

**BOŞLUK TUTUCU TEKNİĞİ İLE
ALUMİNYUM ESASLI METAL KÖPÜK ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali YAVUZ

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Haziran, 2011

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS

BOŞLUK TUTUCU TEKNİĞİ İLE
ALUMİNYUM ESASLI METAL KÖPÜK ÜRETİMİ

Ali YAVUZ

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Haziran, 2011

TEZ ONAY SAYFASI

Ali Yavuz tarafından hazırlanan “Boşluk Tutucu Tekniği ile Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretimi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 01/07/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metal Eğitimi Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

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

Başkan : Yrd. Doç. Dr. M. Serhat Başpınar İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi,

Üye : Doç. Dr. Hüseyin Bayrakçıken İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ayhan Erol İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,

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

.....
Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Mevlüt Doğan

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

/ /

Ali Yavuz

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BOŞLUK TUTUCU TEKNİĞİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI METAL KÖPÜK ÜRETİMİ

Ali YAVUZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Eğitimi Anabilim Dalı

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

Bu çalışmada, kaybolan ve kaybolmayan boşluk tutucu malzemeler kullanılarak alüminyum esaslı metalik köpük üretiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda iki farklı yöntem uygulanmıştır. Birinci yöntemde boşluk tutucu malzeme olarak suda çözünebilen formdaki malzemeler (NaCl , Na_2CO_3 , K_2CO_3) ve toz metalürjisi yöntemi kullanılmıştır. İkinci yöntemde ise kaybolmayan tip boşluk tutucu malzeme (genleşmiş silika jel) ve vakum döküm yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen numunelerin, üretim parametrelerine bağlı olarak yoğunlukları hesaplanmış, basma deneyi ile plastik yıkım gerilimleri ölçülmüş ve içyapı gelişimleri SEM yöntemi ile incelenmiştir.

Sonuçta, toz metalürjisi ile üretilen numunelerin özelliklerinin üretim parametrelerine çok duyarlı olduğu, suda çözünen boşluk tutucu tipinin çözünme hızının köpük üretimini yakından etkilediği sonucuna varılmıştır. Vakum döküm yöntemi ve kaybolmayan boşluk tutucu malzeme yöntemi ile daha başarılı ve özellikleri kontrol edilebilir alüminyum esaslı köpükler üretilmiştir.

2011, xi + 85 sayfa

Anahtar Kelimeler: Alüminyum esaslı köpük, Toz metalürjisi, Vakum döküm, Boşluk tutucu malzeme, yoğunluk-mukavemet ilişkisi

ABSTRACT

M.Sc Thesis

PRODUCTION OF ALUMINIUM BASED METALLIC FOAM BY SPACE HOLDER TECHNIQUE

Ali YAVUZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Metal Education

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

The main objective of this study is to investigate the production of aluminium based metallic foams by using both lost and non-disappear type space holder. Two different methods were used in the experiments. First, water soluble space holder materials (NaCl, Na₂CO₃, K₂CO₃) and powder metallurgy technique were used. Second, non-disappear type space holder material (expanded silica gel) and vacuum casting technique were used. Density and plastic collapse stress were measured depending on the production parameters of the foam. Microstructural development of the samples were also investigated by using SEM techniques.

As a conclusion, it was decided that the properties of the samples which were produced by powder metallurgy technique was strongly depends on the production parameters and the solubility rate of the lost space holder type. Aluminium based foam samples which have controllable properties were successfully produced by using vacuum casting technique with non-disappear type space holder.

2011, xi + 85 page

Key Words: Aluminium based foams, Powder metallurgy, Vacuum casting, Space holder technique, Density-strenght relation.

TEŞEKKÜR

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

Deneysel çalışma aşamasında yardımları bulunan değerli hocalarım Arş. Gör. Rıza KARA ve Arş. Gör. Fatih ÇOLAK'a, Metalografi sorumlusu değerli Birol EROL'a ve Metal Eğitimi sorumlusu Ersin DURAK'a çok teşekkür ederim.

Görüşlerini ve yardımlarını benden esirgemeyen sevgili dayım Yrd. Doç. Dr. Nurullah KIRATLI'ya ve hayatım boyunca sabırla ve hiçbir karşılık beklemeden, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen çok sevgili aileme sonsuz kez teşekkür ederim.

Ali YAVUZ

AFYONKARAHİSAR, 2011

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
1. GİRİŞ	1
2. METALİK KÖPÜKLER	2
2.1 Metalik Köpüklerin Tarihsel Gelişimi	2
2.2 Metalik Köpüklerin Tanımı	4
2.3 Metalik Köpüklerin Çeşitleri	5
2.3.1 Açık Hücreli Metalik Köpükler	6
2.3.2 Kapalı Hücreli Metalik Köpükler	7
2.4 Metalik Köpüklerin Özellikleri.....	8
2.4.1 Elastik Modülü	8
2.4.2 Basma Davranışı.....	11
2.4.3 Enerji Emilimi ve Darbe Davranışı	13
2.4.4 Gerinim Davranışı	15
2.4.5 Burulma Davranışı.....	17
2.4.6 Termal, Elektriksel ve Akustik Davranış	17
2.5 Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri	22
2.5.1 Ergitme Bazlı Metalik Köpük Üretimi	24
2.5.1.1 Gaz Enjekte Ederek Gözeneklendirme	24
2.5.1.2 Gecikmeli Serbest Gaz Oluşumu ile Gözeneklendirme.....	27
2.5.1.3 Köpükleştirici Ajanlar Yardımıyla Gözeneklendirme	30
2.5.1.4 Gaz-Ötektik Reaksiyonunu Kullanarak Gözeneklendirme.....	32
2.5.1.5 Dökme, Süzme ve Çoğaltma Tekniği ile Gözeneklendirme.....	34
2.5.2 Toz Bazlı Metalik Köpük Üretimi.....	37
2.5.2.1 Öncü Malzemeler Karıştırılmış Tozun Pişirilmesi ile Gözeneklendirme.....	37
2.5.2.2 Düşük Yoğunluklu Çekirdeğin Gaz Kaynaklı Büyümesi ile Gözeneklendirme.....	39

2.5.2.3 Toz Ve Fiber Sinterleyerek Gözeneklendirme	40
2.5.2.4 İçi Boş Kürelerin Sinterlenmesiyle Gözeneklendirme	42
3. MATERYAL ve METOT	44
3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler	44
3.2 Metalik Köpüklerin Hazırlanması	48
3.2.1 Toz Metalürjisi Yöntemiyle Alüminyum Köpük Üretimi.....	49
3.2.2 Vakum Döküm Yöntemi ile Alüminyum Köpük Üretimi.....	54
3.3 Deney Numunelerine Uygulanan Testler.....	60
3.3.1 Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi	60
3.3.2 Basma Dayanımı	60
3.3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi	61
4. BULGULAR	63
4.1 T/M Yöntemiyle Üretilen Alüminyum Köpükler	63
4.2 Döküm Yöntemi ile Üretilen Alüminyum Köpükler	67
4.2.1 Vakum Ön Deneme Sonuçları.....	67
4.2.2 Numunelerin Kesitleri	69
4.2.3 SEM Değerlendirmeleri.....	70
4.2.4 Basma Deneyi Sonuçlarının Değerlendirmeleri.....	71
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	78
6. KAYNAKLAR.....	81
6.1 İnternet Kaynakları	84
ÖZGEÇMİŞ.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

θ	Derece
E	Young's modülü
G	Kesme modülü
K	Kütle modülü
V	Poisson oranı
ρ^*	Hücre malzemelerin yoğunluğu
ρ_s	Duvarlardan meydana gelen hücre malzemenin yoğunluğu
p_r	Göreceli köpük yoğunluğu
s	Hücre duvarları ve hücre kenarlarından yapılmış olan katının özellikleri
Φ	Kapalı hücreli köpükler için hücre kenarları içeren katının miktarı
E_v	Hacim başına düşen emilmiş enerji miktarı
γ_t	Kesme dayanımı
C_v	Birim hacme düşen öz ısı
α	Isıl genleşme katsayısı
λ	Termal iletkenlik

Kısaltmalar

Al_2O_3	Alüminyum oksit
TiH_2	Titanyum hidrür
SiC	Silisyum karbür
$CaCO_3$	Kalsiyum karbonat
CO_2	Karbon dioksit
CaO	Kalsiyum oksit
$CaAl_2O_4$	Kalsiyum oksalat
P/M	Toz metalürjisi
Na_2CO_3	Sodyum karbonat
K_2CO_3	Potasyum karbonat
$NaCl$	Sodyum klorür

