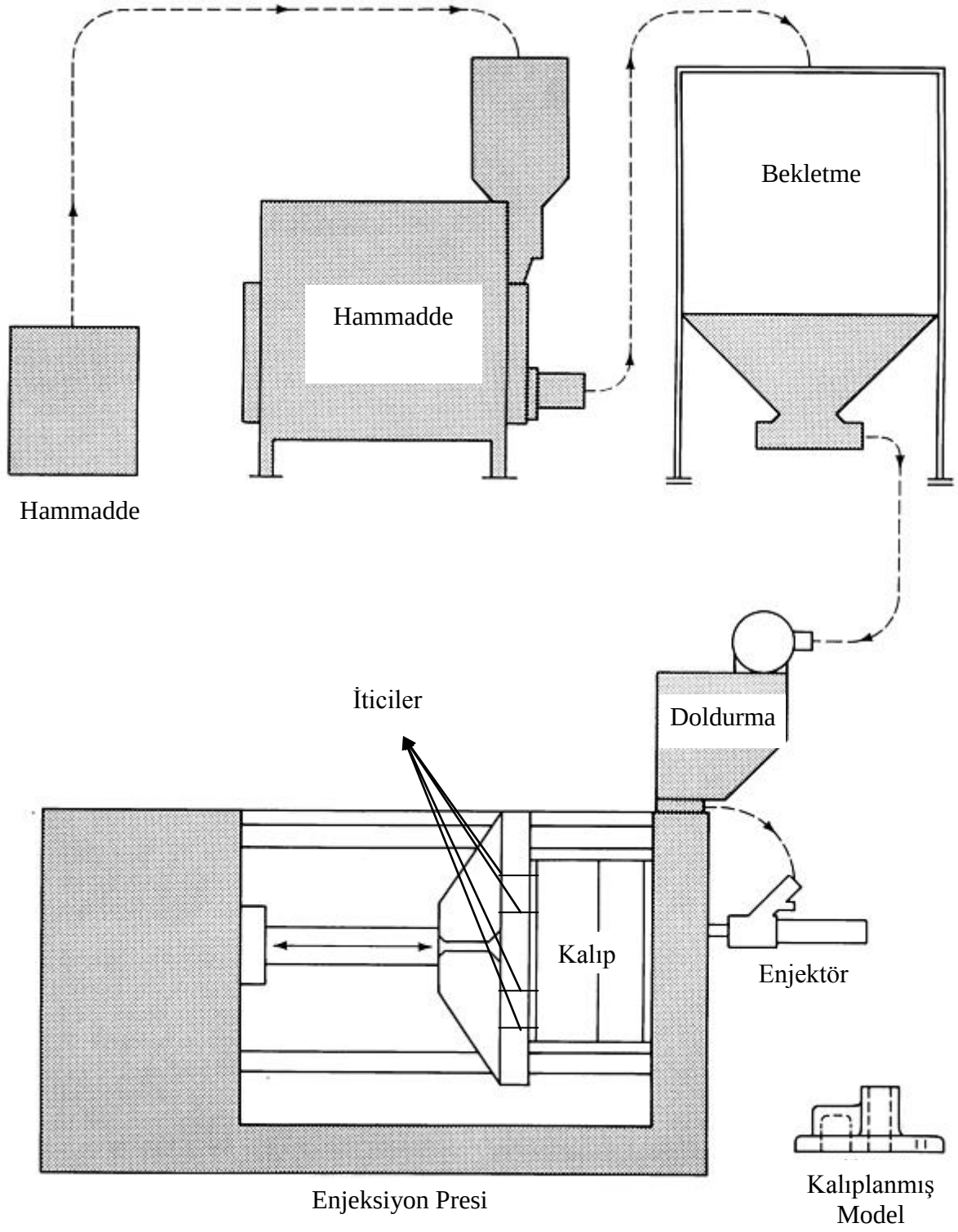
Tane Sınıfı	Şişirme Öncesi Ham Tane Çapı (mm)	24 kg/m ³ deki Tane Çapı (mm)	Kullanım Alanı
A	0,83-2,0	2,5-5,9	İzolasyon
B	0,58-1,2	1,7-3,5	Ambalaj
C	0,33-0,71	1,0-2,1	Kahve Bardakları
T	0,25-0,51	0,74-1,5	Döküm Modeli

Şişirilme öncesinde polistiren yoğunluğu yaklaşık olarak 640 kg/m^3 dür. Harcanan model olarak kullanılabilmesi için ise yaklaşık yoğunluğunun $16 - 27 \text{ kg/m}^3$ arasında olmalıdır. Çizelge 5.3' de döküm alaşımları için uygun örnek yoğunluklar verilmiştir.

Çizelge 5.3 Döküm alaşımlarına göre kullanılabilecek polistiren yoğunluğu
(ASM Handbook, 1998)

Metal	Metalin Dökülme Sıcaklığı (°C)	Harcanan Model Yoğunluğu (kg/m^3)
Alüminyum	705-790	24-27
Pirinç/Bronz	1040-1260	20-21,6
Gri Dökme Demir	1370-1455	≤ 20

Ön şişirme işlemi iki farklı yöntemle yapılabilir. Vakumlu şişiriciler veya buharlı şişiriciler. Şişirme işlemine tabi tutulan polistiren tanecikleri daha sonra kararlı hale gelmeleri için bir müddet bekletilirler. Kalıp içerisine alındıktan sonra ise dört aşama bulunmaktadır. Kalıbı doldurma, sıcak buhar verme, soğutma ve çıkartma evreleri.



Şekil 5.3: Polistiren köpüğün hazırlanması (ASM Handbook, 1998)



Şekil 5.4 Polistiren model üretiminde kullanılan kalıplar [4]

Kalıp boyutları genellikle 600mm x 800mm veya 700mm x 1000mm dir (Şekil 5.4). Küçük parçalar kalıp yüzey boyutları elverdikçe çoklu üretilirler. Bu sayede bir baskıda birden çok parça üretilmiş olur. Parçanın Preslenmesi, kalıbın açılarak harcanacak modelin dışarı çıkması ve kapanarak tekrar preslemeye hazır hale gelmesi yaklaşık 2 dakika almaktadır. Bazı dökümhaneler polistiren modelleri kendileri üretilirken bazıları ise dışarıdaki üreticilerden satın almaktadırlar. (Brown, 2000a)



Şekil 5.5 Polistiren model ve üretilen metal parça (ASM Handbook; 1998)

Polistiren kalıpları baskı öncesinde ön ısıtmaya tabi tutulur. Kalıpların ideal çalışma sıcaklığı 100 °C' dir. Ön ısıtmadan sonra çevrim başlamaya hazırdır. Ön şişirmeden 2 saat sonraki taneler kullanılmalıdır, 12 saatten fazla beklemiş tane kullanılmamalıdır. Çevrim esnasında kalıp kuru kalmalıdır. Doldurma sırasında kalıp içindeki nem taneler ile yer değiştirmez ve model içinde boşluk, açıklık yaratır. Düşük yoğunluktaki tanecikler doldurma sırasında ağır suyu itemez ve modelde izler bırakır. (Littleton ,vd. , 1996)



Şekil 5.6 Polistiren model [4]

5.2.4 Polistiren Bloklardan İşleme Yoluyla Model Yapımı

Bu yönetime genellikle kalıplama yapılamayacak kadar büyük parçaların üretilmek istenmesinde, prototip veya sınırlı sayıda yapılacak döküm üretimlerinde, üretilmek istenen parçanın kalıplamaya uygun olmaması durumunda başvurulmaktadır. Bazı durumlarda, Polistiren levhaların kesimi ve elle yapıştırılması yoluyla uygun model yapımı sağlanabilir.