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Metalik köpüklerin tarihsel gelişimi.....	4
Şekil 2.2 Temsili bir açık hücre ve DOUCCEL yöntemiyle üretilmiş açık hücreli bir alüminyum köpüğün SEM migrografi	6
Şekil 2.3 Temsili bir kapalı hücre ve kapalı hücreli bir alüminyum köpüğün X-Ray tomografisi	7
Şekil 2.4 Açık hücreli ve kapalı hücreli alüminyum köpüklerin farklı tipleri için göreceli köpük yoğunluğu üzerine Young's modülünün etkisi	10
Şekil 2.5 Kapalı hücreli bir alüminyum köpük için ölçülmüş yük kaldırma modülü ile gerilim-gerinim ilişkisi.....	11
Şekil 2.6 Sünek bir alüminyum köpük ve gevrek bir alüminyum köpük için basmada, gerilim-gerinim eğrisi.....	12
Şekil 2.7 Bir AlSi12 köpüğün basma gerilimi ve enerji emilim verimi.....	13
Şekil 2.8 İki farklı enerji emicinin basma gerilim-gerinim eğrisi	14
Şekil 2.9 İki farklı alüminyum tipinin plastik dayanıma bağlı olarak değişen gerilim-gerinim eğrisi.....	15
Şekil 2.10 Yük kaldırma modülü ile alüminyum köpüğün çekmedeki gerilim-gerinimi	16
Şekil 2.11 Bükmede eksenel çekme gerilimi ve eksenel olmayan gerilim ile alüminyum köpüğün gerilim-gerinim eğrisi	17
Şekil 2.12 Belirli bir malzeme ve yapı geometrisi için frekansın, bir panelin ses azaltım endeksine bağlılığı.....	21
Şekil 2.13 Tipik bir ses emici yapı: kalın cam fiber emici.....	21
Şekil 2.14 Hücresel metal üretim yöntemlerinin katı, sıvı ve buhar fazı olarak sınıflandırılması.....	23

Şekil 2.15 İnce panellerin üretimi için Alcan tarafından geliştirilmiş sürekli olan köpük işleminin şematik gösterimi	24
Şekil 2.16 Gaz enjeksiyon (Alcan) yöntemi yardımıyla üretilen köpüğün	25
Şekil 2.17 FORMGRIP işleminin ilk adımı	28
Şekil 2.18 FORMGRIP işleminin şematik olarak gösterimi	28
Şekil 2.19 Üfürülen ajanlar ile eriyiğin direkt köpükleştirilmesi	30
Şekil 2.20 Kalsiyum metalinin ilave edilip karıştırılmasından sonra bir alüminyum eriyiğin viskozitesi üzerine karıştırmanın etkisi	31
Şekil 2.21 GASAR üretimi için gaz-metal ötektik katılaşması	33
Şekil 2.22 Açık hücreli köpükler üretmek için kullanılmış hassas döküm metodu	35
Şekil 2.23 Yarı-katı içindeki gaz salan parçacıklar ile üretilen metal köpükler için kullanılmış toz metalürji adımlarının sırası.....	38
Şekil 2.24 Açık ve kapalı hücreli gözeneklilik ile bir köpük oluşturmak ve içi boş metal küreler oluşturmak için Georgia Tech yöntemi	43
Şekil 3.1 Silika jellerin genişletilmesinde kullanılan ısıtma ve soğutma rejimi	46
Şekil 3.2 T/M yöntemiyle elde edilecek alüminyum köpüğün akım şeması	53
Şekil 3.3 Al-Si denge diyagramı	59
Şekil 3.4 Döküm yöntemiyle elde edilecek alüminyum köpüğün akım şeması	59
Şekil 3.5 Plastik yıkım geriliminin ölçülmesi için temsili bir basma deney grafiği	61
Şekil 4.1 D serisinden numunelerin basma deney grafikleri	72
Şekil 4.2 D serisi numunelerin birleştirilmiş basma deney grafikleri	74
Şekil 4.3 DS serisinden numunelerin basma deney grafikleri	75
Şekil 4.4 DS serisi numunelerin birleştirilmiş basma deney grafikleri	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Bazı hücrese malzemelerin göreceli yoğunlukları	9
Çizelge 2.2 Tedarikçi veri formundan alınan oda sıcaklığında ölçülmüş çeşitli yoğunluklardaki hücrese alüminyumun, elektriksel ve termal iletkenliği..	18
Çizelge 2.3 Temel malzeme özellikleri ile birlikte verilen metalik köpüklerin ve köpüklü yapıların ana üretim tekniklerinin listesi	22
Çizelge 2.4 Gaz üfleyerek üretilen metalik köpüklerin avantaj ve dezavantajları	27
Çizelge 2.5 Alporas yönteminin avantaj ve dezavantajları	32
Çizelge 3.1 Etial-5 ve Al-Si alaşımlı külçelerin spektral analizleri	44
Çizelge 3.2 Farklı genleşme sıcaklığına bağlı silika jel yoğunlukları.....	48
Çizelge 3.3 T/M yöntemiyle hazırlanan numunelerin ağırlıkça yüzdeleri.....	50
Çizelge 3.4 Sinterlenmiş alüminyum numunelerin, boşluk tutucu malzeme tipine göre değişen çözünme sıcaklık ve süreleri	52
Çizelge 3.5 T/M yöntemiyle elde edilen alüminyum köpük numunelerinin serileri	53
Çizelge 3.6 Al ve Al-12Si döküm sıcaklıkları	58
Çizelge 3.7 Döküm yöntemi ile elde edilen alüminyum köpük serileri.....	60
Çizelge 4.1 D serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen eğimleri	73
Çizelge 4.2 DS serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen eğimleri...	76
Çizelge 4.3 Serilerin yoğunlukları ile plastik yıkım gerilimlerinin karşılaştırılması	77

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 Alüminyum köpüğün gerinimdeki hasar mekanizması	16
Resim 2.2 Gaz enjeksiyon (Alcan) yöntemi ile üretilmiş bir köpüğün bir bölümünün optik mikrografi	26
Resim 2.3 Silisyum karbürlü alüminyum köpükler	29
Resim 2.4 TiH ₂ eklenmesi ile köpükleştirilmiş 80*80 mm ² boyutundaki alüminyum köpüğün gözenek yapısı	31
Resim 2.5 Tipik GASAR yapı. Gözenek yönüne dik kesilen yüzey	34
Resim 2.6 (a) : “Duocell” in görünüşü. (b) : Hassas dökümle üretilen parçalar	36
Resim 2.7 Alulight işlemi kullanılarak bir toz yöntemi öncüden pişirilmiş köpükleşmiş alüminyum alaşımdan bir bölümün optik mikrografi	39
Resim 2.8 Gazın genişlemesi ile basınçlandırılması tarafından köpükleştirilmiş bir çekirdek ile Ti-6Al-4V alaşımının LDC sandviç levhası boyunca bir bölümün optik mikrografi	40
Resim 2.9 Yaklaşık 100µm çapındaki parçacıklardan yapılmış sinterlenmiş bronzun gözenekleri	41
Resim 3.1 T/M yönteminde kullanılan tuzun ve tozların SEM görüntüleri	45
Resim 3.2 Genleştirme işlemi öncesi silika jel kırık yüzeyi (a) ve genişleme sonrası gözenekli silika jel küre yapısı (b)	47
Resim 3.3 Farklı sıcaklıklarda işlem görmüş silika jellerin gözenek ve duvar yapıları	48
Resim 3.4 Toz karıştırma cihazı	50
Resim 3.5 Toz sıkıştırma kalıbı	51
Resim 3.6 Çözme işlemi tertibatı	52
Resim 3.7 Silika jellerin genleştirildiği fırın sistemi	54
Resim 3.8 Al ve Al-12Si alaşımlı külçelerin kesildiği elektrikli testere	55

Resim 3.9 Isıtılan pota ve kalıp.....	55
Resim 3.10 Pota ve kalıbın sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan cihazlar	56
Resim 3.11 Alüminyum döküm tertibatı.....	56
Resim 3.12 Vakum hattında kullanılan Al filtre	57
Resim 3.13 Kalıbın genel görünüşü	58
Resim 4.1 Çözme esnasında dağılmış olan alüminyum köpük numune.....	63
Resim 4.2 Sinterleme sıcaklığının ve sinterleme süresinin yüksek seçilmesinde meydana gelen yapısal bozukluk.....	64
Resim 4.3 650°C’de 2 saat süre ile sinterlenmiş bir alüminyum köpük numunenin çözündürme işlemi öncesi hali.....	65
Resim 4.4 Yüksek çözündürme sıcaklığı sonrasında K ₂ CO ₃ numunelerin aldığı form.	66
Resim 4.5 Çözme sıcaklığının 80°C seçilmesi ile numunenin yapısal bütünlüğünü koruduğu, boşluk tutucu malzeme olarak NaCl tozu içeren Al köpük.....	66
Resim 4.6 Alüminyum köpük numunelerin çözme esnasında dağılmaları.....	67
Resim 4.7 Düşük vakum değerlerinde dökülen deneme numuneleri.....	68
Resim 4.8 Kalıptan ilk çıkan numunenin şekli ve deneye hazır hale getirilmiş numune	69
Resim 4.9 Boyuna kesilen alüminyum köpük numune.....	70
Resim 4.10 Alüminyum köpük numunenin, farklı büyütmelelere sahip SEM görüntüleri	71

1. GİRİŞ

Teknikte kullanılan metallerin çoğu oksijen, su, sülfürlü bileşikler gibi birçok maddelerle tepkime vererek metalik doğalarını değiştirirler. Demir ve alaşımlarından sonra, endüstride en çok kullanılan ikinci metal alüminyumdur. Saf alüminyumun çekme dayanımı düşük olmakla birlikte pek çok elementle alaşımlandırılarak mekanik özellikleri geliştirilebilir. Alüminyumun yüzeyinde oksit (Al_2O_3) oluşumuyla metalin korozyona karşı dayanımının arttığı ileri sürülmektedir. Alüminyum, çağımızda en çok kullanılan ikinci metaldir. Günümüzden yüz on beş yıl önce endüstriyel çapta üretimine başlanılan alüminyum, günlük yaşantımızın her yerinde kullanım alanı bulmuştur (Kasaplar 2007).

Gözenekli metaller adını çokça duyduğumuz ve dünya endüstrisinde oldukça büyük yer kaplayan düşük yoğunluk, mükemmel mekanik, ısı, elektriksel ve akustik özelliklere sahip yeni bir malzeme grubudur. Bu malzemelerin ilk araştırmaları 1940 da ABD de başlamıştır. Cyril Stanley Smith'in yaptığı araştırmalar, gözenekli metallerin ilk yapım araştırmalarını tetiklemiştir (Bart-Smith *et al.* 1998).

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

Alüminyum, demir, nikel, kurşun, çinko ve titanyum köpük metal yapımında kullanılan malzemelerdir. Ancak günümüzde düşük yoğunluğu, korozyon direnci ve düşük ergime sıcaklığı gibi özellikleri nedeniyle, alüminyum köpükler en çok kullanılan metal köpüklerdir. Ayrıca, alüminyum köpükler darbe enerjisini plastik enerjiye dönüştürebilir ve birçok metalden daha fazla enerji absorbe edebilirler. Tüpler içerisine dolgu malzemesi olarak konulduklarında emilen toplam enerji köpük ve tüpün ayrı ayrı emdiği enerjinin toplamından daha büyüktür (Elbir ve ark. 1999, Hanssen *et al.* 2000, Sertkaya 2008).

2. METALİK KÖPÜKLER

2.1. Metalik Köpüklerin Tarihsel Gelişimi

Köpükler ve diğer yüksek gözenekliliğe sahip hücreli malzemeler yüksek mekanik enerji emebilme kapasitesi, yüksek rijitlik ve çok düşük özgül ağırlık gibi fiziksel ve mekanik özelliklerin birleşimine sahip oldukları için doğa tarafından da yapısal ve işlevsel amaçlarla sıkça kullanılmaktadır (ör. kemik ve ağaç yapıları). İnsanoğlu da yüzyıllardır doğal gözenekli malzemeleri yapısal amaçlarla kullanmaktadır. Mısır piramitleri en az 5000 yıllık ahşap malzeme içermektedir. Doğal mantarlar Roma devrinden beri (M.Ö. 27) şarap şişelerinde tıpa olarak kullanılmaktadır (Gibson and Ashby 1997, Banhart 2001).

Metalik köpüklerle ilgili çalışmayı ilk defa Sosnick, 1948 yılında alüminyum içerisinde cıva buharlaştırarak yapmış daha sonra Elliot aynı metodu tekrarlayarak metalik köpüğü üretmiştir. Benjamin Sosnick ilk olarak, bir Al ve Hg karışımını yüksek basınç altında kapalı bir kap içerisinde ergitmiştir. Basıncın kaldırılmasıyla, Al'un ergitme sıcaklığı Hg'nın buharlaşmasına yol açmış ve bir köpük biçimi meydana gelmiştir (Yang and Nakae 2000, Banhart and Weaire 2002)

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

1959'da tamamen farklı bir yöntem keşfedilmiştir. United Aircraft Corporation tarafından patentleşen yöntemde, toz haldeki metal yine toz halde bulunan gaz yapıcı madde ile karıştırılarak elde edilen karışım, metalin ergime sıcaklığına ısıtılarak gaz salıcı madde ayrılarak çözündürülmüş ve büyük miktarda gaz salarak köpük yapıyı oluşturmuştur. Bu toz karışımı, yayılan metal ve gaz yapıcı tozlara katı metal malzeme bir yapı vermek için, soğuk olarak sıkıştırılmış ve ekstüre edilmiştir. Daha sonra bu katı yapı metalin ergime sıcaklığına ısıtılmış ve gaz yapıcı madde çözünerek sıvı metale gaz salarak metal köpük yapıyı oluşturmuştur. Metal hidratlar (özellikle titanyum hidrat- TiH_2 -) bu yöntemde gaz yapıcı madde olarak kullanılmaktadır.

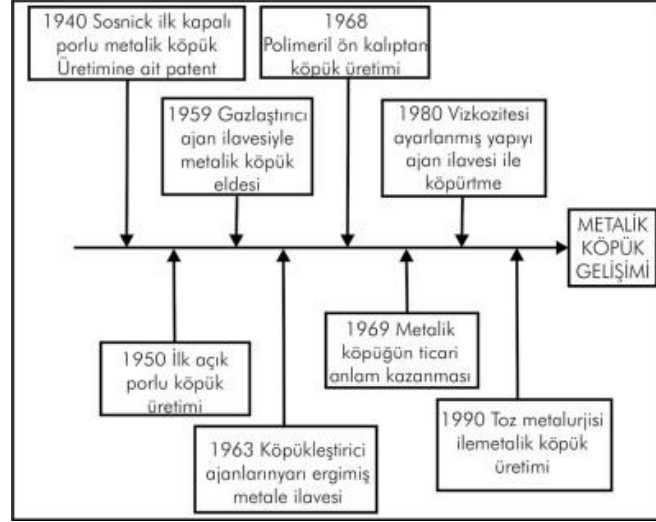
1960'ların ortalarında Hardy ve Peisker'in patentledikleri yöntemde köpürtücü ajanları direkt olarak yarı eriyik haldeki metale eklemişlerdir. Bu yöntem toz temelli üretime göre daha ucuz bir maliyete sahiptir. Yeni bir gelişme olarak, viskoziteyi arttırmak ve yapıdaki dağılan gazı yakalamak için eriyik alüminyuma silisli bir malzeme (vermikülit) ilave edilmiştir. Yine yeni bir fikir olarak köpürtücü ajan olarak metal hidritler kullanmak yerine hidrat killeri kullanılmıştır (Özer 2005).

Patentlerin büyük bir bölümü 1950'lerden 1970'lerin sonlarına kadar verilmiş ve köpürtme işlemlerinin çeşitli türevleri önerilmiştir.

1980'lerin sonlarında başlayan bilimsel faaliyetlerdeki ikinci bir dalgalanma eski tekniklerin bazılarının yeniden kurulmasına ve daha yüksek araştırma faaliyetlerine yol açmıştır (Uçak 2003).

Sıvı ve katı hal işlem metotlarının büyük bir bölümü, hafif yapılar, ses emilimi, yapı içindeki darbe enerji absorpsiyonu ve taşıma endüstrisi gibi ticari uygulamalarda kullanılan Al köpüklerin üretilmesi için 1980 ve 1990 yıllarında geliştirilmiştir (Davies and Zhen 1983, Gibson and Ashby 1997, Baumgaertner *et al.* 2000).

1948 yılında ilk patenti alınan köpük malzeme üretim zorluğu, pahalı olması ve en önemlisi tekrar edilebilirlik özelliğinin zayıf olması nedeniyle 1990'lı yılların başına dek unutulmuş ya da ihmal edilmiştir. Bu nedenle metalik köpükler önemli bir ivme kazandığında, üretimi ve performansı üzerine yapılan araştırmalar 1990'lara kadar düşük bir seviyede kalmıştır. Şekil 2.1'de metalik köpüklerin tarihsel gelişimiyle ilgili bir diyagram verilmiştir (Degischer and Kristz 2002, İnt.Kyn.1).



Şekil 2.1 Metalik köpüklerin tarihsel gelişimi (İnt.Kyn.2)

Geçen 40 yıl içinde alüminyum köpük üretimi ile ilgili birçok çalışma yapılmış olup birçok metot denenmiştir. Ancak günümüze kadar yoğunluk, homojenlik, hücre boyutu gibi konularda kontrolsüzlük nedeniyle alüminyum köpükler uygulama sahasına pek girememişlerdi. Bugün birçok firma alüminyum köpük kullanımıyla ilgili çalışma yapmakta ve bir kısmı da uygulamaya geçmiş durumdadır. Ancak halen çözülmesi gereken önemli bir unsur olan maliyet, alüminyum köpüğün yaygın kullanımını engellemektedir. Alüminyum köpük üretim maliyetinin endüstriyel ölçekteki seri-üretim metotlarıyla düşeceği beklenmektedir (İnt.Kyn.3).