Her bir yeni parça için üretime geçmeden önce prototip çalışması yapılması zorunludur ve bu teknik model hazırlamada işlemin esas kısmıdır. Köpük parçaları kusursuz bir maça olarak dökümde, yerleştirilerek kullanılır.

Polistiren bloklardan bir model çıkarmak için bazı klasik yöntemlere özel nitelikler katarak işlem yapılır. Normal işaretleme ve ölçüm cihazları çentik açarak veya başka şekillerde köpükte hasara yol açar. Polistiren köpük blokların işaretlenmesinde yumuşak uçlu kurşun kalem veya keçeli kalemler kullanılabilir. Ölçümden şeffaf cetvel veya kumpas kullanılır. (ASM Handbook, 1998)

Genişletilmiş polistiren farklı teknik kullanımı ile arzu edilen şekilde işlenebilir. Polistiren kütükler veya levhalar bir bıçak veya sıcak telle kesilebilir, işlenebilir, talaş kaldırılabilir. şekillendirme tahta işleme aletleriyle yapılabilir ki bunlar ucuz ve kolayca tedarik edilir. Makine işlemelerinde besleme ve hız ayarlanarak istenen yüzey kalitesinin elde edilmesi sağlanır. Elle parçayı yavaşa ve düşük basınçla işlemeye vermek en iyi sonucu verir.

şerit testereler kolayca kullanılabilir. Diş aralığı 0,3 ile 0,5 mm arasında olan testerelerle en iyi sonuç elde edilebilir. Klasik takımlarla frezelemede yapılabilir. Bu işlemde yüksek hız kullanımı ile parça makineye beslenir.

Polistiren kütükler 0,5-0,8 mm çapındaki Ni-Cr sıcak telle kesilebilir. Telin uzun ömürlü olması için 500 °C civarında çalışması gerekir. Kütük besleme zamanı telin sıcaklığı ve kesit kalınlığına bağlı olarak değişir. (Monroe, 1992)

Parçaları kesildikten sonra bir araya getirilebilir. Normal olarak bu işlem elle yapılır ki bu işlem yapıştırıcı kullanımı ile gerçekteştirilir. Orijinalde lastik, çimento, sıvı yapıştırıcılar veya sıcak erimiş yapıştırıcılar kullanılır. Yapıştırıcının miktarını azaltmak için özen göstermek gerekir çünkü yapıştırıcının döküm üretiminde ters etkisi vardır. Genelde az miktarda yapıştırıcı parçaların bir arada tutulması için yeterlidir. (ASM Handbook , 1988 ; Monroe , 1992)

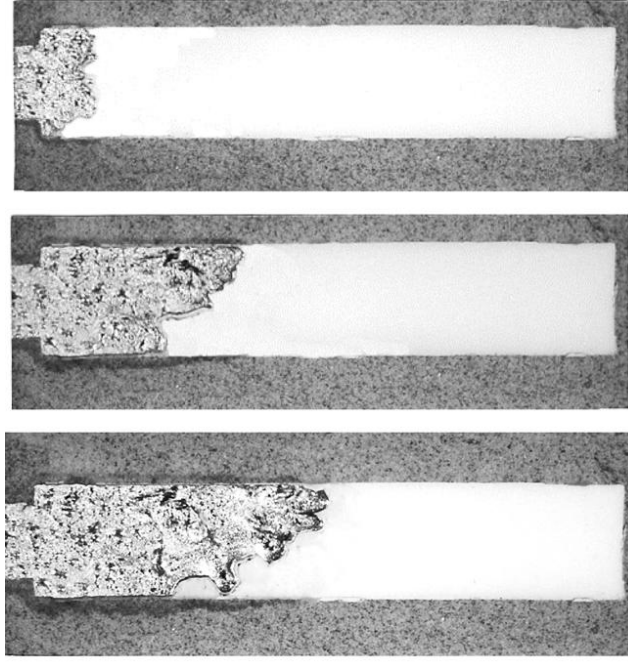
5.2.5 Polistiren Modellerin Kaplanması ve Modelin Kumla Desteklenmesi

Dolu kalıba döküm yönteminde modeller refrakter bir malzeme ile kaplanmasa dahi döküm yapılabilmektedir. Ancak prosesten maksimum verim almak için kaplama uygulamak gerekmektedir.

Kaplamanın farklı yararları vardır. İlki kumun kaba yüzeyi ile köpüğün kaygan yüzeyi arasında bir bariyer oluşturur. İkincisi ise buharlaşan polistiren gazlarının kuma kontrollü bir şekilde geçmesi sağlanır.

Farklı döküm malzemeleri için farklı kaplamalar kullanılmalıdır. Örneğin alüminyum dökümlerde düşük geçirgenliğe sahip kaplamalar kullanılmakta iken demir alaşımlarında yüksek geçirgenlik diğer demir dışı metallerde ise orta derecede geçirgenlik aranmaktadır.

Kaplama kalınlıkları üzerinde de bir takım çalışmalar yapılmış ve kaplama kalınlığının arttıka kalıbın dolum süresinin de uzadığı gözlenmiştir (şekil 5.7). (ASM Handbook, 1998; Sands ve Shivkumar, 2003)



Şekil 5.7 Kaplama ve kum boyutuna bağlı olarak ilerlemenin incelenmesi (Sands, 2003)

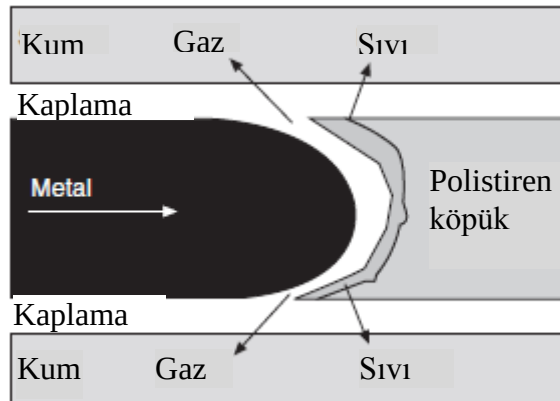
Diğer döküm yöntemlerine benzer biçimde dolu kalıba döküm yönteminde de destek malzemesi olarak kum kullanılmaktadır. Polistiren salkımı refrakter ile kaplandıktan sonra tek parçalı bir derece içerisine yerleştirilir ve bağlayıcı içermeyen kumla etrafı doldurulur. Bağlayıcısız kum genellikle yağmurlama sistemi ile dereceye doldurulur. Yağmurlama derecenin yavaş biçimde dolması sağlayarak kumun yana doğru hareket ile köpük döküm salkımının bozulmasını engeller (Şekil 5.10). Doldurma sırasında derece yüksek frekanslı bir sıkıştırma sistemi ile yanlardan veya tabandan titreştirilerek sıkıştırılır. Yine aynı şekilde kum boyutunun incelenmesi ile eriyiğin ilerlemesi yavaşlamaktadır. (ASM Handbook, 1998; Sands ve Shivkumar, 2003)



Şekil 5.8 Polistiren modellerin kaplaması [4]

5.2.6 Döküm Prosesi

Diğer kum kalıba döküm yöntemlerine benzer şekilde gerçekleştirilir. Yolluğun başına bir döküm havuzu oluşturmak her zaman faydalıdır. Serbest kumun döküm içerisine girmesi engellenir. Metal sıcaklığı diğer tüm dökümlerde olduğu gibi önemli bir etkidir. (ASM, Handbook, 1998)