2.2. Metalik Köpüklerin Tanımı

Metalik köpükler, süngerler gibi gözenekli bir yapıya sahiptir. Doğal bir ürün değildir. Gözenekli yapı, bazı işlemler uygulandıktan sonra meydana gelir. Doğal köpükle hiçbir ilgisi olmamasına rağmen görünüm ve bazı özelliklerinden dolayı “metalik köpük” olarak adlandırılırlar ve köpükler, tamamen çözülmeyen bir gaz ile bir sıvının dağılımını kapsayan, farklı işlemler ile oluşturulmuş iki faz karışımının sonucudur. Bu işlem emülsiyon işlemine çok benzemektedir fakat köpük içerisinde gaz fazının bulunmasından dolayı farklılık gösterir (Çinici 2004, Hernández 2005).

‘Metal köpük’ veya ‘metalik köpük’ kavramları günümüzde boşluk içeren bütün metal yapılar için kullanılan bir terim haline gelmiştir. Metalik köpük teriminin yanı sıra hücreli metal (cellular metal), gözenekli metal (porous metal), metal sünger (metallic

sponge) terimleri köpük tanımlamalarında sıkça kullanılmaktadır. Bu terimler arasındaki temel ayrım gözeneklerin morfolojilerinden oluşmaktadır. Ayırt edilebilen ve kendi içinde düzenli gözeneklere sahip yapılar köpük veya hücreli metal olarak sınıflandırılırken, diğerleri gözenekli veya sünger olarak nitelendirilebilir. Bu nedenle, tam anlamıyla metalik köpüklerin ne olduğunu anlayabilmemiz için değişik ifadeleri ayırt etmek yararlı olacaktır:

- **Hücreli Metaller:** En genel kullanılan terimdir. Çeşitli gazların metalik gövde içerisinde dağılarak boşluk oluşturduğu yapıyı kapsamaktadır. Metalik faz, gaz fazı içeren kapalı hücrelerden oluşur ve hücreli metaller genellikle %70'den daha fazla boşluk içerir.
- **Gözenekli Metaller:** Metal yapı çok sayıda gözenek tarafından oluşmuştur. Gözenekler genellikle küreseldir ve birbirlerinden yalıtılmış halde bulunurlar. Gözeneklilik yaklaşık %20'den daha düşüktür.
- **(Katı) Köpük Metaller:** Hücreli metallerin özel bir sınıfıdır. Hücreler kapalı, küresel veya çokyüzlü (polihedral) ve her biri birbirinden ince bir filmle ayrılmıştır.
- **Metalik Süngerler:** Hücreli metallerin yapıbilimidir. Genellikle birbirine bağlı gözenekten oluşur.

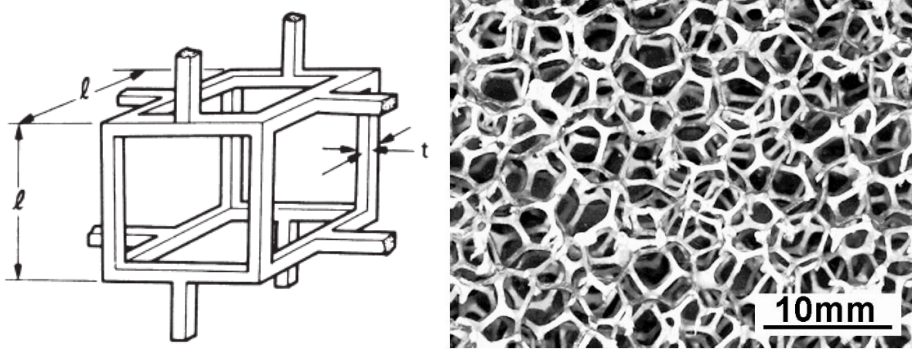
Bu terimler birbirinden bağımsız değildir. Örneğin köpük metal, gözenekli ve hücreli bir yapıya sahip olmakla beraber sünger metal hücrelere sahip olmak zorunda değildir. Bazen malzemeleri ayırt etmek o kadar kolay değildir (Banhart 2000a, b, Babcsán *et al.* 2003, Banhart 2003, İnt. Kyn.2).

2.3. Metalik Köpüklerin Çeşitleri

Genel olarak köpükler hücre yapılarına göre açık ve kapalı hücreli köpükler olarak sınıflandırılırlar. Her iki yapı biçimi de %(80-95) oranına varan boşluk ve %(5-20) oranında malzemeden oluşurlar (Sertkaya 2008, İnt. Kayn. 3).

2.3.1. Açık Hücreli Metalik Köpükler

Açık hücreli metalik köpüklerde, hücrenin yalnızca kenarları bulunur ve hücre duvarları tamamen kapatmazlar yani yapıdaki boşluklar birbirleri ile bağlantılıdırlar. Şekil 2.2’de temsili bir açık hücreli metalik köpüğün hücresi ve DOUCCEL yöntemiyle üretilmiş açık hücreli bir alüminyum köpüğün SEM mikrografı görülmektedir (Dumais 2009, İnt. Kyn.2).

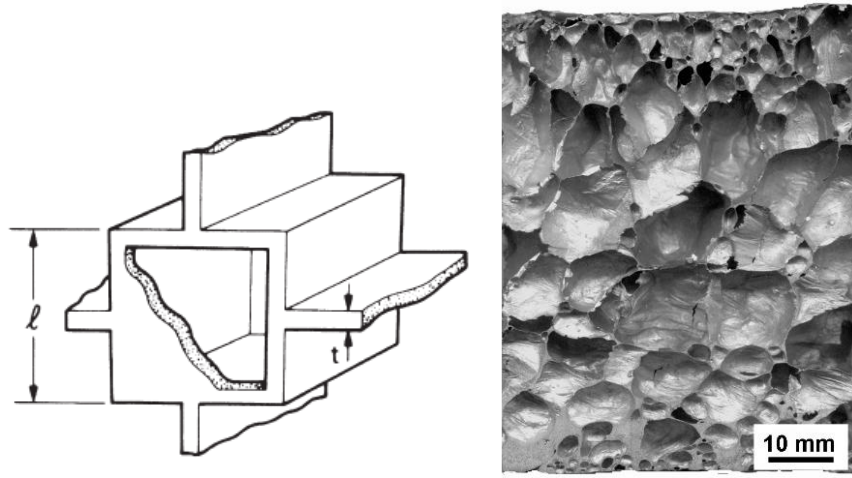


Şekil 2.2 Temsili bir açık hücre ve DOUCCEL yöntemiyle üretilmiş açık hücreli bir alüminyum köpüğün SEM mikrografı (Ashby and Jones 1998, Amjad 2001)

Filtreler, katalizör destekler, ısı değiştiriciler, akışkan sönümleme kanalları (şok dalga yayılım cihazlarının farklı tipleri dâhil), biyomedikal protezler, içten soğutmalı şekil hafızalı aktüatörler, hava pilleri ve koruyucu geçirgen zar süzgeçleri ve kılıflarını kapsayan güncel uygulamalar ve önerilenler açık hücreli metalik köpüklerle üretilmesi uygundur. Bu tarz fonksiyonel bileşenler yalnızca yapısal uygulamalardan daha yüksek değerleri birleştirme eğilimindedir ki bu, açık hücreli metal üretimi genel olarak daha yüksek maliyetler açısından uygundur. Hücre yapısının ölçüsü, çoğunlukla fonksiyonel karakteristikler için önemlidir. Bu elbette, filtreler ve sıvı akışını sınırlama cihazları için temel bir özellik olacaktır. Fakat, protez implantlar içinde kemiğin gelişimi nispeten kaba gözenekler gerektirebilir, bu yüzden ince bir hücre boyutu, sıklıkla ısı değiştiriciler vb. (gözeneklerin tıkanması tehlikesi ile sınırlamalar getirilmesi doğaldır) için tercih edilebilir. Ancak, bu özellikler sıklıkla minimum bir dayanım ve süneklik gerektirmesi ile birlikte ihtiyaç duyulacaktır. Böylece nispeten ince, üniform hücre yapısı ve hatasız hücre mikro yapılar, bu açıdan daha faydalı olabilir. Çeşitli alaşım sistemleri, işlem optimizasyon konularının daha iyi anlaşılması için daha gerekli hale getirdiğinden dolayı metaller, açık hücreli metallerin uygulamaları için geniş bir yelpazede araştırılmaktadır (Degischer and Kristz 2002).

2.3.2. Kapalı Hücreli Metalik Köpükler

Kapalı hücreli metalik köpüklerde, hücre duvarları mevcuttur ve boşluklar köpük duvarları ile tamamen kapatılmış olup malzeme içinde baloncuklar şeklinde yer alırlar. Kapalı hücreli metalik köpükler yaklaşık olarak 1990'dan beri geliştirilmektedir. Hücre boyutu veya gözeneklerin boyutu genellikle 1-8 mm arasındandır. Şekil 2.3'te temsili bir kapalı hücreli metalik köpüğün hücresi ve kapalı hücreli bir alüminyum köpüğün X-RAY tomografisi görülmektedir (Ergönenç 2008, Dumais 2009, İnt. Kyn. 2).



Şekil 2.3 Temsili bir kapalı hücre ve kapalı hücreli bir alüminyum köpüğün X-Ray tomografisi (Ashby 1998, Amjad 2001)

Kapalı hücreli köpükler üretilme eğiliminde döküm malzemelerin ucuz üretilmesi için en umut verici metot olduğundan beri (genellikle alüminyum) ilgi, birçok yapısal uygulama için bunlar üzerine yoğunlaşmıştır. Kapalı hücreli köpük içeren farklı bileşenler, uygulanmış nispeten düşük yükler (sıkıştırma) altında enerjiyi kademeli olarak absorbe etmek için tasarlanmıştır. Prensip, hücre duvarlarındaki sınırlama, katı metal ile karşılaştırıldığında, büyük plastik gerinimler, enerjinin önemli derecede emilimi ile akordiyona benzer deformasyon yoluyla ortaya çıkabilir. Ancak bu gibi bileşenlerin performansı, örneğin eğilim anında eğer, herhangi bir kopma meydana gelirse bileşenler kolayca kırılma eğilimi gösterir. Bu kötü çekme, süneklik göstermiş ve kesme bantları içinde meydana gelen erken hasar ile şimdiye kadar genellikle hayal kırıklığı yaratmıştır. Şu an, hücre boyutu, alt mm seviyelerine tercihen üniform ve ince tutulabildiğinde problemler önemli derecede azalmış olduğu belirlenmiş ve böylece, ürün hacmi içindeki malzeme gibi toplu olarak bu tür malzeme üretme yeteneğine sahip

işlem tekniklerinin geliştirilmesini güçlü bir şekilde teşvik etmiştir. Ayrıca, bu köpüklerde hücre duvarları, örneğin büyük seramik parçacıklar ve ince oksit filmler gibi ağır gevrekleştirici bileşenler içerdiği yaygındır. Bazı bu tür bileşenler ergitme viskozitesini arttırmak amacıyla işlem esnasında sıklıkla bilerek katılmaktadır ve böylece hücrenin kabalaşmasını ve drenajını engeller. Son zamanlardaki çalışmalar, bu tür bileşenlerin köpüğün mekaniksel özellikleri üzerinde son derece zararlı etkiye sahip olduklarını ve bunun için mekanizmaların sorumlu olduğu özetlenerek doğrulanmıştır. Hem işlem yöntemlerinin geliştirilmesinde ve hem de bu etkilerin daha detaylı anlaşılmasında bu bileşenlerin ortadan kaldırılması veya uygun bir şekilde değiştirilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Kapalı hücreli köpükler aynı zamanda uygulamanın diğer türleri için örneğin termal bariyerler gibi önemli bir yere sahiptir. Buna karşın, bunun için sıklıkla seramik malzemeler tercih edilecektir (Degischer 2002).

2.4. Metalik Köpüklerin Özellikleri

2.4.1. Elastik Modül

Yapısal malzemelerin en önemli özelliklerinden biri, bir dizi modül ile tanımlanan lineer elastik davranıştır. İzotropik malzemelerin lineer elastik karşılıklarını karakterize etmek için iki modüle gerek vardır. Bunlar; Young's modülü E ve kesme modülü G 'dir. Bazı köpükler üretim işlemlerinden dolayı izotropik değildirler. Bu nedenle lineer elastik davranışı belirlemek için ikiden daha fazla modüle ihtiyaç vardır.

İzotropik durumda ve bazı kapalı hücreli metalik köpüklerin daha az veya daha fazla izotropik olması nedeniyle Formül 2.1'de bulunan Young's modülü (E), kesme modülü (G), kütle modülü (K) ve elastik Poisson oranı (ν) arasındaki ilişki iyi bilinmelidir.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2.1)$$

Yapının, hücresel malzeme veya köpük olması durumunda “modül” ifadesinin kullanılması genelde uygun değildir. Çünkü köpük, iskelete benzer bir yapıdır ve “sertlik” kullanılmalıdır. Ancak, bir süreklilik olarak malzemenin yeni bir sınıfı şu an olağan bir şekilde dikkate alınmalıdır. Bundan dolayı genel malzeme özellikleri onları

karakterize etmek için kullanılır. Hücresel bir yapının Young's modülü sabit bir malzeme değildir ve esas olarak hücresel metalin mimarisine bağlı olduğu için dikkat edilmesi gerekir (Degischer and Kristz 2002).

Metalik köpüklerdeki en önemli özellik göreceli yoğunluktur(ρ^*/ρ_s). Hücresel malzemelerin yoğunluğu (ρ^*), duvarlardan meydana gelen hücresel malzemenin yoğunluğu ise (ρ_s)'dir. Çizelge 2.1'de bazı hücresel malzemelerin göreceli yoğunlukları verilmiştir (Dumais 2009).

Çizelge 2.1. Bazı hücresel malzemelerin göreceli yoğunlukları (Dumais 2009)

Hücresel Malzeme	ρ^*/ρ_s
Ultra düşük yoğunluklu köpükler	0,001
Polimerik köpükler	0,05-0,2
Mantar	0,14
Yumuşak ağaçlar	0,15-0,4
Gözenekli katılar	> 0,3

Açık hücreli ve kapalı hücreli yapılar arasında önemli derecede farklılıklar vardır. Açık hücreli köpükler, bağlanmış sinir ağları tarafından temsil edilir. Ana deformasyon mekanizması, nispeten daha yüksek köpük yoğunluklarında ($p_r > 0.1$) hücre duvarlarının eğilmesine ek olarak kenarların basılması ve uzamadır. Kapalı hücreli köpüklerde hücre duvarları, yapı ile sıkışmış hücre kenarları arasındandır. Hücre kenarlarındaki sıkışma, uzama ve eğilmenin yanı sıra, aynı zamanda hücre duvarlarındaki zar gerilimleri deformasyon mekanizması üzerinde büyük bir rol oynar. Hücre duvarlarının varlığında ortaya çıkan daha yüksek sınırlamalar nedeniyle, kapalı hücreli yapılardaki Young's modülü teorik olarak, aynı göreceli yoğunluğa sahip açık hücreli yapılar ile karşılaştırıldığında daha büyüktür.

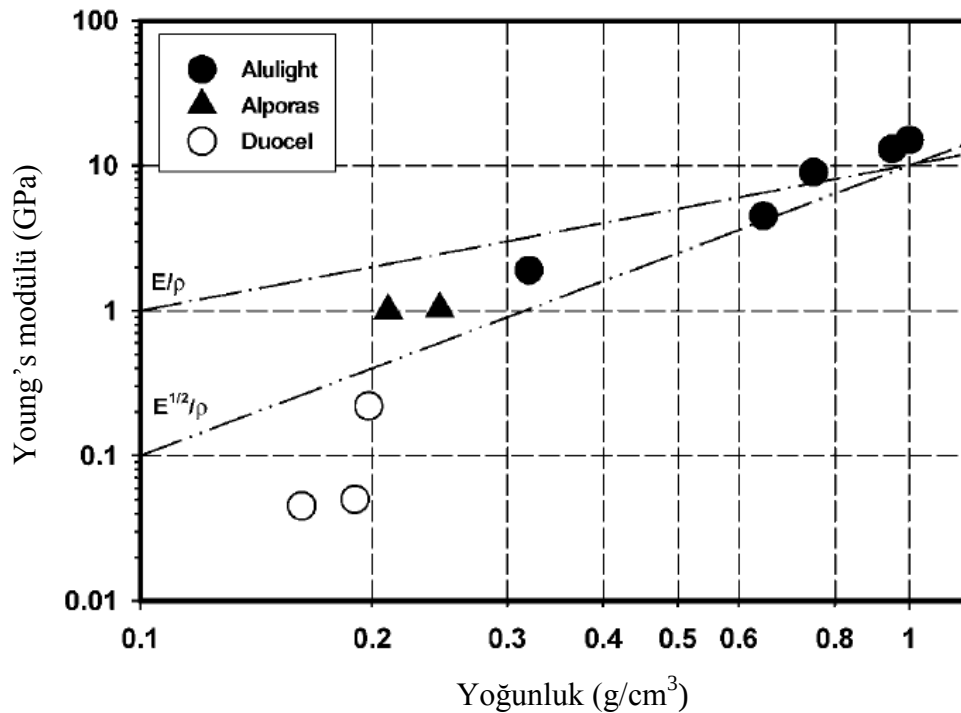
Göreceli köpük yoğunluğu (p_r), tüm mekaniksel parametrelerde en büyük etkiye sahiptir. Gibson ve Ashby'nin daha düşük köpük yoğunlukları ($p_r < 0.2$) için kübik bir

köpük yapıya basit bir eğilme ağısı model uygulamış ve Young's modülü ve yoğunluk arasında Formül 2.2 ve 2.3'deki ilişki bulunmuştur.