Şekil 5.9 Metalin polistiren boyunca ilerlemesi (Brown, 2000a)

Aslına bakıldığında diğer döküm yöntemlerinden farklı olarak bu proseste eriyik metal sadece hava ile yer değiştirmek zorunda kalmaz farklı parametrelerde işlemin içine katılır. Kalıp içerisindeki hava kalıbın % 97 sini oluştursa da milyonlarla küçük polistiren kapalı hücrelerinin içinde hapsolmuştur. Metal önce bu ince polimer zarı ile karşılaşır. Bu zarı aştığında havayı serbest bırakmış olur. Bunu yaparken bazı durumlarda metal içerisine bu gaz boşlukları kalabilmektedir. Gaz kaplamaya ulaşmadan metal içerisinde katılaşır. Buna sebep veren en büyük etken türbülansdır. Bu yöntemde türbülans etkileri diğer metotlardan çok da kötüdür (Şekil 5.9). (Caulk , 2006)



Şekil 5.10 Polistiren modellerin derece içerisine kumla yerleştirilmesi [4]

5.3 Dolu Kalıba Döküm Yönteminin Avantajları

Dolu kalıba döküm teknolojisi klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında birçok avantajı olduğu görülür.

- Basit bir uygulama sistemine sahiptir.
- Dökümhane ilk yatırım maliyeti düşüktür.
- Hassas dökümle karşılaştırıldığında işletme maliyeti düşüktür.
- Kalıp ayırma çizgisi bulunmamaktadır. Bu çizginin yok edilmesi için harcanacak enerjiye gerek kalmaz.
- Maça kullanılmaz. Böylece operatöre bağlı ya da maçadan kaynaklanabilecek hatalar bertaraf edilmiş olur.
- Bağlayıcı içermeyen kumun kullanımı ile kum hazırlama işlemleri basit hale gelmiştir, ekonomikleşmiştir.
- Kum bağlamak için kullanılan ekipmanlar ve bakım maliyetleri ortadan kalkar.
- Döküm işlemindeki kum harcama miktarı oldukça azalmıştır,
- Kullanılan kum tekrar tekrar kullanılabilir. Bağlayıcı içermediği için aynı zamanda ekolojiktir.
- Tek parçalı derece ile döküm yapılır.
- Döküm sonrası parçanın temizlenmesinde sadece ince refrakter tabakasının uzaklaştırılması gerekmektedir ki bu sayede parça temizleme maliyetlerinde % 80'e varan tasarruflar elde edilmektedir.
- Nihai ürüne çok yakın ölçülerde parça elde edilir. Çok dar toleranslarda dahi ürün üretimi yapılabilir.
- Kompleks parçaları üretimine olanak sağlar.
- Prototip üretimine uygundur.
- Polistiren model üretim kalıpları alüminyumdan imal edildiği için diğer kalıp kullanan metotlara göre çok daha ucuzdur.

Yöntemin birçok avantajının yanında otomasyon elverişli olmaması bir dezavantajdır. Sistem hızı işçilere bağlı olarak değiştirmektedir. (ASM Handbook, 1998; Brown, 2000a)

5.4 Kullanım Alanları

Üretiminde dolu kalıba döküm yönteminin kullanıldığı bazı malzemeler ve kullanım alanları Çizelge 5.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 Kullanım alanları

Alüminyum	Gri Dökme Demir	Küresel Grafitli Dökme Demir
-Emme Manifoltları	-Çeşitli Gövdeler	-Boru Bağlantıları
-Pistonlar	-Valfler	-Valfler
-Silindir Blokleri		-Dişli Göbekleri
		-Diferansiyel Gövdeler
		-Manifoltlar,
		-Çeşitli Braketler

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

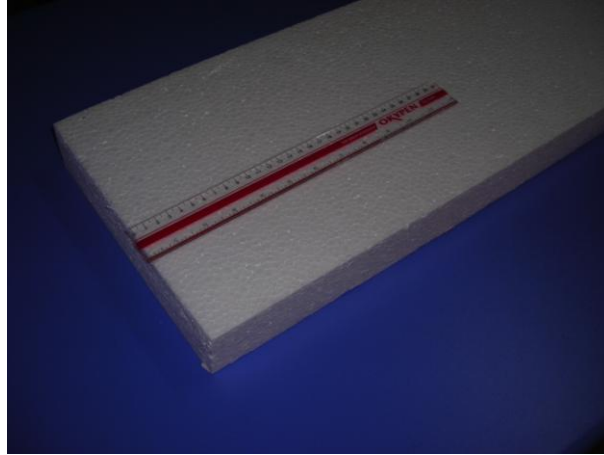
Yıldız Teknik Üniversitesi Balkan İleri Döküm Teknolojileri Merkezi (BCACT) laboratuvarında polistiren model kullanılarak açık hücreli alüminyum hücresel metal üretimi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İzolasyon için kullanılan polistiren levhalar saçtan 5 x 5 parçalar halinde kesilerek önceden şekillendirilmiş bir şablon yardımı ve dikey matkap kullanılarak hücresel hale getirilmiştir. Şekillendirilen açık hücreli polistiren modeller dolu kalıba döküm yöntemi kullanılarak alüminyum döküm gerçekleştirilmiştir. Bu sayede açık hücreli alüminyum metal üretilmiştir.

6.1 Deneylerde Kullanılan Cihaz ve Malzemeler

Deneylerde kullanılan cihaz ve malzemeler aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

6.1.1 Polistiren Isı Yalıtım Levhaları

Ticari amaçla satılan ısı yalıtımında kullanılan polistiren levhalar kullanılmıştır. Standart boyutları 500 mm x 1000 mm x 50 mm olup istenildiğinde farklı kalınlık ve ölçülerde kesim yapılarak üretilmektedir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Polistiren levhalar

Şişirilen polistiren tanelerin ortalama çapı 5 mm' dir (Şekil 6.2). Polistiren ısı yalıtım malzemelerinin yoğunlukları 15 ila 30 kg / m³ olarak değişmektedir. Deneylerde kullandığımız levhaların yoğunluğu 20 kg / m³ dür.



Şekil 6.2 Polistiren tane çapları

Çizelge 6.1 Polistirenin fiziksel ve kimyasal özellikleri [5]

Fiziksel Özellikler		Mekanik Özellikler	
Yumuşama Noktası	90 ° C	Akmada Gerilme Direnci	190 kg / cm ²
Isı ile Bükülme Sıcaklığı	80 ° C	Kopmada Gerilme Direnci	220 kg / cm ²
Erime Akış İndisi (200 °C,5kg)	2-5 g/10 dak	Kopmada Uzama	% 40-70

6.1.2 Dik Kesim Şablonu

500mm x 1000mm x 50 mm olan standart polistiren levhalarından 50mm x 50mm x 50mm küplerin kesilmesinde alüminyum kesim şablonu kullanılmıştır (Şekil 6.3).