$$\frac{E}{E_s} \approx \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 \quad (\text{Açık hücreli}) \quad (2.2)$$

$$\frac{E}{E_s} \approx \Phi^2 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \Phi) \frac{\rho}{\rho_s} \quad (\text{Kapalı hücreli}) \quad (2.3)$$

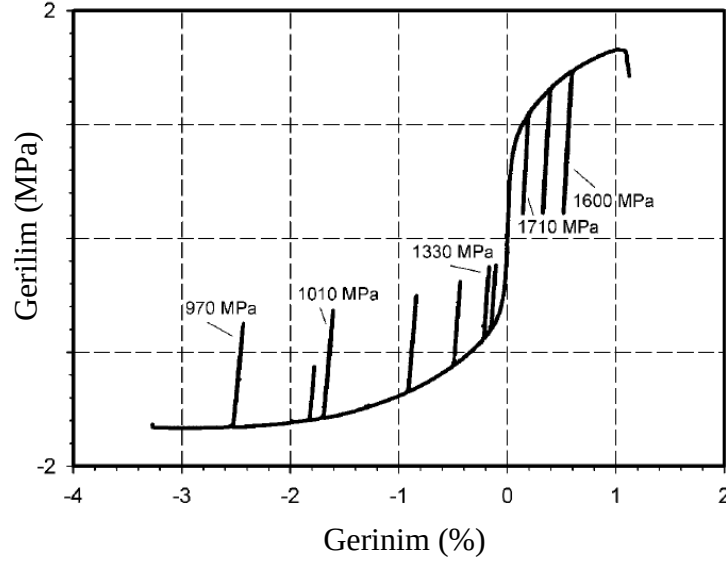
“s” simgesi, hücre duvarları ve hücre kenarlarından yapılmış olan katının özelliklerini gösterir. “ Φ ” simgesi, kapalı hücreli köpükler için hücre kenarları içeren katının miktarıdır. Ancak bu denklemler, gerçek bir köpükten önemli ölçüde farklılık gösteren kübik bir köpük yapının basit bir modeli temel alınarak hazırlanmıştır. Bunlar, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi deneysel sonuçlar ile uyum içerisindedir. Denklemler, ana deformasyon mekanizması hücre kenarlarının eğilmesi olduğu sürece geçerlidir.



Şekil 2.4 Açık hücreli ve kapalı hücreli alüminyum köpüklerin farklı tipleri için göreceli köpük yoğunluğu üzerine Young's modülünün etkisi

Eğilme, burulma, gerilme ve hücre kenarları ve hücre duvarlarının çatlaması gibi deformasyonlar ile bir köpüğün yapısı değişir. Bu nedenle, Young's modülü gerilim ile

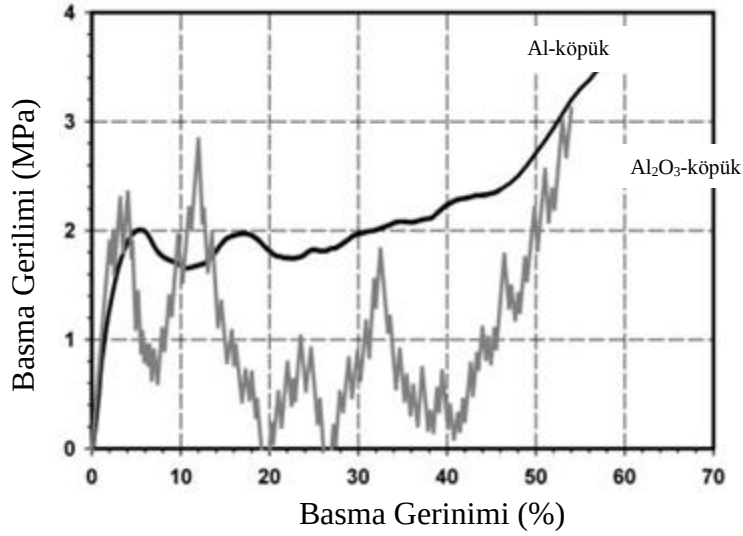
değişecektir. Genelde bu deformasyonlar, başlangıçtaki Young's modülü zorluğunun ölçümünü yaptığı için yumuşak bir köpüğün gerilim-gerinim eğrisi içinde yalnızca çok küçük bir lineer elastikliğe sahiptir. Şekil 2.5'de, bir Alporas köpüğünün ($p_r = 0.1$) basma, gerilim ve yükün kaldırılmasındaki gerilim-gerinim eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.5 Kapalı hücreli bir alüminyum köpük için ölçülmüş yük kaldırma modülü ile gerilim-gerinim ilişkisi

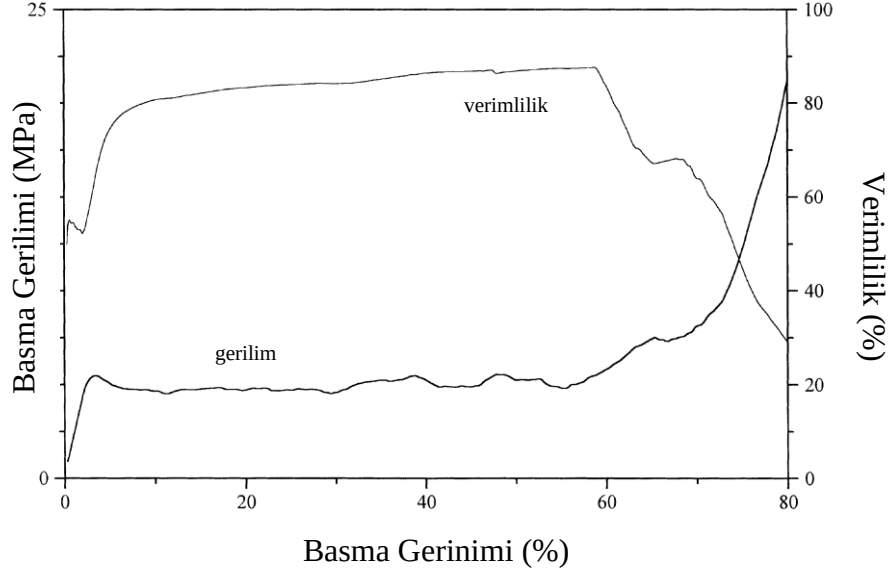
2.4.2. Basma Davranışı

Hücreli metaller basmada, Şekil 2.6' da gösterildiği gibi bir "plato bölgesi" ile benzersiz bir gerilim-gerinim eğrisi göstermektedir. Buna göre gerilim, gerinin geniş bir bölümü dışında neredeyse eşittir. Bu davranış, enerji absorpsiyon uygulamaları için nispeten sabit düşük gerilme ile deformasyonun büyük bir miktarı absorbe edildiğinden dolayı hücreli metalleri ilginç kılar. Malzemede, hangi köpükten yapıldığına bağlı olarak farklı deformasyon mekanizmaları (elastomerik, kırılma ve sünek davranış) gözlemlenebilir. Metalik köpükler genellikle büyük bir sünek davranış gösterirler.



Şekil 2.6 Sünek bir alüminyum köpük ve gevrek bir alüminyum köpük için basmada, gerilim-gerinim eğrisi

Şekil 2.7’ de basma yükü altındaki alüminyum köpüğün deformasyon davranışı gösterilmektedir. Malzeme tarafından hacim başına emilen enerji, gerilim-gerinim eğrisinin altındaki bölge ile doğrudan ilişkilidir. Köpük sabit bir deformasyon gerilimi gösterir ve bu nedenle her ikisi de belirli gerilim seviyesine kadar yüklendiğinde bütün alüminyum, bir parçasından çok daha fazla deformasyon enerjisi emebilir. Emilen enerjinin büyük bir bölümü alüminyum köpüğün büyük bir avantajı olarak geri dönüşümsüz olarak çevrilir. Yoğun matriksli malzeme aynı gerilim seviyesinde, yük kaldırıldıktan sonra depolanan enerjinin çoğunu bırakır. Tepki olmaksızın kontrollü bir darbe enerji emilimi, örnek olarak otomobil ezilme bölgelerinde talep edilmesi istenilirken yoğun bir malzemenin bu elastik davranışı rahatsız edicidir (Baumeister *et al.* 1997).