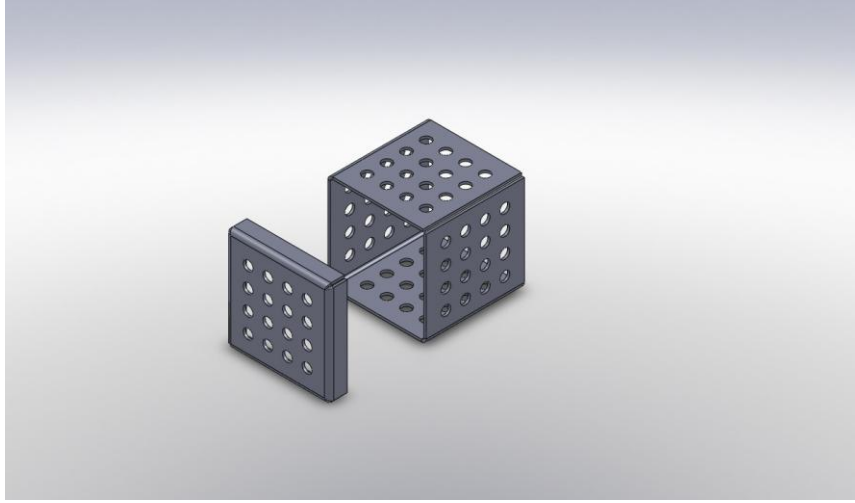


Şekil 6.3 Dik kesim şablonu

6.1.3 Delme Şablonu

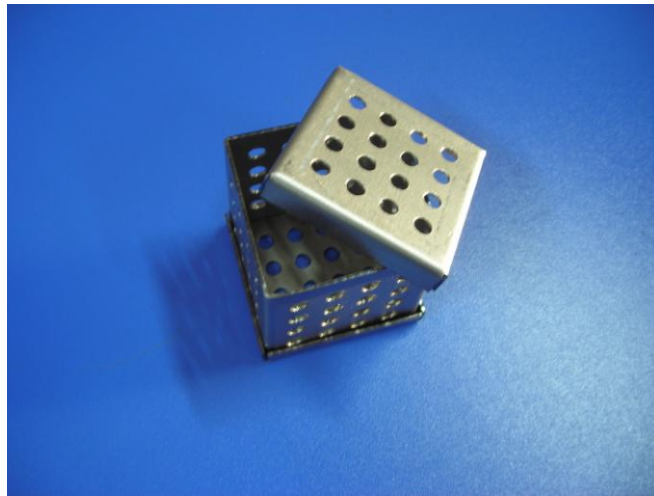
Polistiren küplerde, sütunlu matkaplarla açılacak deliklerin birbirine dik ve paralel olması için sac delme şablonu Solidworks' de tasarlandı (Şekil 6.4). Tasarı aşamasında üç önemli nokta vardı.

- A. Delik çaplarının eşit olması gerekmekte.
- B. Aynı yüzeydeki delikler birbirine paralel, farklı yüzeylerdeki delikler ise dik olmalı.
- C. Tüm yüzeylerden delindiğinde polistiren yapı zayıflayacağından şablon ayrılabilmeli.



Şekil 6.4 Şablon tasarımı

Tasarlanan şablon hassasiyeti sağlaması amacı ile lazer kesim cihazında kesilmiş delikleri açılmış ve abkant preslerde şekillendirilmiştir. Kesim ve şekillendirme işlemi Balıkesir Aydınlar Metal A.Ş. tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 Üstü ve altı açılabilen sac delik şablonu

6.1.4 Sütunlu Matkap

Küp metallerin delinmesinde kullanılmıştır.

6.1.5 Kaplama Boyası (Refrakteri)

Polistiren modellerin yüzeyinin kaplanmasında kullanılan refrakter alümina bazlı olup Meta-Mak firmasından tedarik edilmiştir. Kullanılan ürün Alman Ashland-Südchemie firmasının ticari ismi Polytop FS 6 isimli ürünüdür. (Şekil 6.7) Çizelge 6.2’ de fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 6.2 Polistren Modelin Kapanmasında Kullanılan Polytop FS 6’ nın Özellikleri
(Ashland-Südchemie teknik bilgi formu)

Renk	Kırmızıya Yakın
Katı Miktarı , %	55.3-58.3
Özgül Ağırlık , g/cm ³	1.48 – 1.66
Viskozite (Ağdalık) , Pa.s	6.7 – 8.8

6.1.6 Yapıştırıcı

Polistiren modelin çıkıcı ve yolluğa bağlanabilmesi için termoplastik esaslı ticari ismi Develux olan yapıştırıcı kullanılmıştır. Ayrıca yapıştırıcının ara geçişlerdeki yani yolluk ve çıkıcı bağlantılarındaki mukavemetini arttırmak amacıyla maskeleme bandı kullanılmıştır.

6.1.7 Polistiren Modellerin Kalıplanmasında Kullanılan Dereceler

Yolluk ve çıkıcısı yapıştırılmış refrakterle kaplanmış numunelerin serbest kumla titreşim altında kalıplanması amacıyla dereceler kullanılmıştır.

6.1.8 Kum

Polistiren modellerin derece içerisinde kalıplanmasında AFS-35 tipinde silis kumu kullanılmıştır.

6.1.9 Karıştırıcı

Refrakter çamurunun su ile karıştırılması için Janke & Kunkel RW 20.n IKA – LTS marka 240 – 2000 devir/dakika 70/30 watt motor gücündeki karıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 Refrakter çamurunun su ile karıştırılması için kullanılan karıştırıcı

6.1.10 Titreşim Makinesi

Derece içerisinde modelin serbest kumla hazırlanması aşamasında Octagon 200 , Endecotts Limited marka 50 hertz frekansla titreşim aralığı 0-10 olan titreşim makinesi (Şekil 6.7) kullanılmıştır.



Şekil 6.7 Titreşim makinesi

6.1.11 İndüksiyon Güç Kaynağı (LEPEL)

Üretilen polistiren modellerin alüminyum döküm deneylerinde metal ergitme için Lepel marka LSS 15 kW 200 kHz ile çalışan indüksiyon güç ünitesi kullanılmıştır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 İndüksiyon güç ünitesi ve pota

6.1.12 Kullanılan Alaşımlar

Deneyler sırasında Döküm alaşımı olarak Etial - 140 (A413-ALSi12) ve işlem (dövme) alaşımı olarak Etial - 60 (A6063) alaşımları kullanılmıştır.

Çizelge 6.3 Etial 140 Kimyasal Bileşimi

Al	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Pb	Sn
Kalan	0,60	11,5-13,5	0,10	0,40	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05

Çizelge 6.4 Etial - 60 Kimyasal Bileşimi

Al	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti
Kalan	0,30	0,30-0,70	0,10	0,20	0,40-0,90	0,10	0,05	0,10

6.2 Deneysel Çalışmalar

- Polisitren levhalar 48 x 48 x 50 bloklar halinde kesilir.
- Şablon içerisine yerleştirilerek tüm yüzeylerden dikey matkap ile delme işlemine tabi tutulur.
- Hazırlana polistiren modeller yapıştırıcı ile kesilen yolluk etrafına yapıştırılarak

salkım elde eldir.

- Refrakter boya ile kaplanarak kurutulur
- Furan yöntemi kullanılarak kum yolluk ağzı hazırlanır.
- Boyası kurumuş polistiren modeller döküm derecesi içerisine yerleştirilir.
- Etrafı titreşim makinesinde kum ile beslenir.
- Yolluk ağzı kum ve kalıp arasında yüzeye yerleştirilir.
- İndüksiyon ocağında (LEPEL) ergitme işlemi tamamlanır.
- Yaklaşık 750 - 830 °C' de alüminyum dökümü gerçekleştirilir.
- Dökülmüş parçalar dereceden çıkarılır.

6.2.1 Polistiren Küplerin ve Yolluğun Hazırlanması

500mm x 1000mm x 50mm levhalardan önce şeffaf cetvel yardımıyla ölçü işaretleri konulmuş ve bu işaretler yardımı ile maket bıçağı kullanılarak 500 mm x 48mm x 50mm şeritler elde edilmiştir.