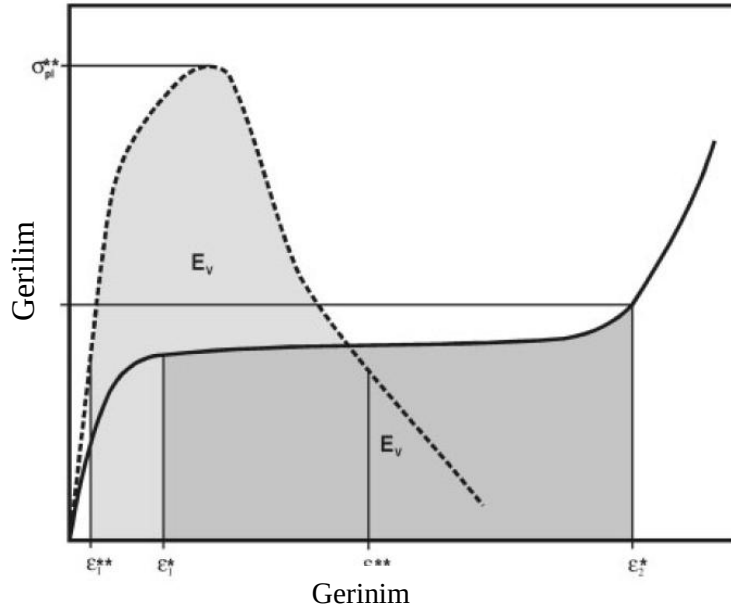


Şekil 2.7 Bir AlSi12 köpüğün basma gerilimi ve enerji emilim verimi (Baumeister *et al.* 1997)

2.4.3. Enerji Emilimi ve Darbe Davranışı

İyi enerji emiciler, nispeten düşük bir sabit gerilim seviyesinde büyük gerinimleri desteklemelidir. Hücreli metaller (özellikle köpükler) ve bazı polimer köpüklerin basma davranışlarından dolayı özellikle enerji absorpsiyon uygulamaları için uygundur. Bu uygulamalar için metal köpüklerin avantajları; nispeten düşük yoğunluk, ayarlanabilir plato gerilim seviyesi, iyi sıcaklık direnci ve yanmazlık gibi özelliklerdir. Bu nedenle, taşıma ve paketleme endüstrisi ürünleri için metalik köpükler kullanılabilir.

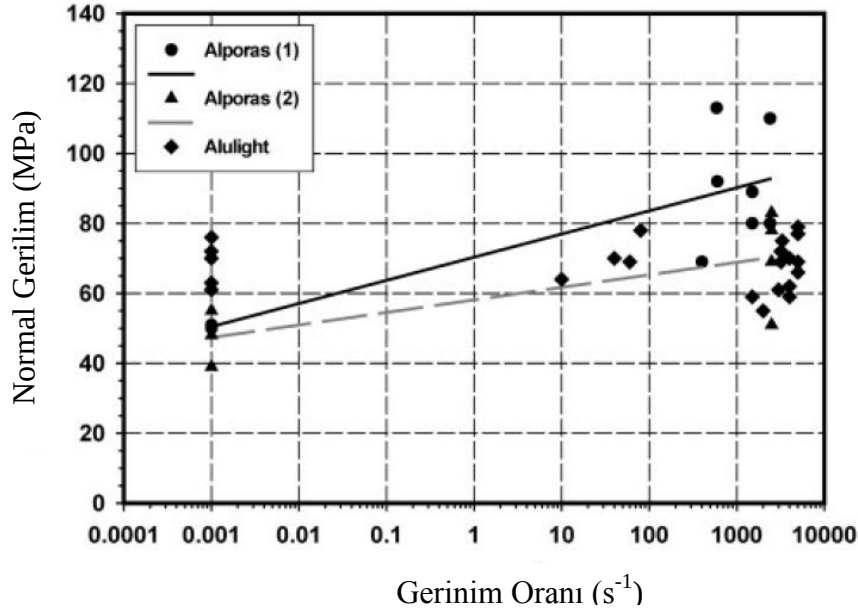
Hücreli metaller, geniş plato sistemi nedeniyle iyi bir enerji absorpsiyon verimine ve iyi bir enerji absorpsiyon kapasitesine sahiptir. Bir darbe anında, kinetik enerjiyi absorbe etmek için kuvvetler, gerilim seviyesi tarafından kontrol edilir. Darbe kuvvetleri, bir kişinin yaralanmasını veya bir paketin hasar görmesini engellemek için belli bir değeri aşmamalıdır. Bu nedenle Şekil 2.8’de gösterildiği gibi enerji emiliminde, yalnızca enerji absorpsiyon kapasitesi önemli değil, aynı zamanda malzemenin gerilim-gerinim eğrisi de büyük bir rol oynar. Belli bir gerinim aralığında hacim başına düşen emilmiş enerji miktarı E_v olarak gösterilmiştir ve iki farklı emici içinde aynıdır. Emicinin gerilim piki plato bölgesinin dışında daha yüksektir ve bu darbe kuvvetlerini arttıracaktır.



Şekil 2.8. İki farklı enerji emicinin basma gerilim-gerinim eğrisi (Degischer and Kristz 2002)

Taşıma sistemlerinde darbe emici olarak kullanılan hücresel metaller için yalnızca enerji absorpsiyon kapasitesi önemli değil aynı zamanda darbe davranışı da önemlidir. Kaza durumlarında oluşabilen yüksek deformasyon oranları, köpüğün mekaniksel özelliklerini değiştirebilir. Bunlar iki noktada dikkate alınmalıdır: hücre kenarlarının ve duvarlarının eylemsizlik kütlesi ve kapalı hücreli bir köpüğün hücreleri içindeki gaz basıncı ve gaz akışı. Her iki etki de akış gerilimini arttırabilir ve bu nedenle, gerinim oranının artması ile köpüğün plato gerilimi de artar. Bu durum, akış geriliminin artmasının önemli olmadığı açık hücreli yapılarda daha yüksek oranlarda gözlemlenir. Yapısal elementlerin eylemsizlik kütlesi akış geriliminde hiçbir katkı sağlamaz. Bu durum, metal köpüklerin bir kısmının gerilim-gerinime bağıllık göstermesi nedeniyle, kapalı hücreli köpüklerde farklıdır. Gerçek kapalı hücreli metalik köpükler genelde, sıklıkla üretim işleminde ortaya çıkan hücre duvarlarındaki bazı başlangıç hataları içermesi nedeniyle tamamen kapalı hücreli yapılar değildirler. Hatalara ek olarak, hücre duvarları yırtılması deformasyon işlemi esnasında oluşur. Bu hatalardan dolayı hücreler arasındaki gaz akışı, gerinim oranına bağlıdır. Böylece, hücreler içindeki gaz basıncı yüksek hızlı deformasyon esnasında akış geriliminin de katkısıyla artar. Deformasyon bantlarındaki bölgesel gerinim nedeniyle, bölgesel gerinim oranı ilk küresel olarak ölçülmüş değerden çok daha yüksektir. Dolayısıyla, gerinim oranı etkisi ile artacaktır. Alüminyum köpüklerdeki araştırmalar Şekil 2.9’da gösterildiği gibi, gerinim oranı 10^{-3} ’den 10^3 ’e arttığında plato gerilimi %20-90 arasında artış göstermiştir. Gerinim oranı

etkisi genellikle köpükten yapılan alaşım ve hücre morfolojisi tarafından kontrol edilmektedir (Degischer and Kristz 2002).



Şekil 2.9 İki farklı alüminyum tipinin plastik dayanıma bağlı olarak değişen gerilim- gerinim eğrisi (Degischer and Kristz 2002)

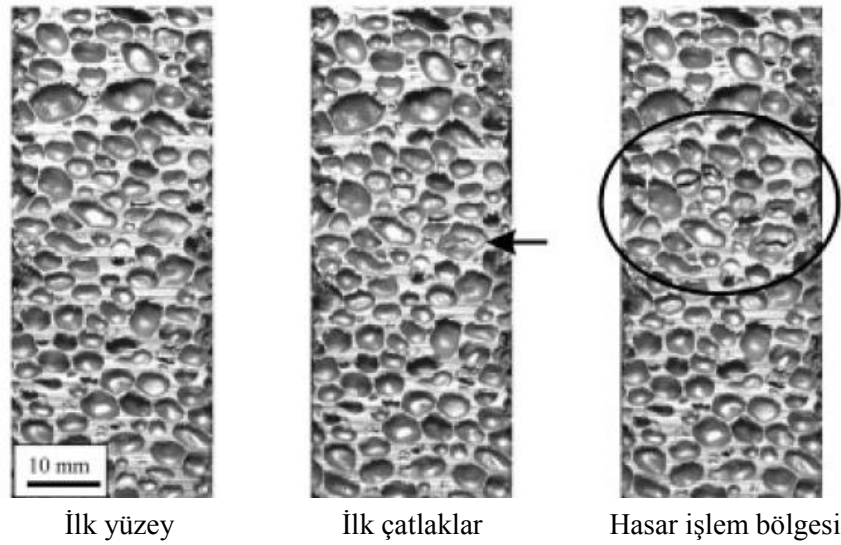
2.4.4. Gerinim Davranışı

Metal köpüklerin üretim işlemlerindeki iyileştirmeler, metalik köpüklerin kalitesini arttırmıştır ve gerçek bir yapısal malzeme olarak yeni uygulamalar ortaya çıkmıştır. Mekaniksel özelliklerden dolayı, gerinim ve kırılma gibi davranışlara ek olarak basma ve enerji absorpsiyon performansının da bilinmesi gerekmektedir.