Daha sonra bu şeritler kesim şablonu içerisine yerleştirilerek 48mm x 48mm x 50mm olarak dilimlenir. Yine maket bıçağı yardımı ile polistiren levhadan yolluk hazırlanır (Şekil 6.9).

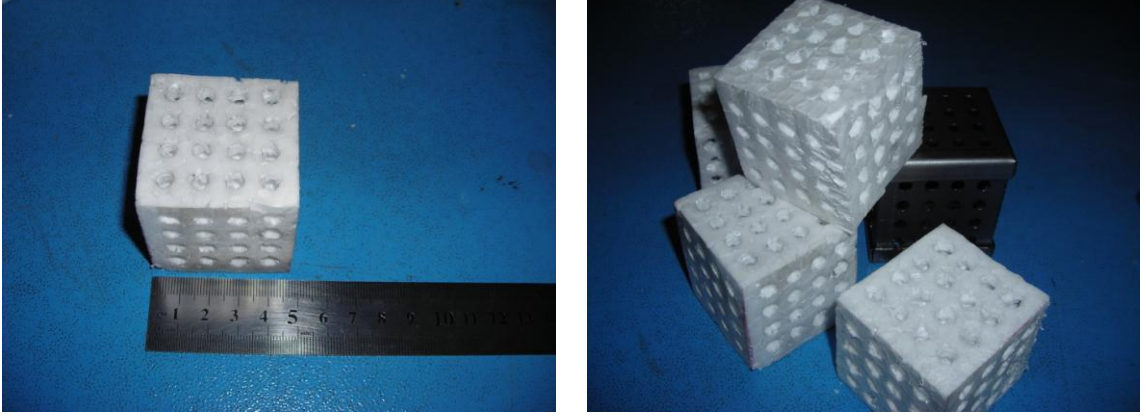


Şekil 6.9 Boyutlandırılmış polistiren

6.2.2 Delme

Boyutlandırılmış polistiren küpleri şablon içerisine yerleştirilerek sütunlu matkap yardımı ile

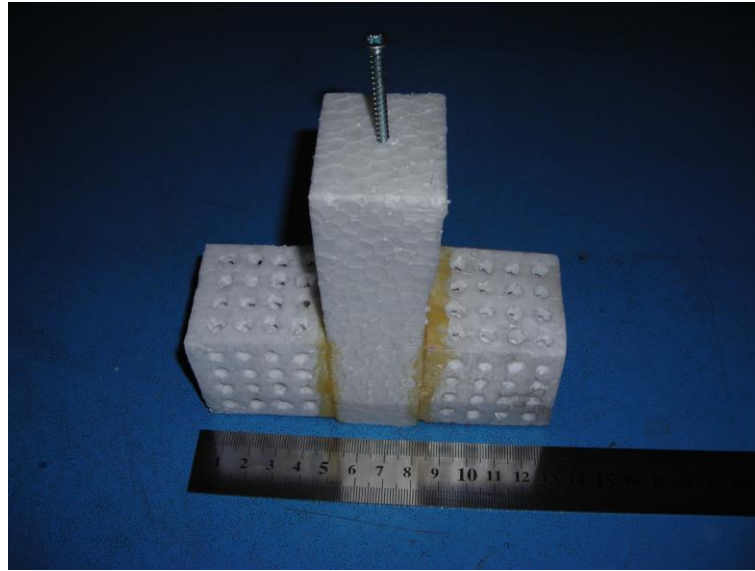
delinir. Delme işlemi sırasında matkabın talaş kaldırarak deliği oluşturması önemli aksi takdirde polistiren küplerden istenmeyen parçalar kopmaktadır. Aynı şekilde delme işlemi uygun hızda yapılmalıdır. Delme işlemi 5 mm lik matkap ucuyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.10 Delinmiş polistren bloklar

6.2.3 Salkımın Oluşturulması

Oluşturulan bloklar kesilen yolluk etrafına özel yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılır. Kuruması beklenir. Aksi halde direkt refrakterle kaplanmaya çalışıldığında refrakterdeki suyun yapışkanı çözdüğü görüldü (Şekil 6.11).

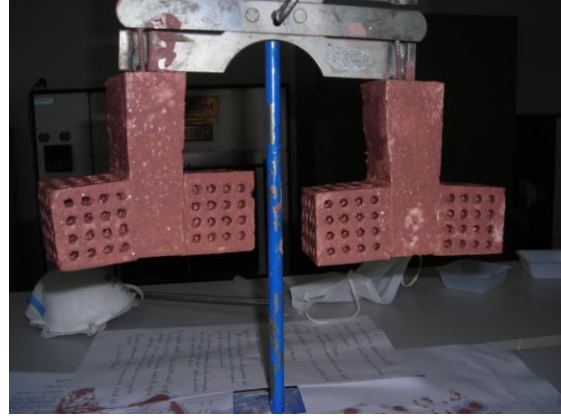


Şekil 6.11 Yolluğa sabitlenmiş iki adet hücresel metal modeli

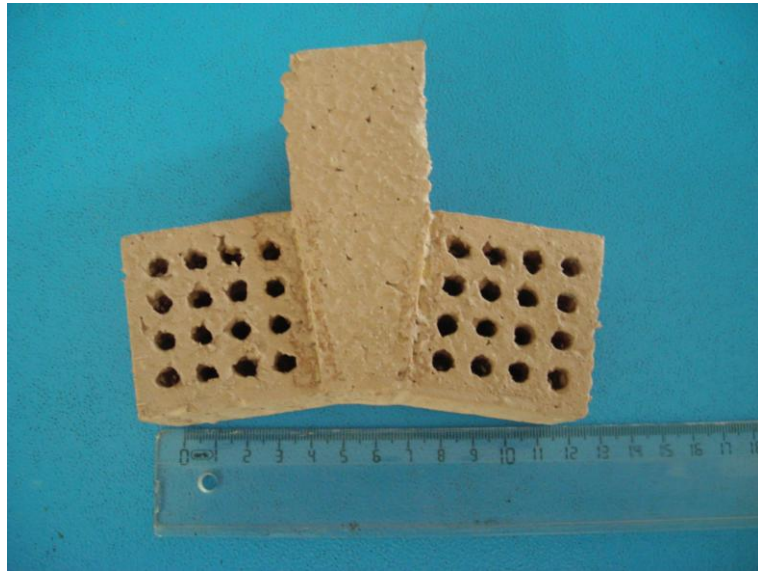
6.2.4 Refrakter ile Kaplama ve Kurutma

Hazırlanan salkım sulandırılan ve karıştırıcı ile karışması sağlanan özel boya ile boyanır. Boyama sırasında boyanın deliklerin arasına iyi işlemesine dikkat edilmelidir. Daha sonra

kuruması içi asılır (Şekil 6.12).



Şekil 6.12 Refrakter boya ile kaplama ve kurutma



Şekil 6.13 Kurumuş hazır harcanabilir model

6.2.5 Yolluk Ağız Hazırlama

Furan prosesi kullanarak reçine ve kum modelde şekillendirilerek yolluk ağızı (metal havuzu) üretilir. Şekil 6.14’de hazırlanan yolluk ağızları görölmektedir.



Şekil 6.14 Yolluk ağzı üretimde kullanılan model ve üretilen yolluk ağızları

6.2.6 Dereceye Yerleştirme

Titreşim makinesi üzerine yerleştirilen derecenin dibine kum serpilerek taban oluşturulur. Oluşturulan bu taban üstüne hazırlanan salkım yerleştirilir. Kum boşaltılırken titreşim makinesi de çalışmaktadır. Model delik aralarına kumun girmesi modelin dayanabilmesi açısından çok önemlidir. Yolluğun en tepe noktasına ulaşana kadar kum doldurulur.

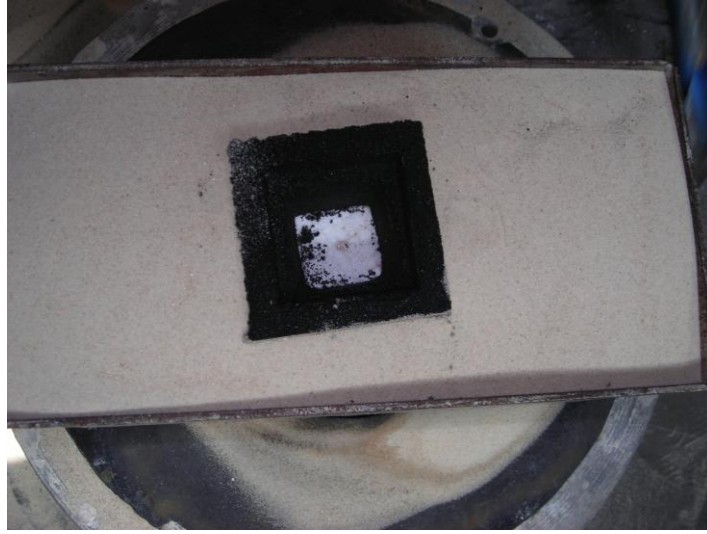


Şekil 6.15 Derece içerisine yerleştirilmiş model

6.2.7 Yolluk Ağızının Konulması

Hazırlana yolluk ağzı model üzerine yerleştirilerek etrafı kum ile kaplanır. Yolluk ile yolluk ağzı arasında boşluk oluşmamasına dikkat edilmelidir. Oluşabilecek boşluklardan metal yürüyerek modelle yer değiştirmeyecektir. Yolluk ağzı yerleştirildiğinde yolluğa dökülen kum

temizlenmelidir. Aksi takdirde metale karışacak ve boşluk oluşturacaktır.



Şekil 6.16 Yolluk ağzının yerleştirilmesi

6.2.8 İndüksiyon Ocağında Ergitme İşlemi

Hesaplanan hacme göre tartılarak (650 gr) pota içerisine konulan alüminyum parçalar LSS 15 kW 200 kHz ile çalışan Lepel marka indüksiyon güç ünitesinde ergitmeye alınır.



Şekil 6.17 Ergitme işlemi

Dökümler sırasında bileşimleri Çizelge 6.3 ve 6.4’de belirtilmiş olan Etial - 140 ve Etial - 60 alaşımları kullanılmıştır.

6.2.9 Döküm

Deneyler sırasında dökümler yaklaşık 750 – 830 °C gerçekleştirilmiştir. Türbülans oluşmasına

izin vermeden döküm gerçekleştirilir.



Şekil 6.18 Ergimiş alüminyum ve döküm

6.2.10 Dökülen Parçaların Dereceden Çıkarılması

Döküm işlemi sonrasında soğuma gerçekleştiğinde derecedeki kum boşaltılır. Bu kum hiçbir bağlayıcı içermediğinden tekrar kullanılabilir. Şekil 6.19’ da dökülen parçalar gözükmemektedir.



Şekil 6.19 Dökülen parçalar

Dökülen parçalar daha sonra yollukta testere yardımı ile kesilerek çıkarılmıştır (Şekil 6.20).



Şekil 6.20 Yolluğundan alınmış parçalar

6.3 Deney Koşulları

5 farklı deney yapılmış her deney sonucunda 2 hücrel metal üretilmiştir.

Çizelge 6.5 Deneyler

	Deney 1	Deney 2	Deney3	Deney 4	Deney5
Alaşım	6063	140	140	6063	6063
Döküm Sıcaklığı	830	750	750	830	820
Hammadde	Hurda	Külçe	Külçe	Biyet	Hurda

Deney 1 sonucunda Numune 1 ve Numune 2 elde edilmiştir.

Deney 2 sonucunda Numune 3 ve Numune 4 elde edilmiştir.

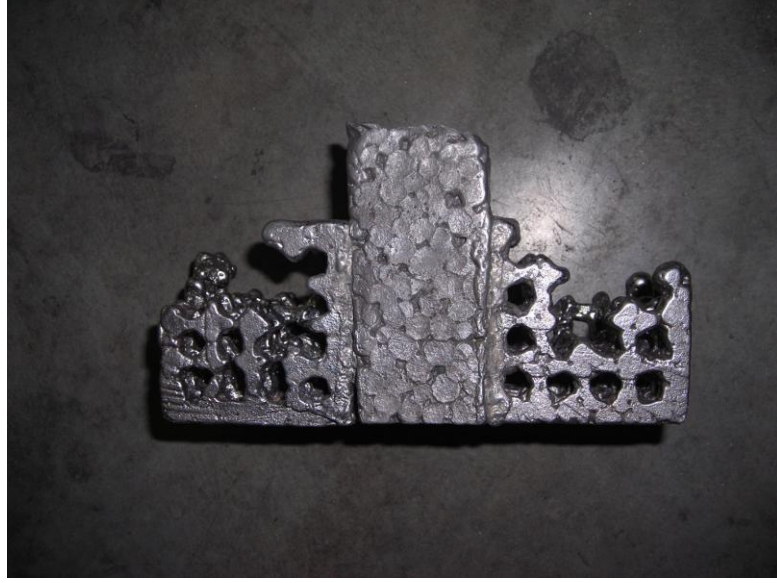
Deney 3 sonucunda Numune 5 ve Numune 6 elde edilmiştir.

Deney 4 sonucunda Numune 7 ve Numune 8 elde edilmiştir.

Deney 5 metal ilerleme şeklinin belirlenmesi için eksik döküm yapılmıştır.



Şekil 6.21 Etial - 60 ve Etial - 140 numuneler



Şekil 6.22 Deney 5 eksik döküm

6.4 Deney Numunelerinin İncelenmesi

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen parçaların dolu ağırlıkları hesaplanarak, elde edilen hücresel metallere karşılaştırılmıştır.

Her döküm deneyinden 1 numuneye basma deneyi uygulanarak basma dayanımları hesaplanmıştır.

Basma deneyleri sonrasındaki boyları ile ilk boyları karşılaştırılarak % deformasyonları hesaplanmıştır.

6.4.1 % Ağırlık Değişimi (Dolu Malzeme - Hücresel Metal)

Numunelerin % ağırlık değişimleri hesaplanarak boşluk hacimleri belirlenmiştir. Hesaplanan bu veriler Çizelge 6.6' da gösterilmiştir.

Numune 2: Etial - 60 ρ :2,71 gr/cm³

Ağırlık: 126,73 gr

Dolu Hacim = 4,8 x 4,5 x 4,6 = 99,360 cm³

Dolu Ağırlık = 99,360 x 2,71=269,26 gr

Numune 5: Etial - 140 ρ :2,66 gr/cm³

Ağırlık: 126,92 gr

Dolu Hacim = 99,176 cm³

Dolu Ağırlık = 263,80 gr

Numune 4: Etial - 140 p:2,66 gr/cm³

Ağırlık: 123,27 gr

Dolu Hacim = 103,684 cm³

Dolu Ağırlık = 275,79 gr

Numune 7: Etial - 60 p:2,71 gr/cm³

Ağırlık: 126,73 gr

Dolu Hacim = 110,54 cm³

Dolu Ağırlık = 299,57 gr.

Çizelge 6.6 Ağırlık değişimi %

	Hacim (cm ³)	Ağırlık Hücresel (gr)	Ağırlık Dolu (gr)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ağırlık Değişimi (%)	Boşluk Hacmi (cm ³)
Numune 2	99,36	126,73	269,26	2,71	52,93	52,59
Numune 5	99,17	126,92	263,80	2,66	51,88	51,45
Numune 4	103,68	123,27	275,79	2,66	55,30	57,33
Numune 7	110,54	137,12	299,57	2,71	54,22	59,94

6.4.2 Basma Dayanımları

Hesaplama yapılırken yüzeyde bulunan 16 adet deliğin yüzey alanı basma yüzey alanından çıkartılmıştır.

Numune 1: Etial - 60 Basma Yüzey Alanı: (En x Boy) – (16 x Delik Yüzey Alanı)

$$(44 \times 46) - (16 \times 19,625) = 1710 \text{ mm}^2$$

Maksimum Yükleme Test Değeri: 18 ton

Basma Dayanımı: $18\,000 \times 9,81 / 1710 = 103,2 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}$

Numune 6: Etial - 140 Yüzey Alanı: 1766 mm²

Maksimum Yükleme Test Değeri: 15,6 ton

Basma Dayanımı: $15.600 \times 9,81 / 1766 = 86 \text{ N/mm}^2$ (MPa)

Numune 8: Etial - 60 Yüzey Alanı: 1754 mm²

Maksimum Yükleme Test Değeri: 15,8 ton

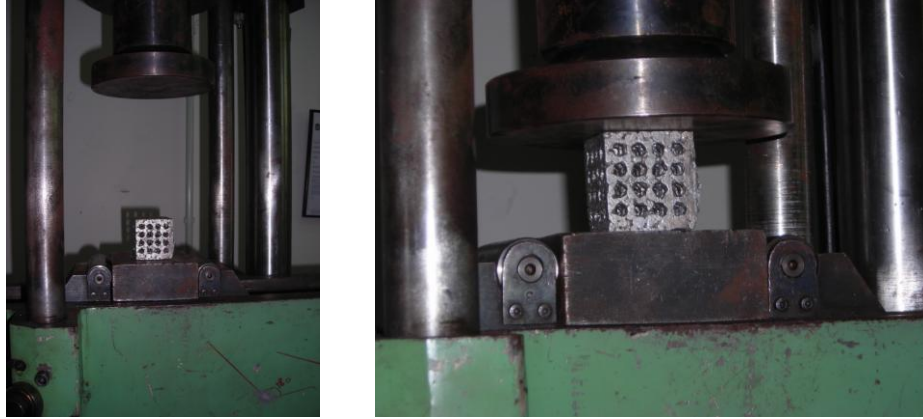
Basma Dayanımı: $16.800 \times 9,81 / 1754 = 94 \text{ N/mm}^2$ (MPa)

Numune 3: Etial - 140 Yüzey Alanı: 1710 mm²

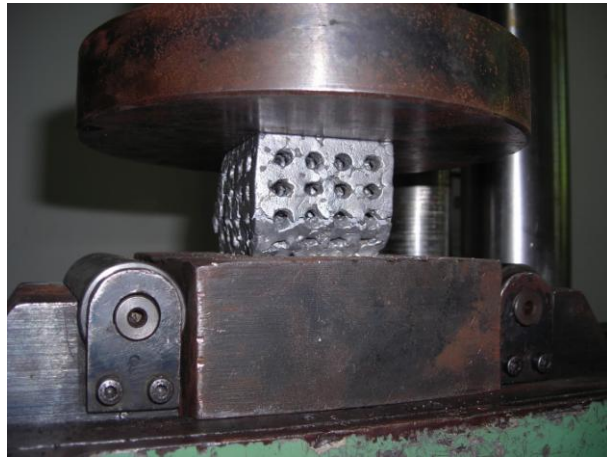
Maksimum Yükleme Test Değeri: 12,8 ton

Basma Dayanımı: $12.800 \times 9,81 / 1710 = 73 \text{ N/mm}^2$ (MPa)

Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'de basma testi gösterilmiş olup, basma sonrası numuneler Şekil 6.25'de görülmektedir.



Şekil 6.23 Etial - 60 ve Etial - 140 basma testleri



Şekil 6.24 Etial - 140 numuneler basma deneyleri sonrasında kırılan numuneler



Şekil 6.25 Basma deneyleri sonrasında numuneler

6.4.3 % Deformasyon

Numunelerin basma sonrasındaki % deformasyonları ölçülmüştür.

Çizelge 6.7’de basılan Etial – 60 ve Etial – 140 numunelerin deformasyon oranları görülmektedir.

Numune 1: Etial - 60

İlk Boy: 4,6 cm

Son Boy: 2,3 cm

% Deformasyon: 50

Numune 6: Etial - 140

İlk Boy: 4,6 cm

Son Boy: 3,8 cm

% Deformasyon: 17,4

Numune 8: Etial - 60

İlk Boy: 4,8 cm

Son Boy: 3,0 cm

% Deformasyon: 37,5

Numune 3: Etial -140

İlk Boy: 4,5 cm

Son Boy: 3,65 cm

% Deformasyon: 18,88

Çizelge 6.7 Basılan numunelerin % deformasyonları

Numune	İlk Boy (cm)	Son Boy (cm)	Deformasyon (%)
Numune 1 Etial - 60	46	23	50
Numune 6 Etial - 140	46	38	17,4
Numune 8 Etial - 60	48	30	37,5
Numune 3 Etial - 140	45	36,5	18,88

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Replicast yönteminden esinlenerek çıkartılan bir üretim yöntemi ile açık hücreli hücresel metal üretilmiştir. Periyodik dizilmiş açık hücreli metal üretimi çalışmaları BCAST tarafından yürütülürken polistiren modeller kalıp içerisinde şişirme ile üretilmiş olup hücresel yapıyı meydana getiren her bir kat birbirine yapıştırılarak katlandırılmış ve periyodik bir dizilim verilmiştir. Açık hücreli hücresel metal üretiminde döküm yöntemi olarak ilk kez dolu kalıba döküm yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada ise polistiren model, talaşlı şekil verilerek hem kütlesi azaltılmış hem de periyodik hücresel hale getirilmiştir. Dolu kalıba döküm yöntemi ile üretilen numunelerin ağırlık, hacim ve basma dayanımları karşılaştırılmıştır. Farklı bir yöntem olup farklı ilavelerle yöntem geliştirilebilir.

1. Açık hücreli hücresel metal üretiminde kullanılacak model şablonu tasarlandı.
2. Talaşlı şekil verme yöntemi ile hacmi azaltılan hücresel model polistiren salkım haline getirildi. Dolu kalıba döküm metodu kullanılarak Etial-60 ve Etial- 140 numuneler üretilmiştir.
3. Ağırlıkların %50 oranında düştüğü gözlemlenmiştir.
4. Basma deneyleri yapılarak numunelerin basma dayanımları hesaplanmıştır. Daha sünek bir malzeme olan Etial - 60 numunelerin basma dayanımlarının daha yüksek olduğu (94 - 103 MPa) Etial - 140 numunelerin ise nispeten daha düşük dayanımları olduğu (73 – 86 MPa) görülmüştür. Etial – 60 döküm alaşımı olmadığından döküm sıcaklığı yüksek tutulmuştur.
5. Basma deneyleri sonucunda numunelerin deformasyon yüzdeleri hesaplanmıştır. Etial - 60 numuneler % 37-50 değişim gösterirken Etial – 140 numunelerin deformasyon oranı % 17 – 19 arasında kalmıştır.
6. Boylu boyunca açılan delikler dolayısı ile yüksek iç boşluklar oluşmuştur.
7. 5. Deneyde metalin polistiren model üzerindeki ilerleyişini görmek amacı ile yapılmıştır. Beklenildiği gibi önce tabana ulaşan metal buradan doldurmaya başlamıştır.
8. Yöntemin proses adımlarının kısa olduğu ve nispeten ucuz bir yöntem olduğu tespit edilmiştir.
9. Tasarım ve yöntem gelişimlere açıktır. Farklı gözenek boyutları kullanılarak farklı

tasarımlara gidilebilir. Proses adımlarına eklentiler yapılabilir. Çoklu delme sistemi hızlandıracaktır. CNC ile delme ile daha hassas yüzeyler ve ölçüler yakalanabilir.

10. Her yöne açılan ve iç yüzey alanı hesaplanabilen ısı değiştiricileri olarak kullanılabilirler. İstenilen hacim boşlukları oluşturularak ağırlık tasarrufu gerektiren ürünlerde kullanılabilirler.
11. Deformasyon oranlarına ve basma dayanımlarına bakıldığında (Etial – 60 Basma dayanımı: 90-110 MPa; Etial – 140 Basma Dayanımı: 260-290 MPa.) Etial - 60'ın darbe emici olarak kullanılabileceği ancak Etial – 140'ın ise basma dayanımının daha alt seviyelerde kaldığı görülmüştür.

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: A Design Guide, Butterworth-Heinemann.
- ASM Handbook, (1998), Vol. 15, Casting, 9th Edition,
- Azzi, W., Roberts, W. L., Rabiei, A., (2007) "A Study of Pressure Drop and Heat Transfer in Open Cell Metal Foams for Jet Engine Applications", Materials and Design, 28: 569-574
- Babcsan, N., Banhart, J., Leitlemeier, D. (2003) " Metal Foams - Manufacture and Physics Foaming", International Conference "Advanced Metallic Materials" 5 -7 November, 2003, Slovakia
- 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., (2003), "Aluminium Foams for Lighter Vehicles", International Journal of Vehicle Design, 1-19.
- Banhart, J., ve Weaire, D., (2002) "On the Road Again: Metal Foam Find Favor", Physics Today, 37-42.
- Baron, J., (2000), "Aluminium Foam Technology Applied to Automotive Design", CYMAT.
- Baumeister, J., Banhart, J., Weber, M., (1997), "Aluminium foams for transport industry" Materials&Design, Vol.18, Nos. (4/6): 217-220.
- Beeley, P., (2001), Foundry Technology, Second Edition, Butterworth-Heinemann.
- Brothers, A. H., Scheunemann, R., DeFouw, J. D., Dunand, D. C., (2005), "Processing and Structure of Open-Celled Amorphous Metal Foams", Scripta Materialia, 52: 335-339.
- Brown J. R., (2000a), Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, Butterworth-Heinemann.
- Brown J. R., (2000b), Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook, 11th Edition, Butterworth-Heinemann.
- Caulk, D. A., (2006) "A foam melting model for lost foam casting of aluminum", International Journal of Heat and Mass Transfer, 49: 2124-2136.
- Caulk, D. A., (2006), "A Foam Engulfment Model for Lost Foam Casting of Aluminum", International Journal of Heat and Mass Transfer, 49: 3831-3845
- Degischer, H. P. ve Kriszt, B. (2002), Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications, Wiley-VHC Verlag GmbH

- Dukhan, N., Chen, C., (2007), "Heat Transfer Measurements in Metal Foam Subjected to Constant Heat Flux", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32: 624-631
- 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.
- Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Ashby, M. F., (1998), "Cellular Metals", *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 3: 288-303
- Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Fleck, N. A., Ashby, M. ve Wadley, H. N. G., (2000), "the Topological Design of Multifunctional Cellular Metals"
- 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., 2001 "Recycling of MMC and Production of Metallic Foams", *Comprehensive Composite Materials*, Volume 3, 797-820
- Hur, B. Y., Um, Y. S., Cho, J. S., Park, B. K., (2003), " Porosity Control of Open-Cell Al. Foams Prepared by Negative Pressure Infiltration Method", *Advanced Metallic Materials*, November 2003; 124-125.
- Körner, C., ve Singer, R. F., (2000), "Processing of Metal Foams-Challenges and Opportunities", *Advanced Engineering Materials*, 4: 159-165.
- Littleton H.E, Miller B., Sheldon D., Bates C.E., (1996) *AFS Transactions*, 96-124, 335-346, Des Plaines,
- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., ve Kitahara, A., (2000), "ALPORAS Aluminium Foam: Production process, Properties, and Applications", *Advanced Engineering Materials* (4):179-183.
- Monroe R. W., (1992) "Expendable Pattern Casting", *American Foundrymen's Society, Inc.*, Des Plaines
- Onck, P.R., Van Merkerk, R., Raaijmakers, A., De Hosson, J. TH. M., (2005), "Fracture of Open- and Closed-Cell Metal Foams" *Journal of Material Science* 40: 5821-5828
- Sands, M., Shivkumar, S., (2003) "Influence of Coating Thickness and Sand Fineness on Mold Filling in The Lost Foam Casting Process", *Journal of Material Science* 38: 667-673
- Schaffer, P., Rajner, W., Claar, D., Trendelenburg, T. Ve Nishimura, H., (2005) "Production, Properties, and Applications of Alulight® Closed-Cell Aluminum Foams" , *The Fifth International Workshop on Advanced Manufacturing Technologies*, London, Canada
- Stöbener, K., Baumeister, J., Lehmhus, D., Stanzick, H., Zöllmer V., (2003) "Composites Based on Metallic Foams: Phenomenology; Production; Properties and Principles", *International Conference "Advanced Metallic Materials"* 5 -7 November, 2003, Slovakia
- Taslicukur, Z., Ozer, G., Guler, K. A., (2008) "Production of Open Cell Aluminium Metal Foam with Lost Foam Technique", *Materials Science and Engineering Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes*, 1-4 September, Nürnberg, Germany.
- Vendra, L. J., Rabiei, A., (2007) "A Study on Aluminum-Steel Composite Metal Foam Processed by Casting", *Materials Science And Engineering A* ; 465: 59-67.

Wadley, H. N. G., (2002) "Cellular Metals Manufacturing", Advanced Engineering Materials, 4 No:10, 726-733

Zhoa, X. S. (2006), "Novel Porous Materials for Engineering Applicattions", Journal of Materials Chemistry, 16: 623-625

Zhoa, Y. Y., Fung, T., Zhang, L. P., Zhang, F. L., (2005) "Lost carbonate sintering process for manufacturing metal foams", Scripta Materialia, 52: 295-298.

İnternet Kaynakları

[1] www.ergaerospace.com; 2010

[2] www.cymat.com; 2010

[3] www.alulight-america.com; 2010

[4] www.lostfoam.com; 2010

[5] www.petkim.com.tr; 2010

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 29.06.1977

Doğum yeri İstanbul

Lise 1992-1995 Özel Kalamış Lisesi

Lisans 1996-2000 Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme

Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans	2000-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Müh. Anabilim Dalı, Malzeme Programı
---------------	-----------	--

Çalıştığı kurumlar

2000-2002	YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi
2004-2007	Ayhan Metal Pres Döküm A.Ş.
2007 – 2008	Form Klišé
2008-Devam ediyor	Anadolu Motor Üretim ve Pazarlama A.Ş.