Başlangıçtaki deformasyon modu, açık hücreli köpüklerdeki hücre kenarlarının esnemesi ve basmaya ek olarak, kapalı hücreli köpüklerdeki hücre duvarının basması ve uzamasına çok benzerdir. Ancak akma sonrasındaki aşamada, deformasyon mekanizmaları basmadan oldukça farklıdır. Basmada, hücrenin kırılma veya plastik çöküşü, eksenel yüklemeye dik olarak deformasyon bantları içerisinde gerçekleşir. Gerinimde, hücre duvarları ve hücre kenarları içinde çekme geriliminin baskın olmasından dolayı bu elementlerin burulması mümkün değildir.

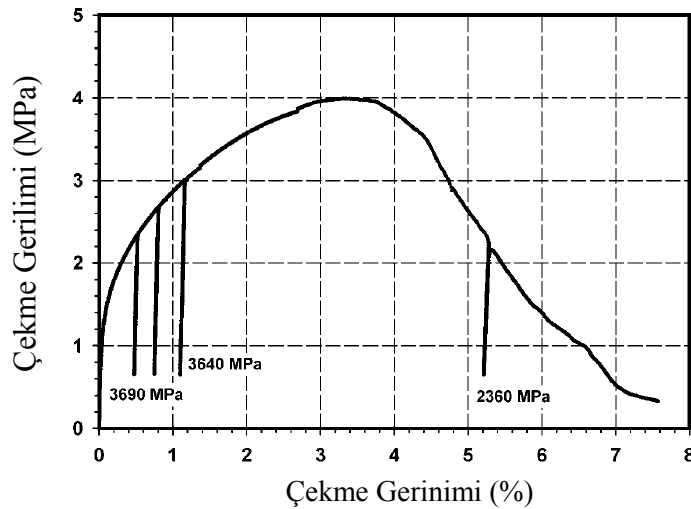
Sünek hücresel metallerde (örneğin alüminyum köpükler), hücre kenarları ve hücre duvarlarının çatlaması, bir ana çatlağın yayılmaya başlamasından önce de görülebilir.

Bir hasar işlem bölgesi, deformasyonun artması ile deformasyon yoğunluğu artarak gelişmeye başlar. Kapalı hücreli metallerde birkaç hücre duvarı bu hasar işlem bölgesi içinde yırtılır. Ayrıca deformasyon, hücresel yapı içindeki zayıf bir yol boyunca ana çatlağın yayılmasına ve gelişmesine yol açar. Sadece güçlü hücre kenarları bozulmaz ve birlikte iki köpük parçasını tutarlar. Bu işlem, akış gerilimini düşürür. Gerilim-gerinim eğrisi içindeki olaylar, sünek bir kapalı hücreli alüminyum köpüğün hasar mekanizması ve ilgili deformasyon işlemi Resim 2.1’de gösterilmiştir (Degischer and Kristz 2002).



Resim 2.1 Alüminyum köpüğün gerinimdeki hasar mekanizması (Degischer and Kristz 2002)

Bazı zayıf hücre duvarlarında çatlak oluşmuş ve daha sonra bir hasar işlem bölgesi gelişmiştir. Şekil 2.10’da ise bu hasar bölgesinin gerilim-gerinim eğrisi mevcuttur.

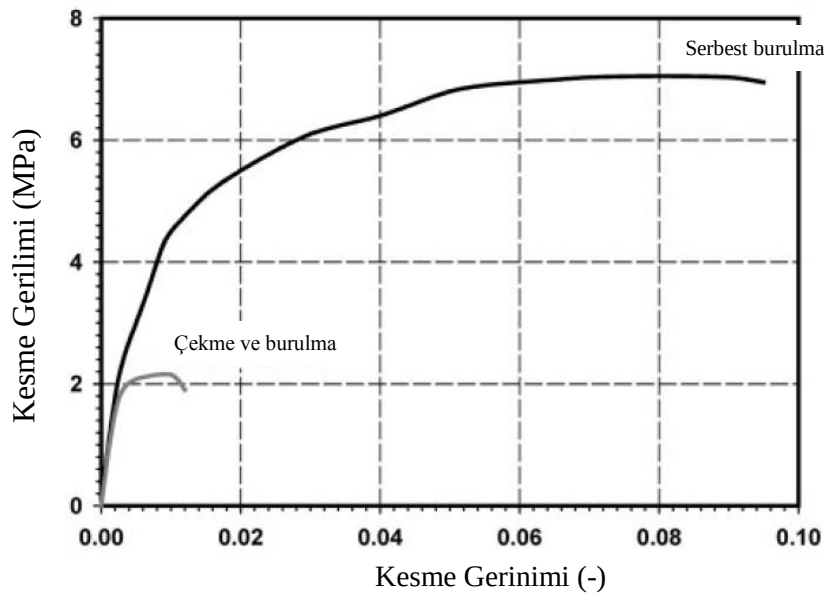


Şekil 2.10 Yük kaldırma modülü ile alüminyum köpüğün çekmedeki gerilim-gerinimi

2.4.5. Burulma Davranışı

Burulmada, hücre kenarları eğilmeye, hücre duvarları ise eğilme ve kesmenin bir kombinasyonuna maruz kalır. Kesme davranışı, malzeme yasalarının gelişimi ve ayrıca sandviç yapılarıdaki uygulamalar için önemlidir.

Çoğu köpük, çekme testleri ile karşılaştırıldığında serbest bükmede önemli derecede daha büyük deformasyon başarısızlığı gösterir. Tipik bir örneği Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Numune kırıldığında bükme testi esnasında aksenal olarak sabitse, ek olarak çekme gerilmeleri numune üzerinde oluşmuştur ve hasar için gerinim, gerinim testlerinde belirlenmiş seviyede azalır.



Şekil 2.11 Bükmede aksenal çekme gerilimi ve aksenal olmayan gerilim ile alüminyum köpüğün gerilim-gerinim eğrisi (Degischer and Kristz 2002)

Önemli özellikler; kesme modülü (G), kesme dayanımı (γ_t) ve hasar için kesme gerinimidir. Numune içindeki çeşitli gerilim bölgeleri, bükme testi esnasında numune üzerine çekme ve basma yükleri uygulanması ile elde edilmiştir (Degischer and Kristz 2002).

2.4.6. Termal, Elektriksel ve Akustik Davranış

Köpükler, belirli koşullar altında titreşimleri ve sesi sönmüleyebilir. Üstelik köpüklerin termal iletkenliği düşüktür. Bu özellikleri ile üstün olmamakla birlikte (polimer

köpükler ses emici olarak daha iyidir) köpüğün diğer özellikleri ile birleştirildiğinde yararlı olabilir (Banhart 2005).

Gaz kabarcıklarının varlığı, hücresel katıların elektriksel, termal ve akustik özelliklerini önemli derecede etkiler. Polimer köpükleri kapsayan bu özellikler önemli bir rol oynar: ısı yalıtımı ve gürültü emilimi, malzemenin bu türleri için uygulamanın ana uygulaması yanında paketlenme de vardır. Ancak, hücresel metaller göz önüne alındığında bahsedilen özelliklere özen gösterilmesi gerekir.

Hücresel metallerde, polimer ve daha seramik matrisin, elektriksel iletkenliği için farklılıklar vardır. Bu basit gerçek, büyük ölçüde tipik uygulamaları değiştirir: seramik ve polimerik köpükler, yalıtım ve yapısal muhafazalar için kullanılabilir. Köpük metallerin elektriksel iletkenliği gözeneklilik ile önemli derecede azalmasına rağmen, hala iyi elektriksel topraklama, düşük elektrik teması veya elektromanyetik dalgaları emme kapasitesini sağlamak için oldukça yeterlidir. Açık hücreli yapı ile metalik sünger olması durumunda, büyük erişilebilir alanda elektrik potansiyelini dağıtmak için iletkenliğe izin verir ve bu da onları pil elektrotları için cazip hale getirmektedir. Hücresel nikeller, bu uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 2.2’de farklı üretim yöntemleriyle üretilmiş alüminyum köpüklerin yoğunluğu, termal ve elektriksel iletkenliği gösterilmiştir (Degischer and Kristz 2002).

Çizelge 2.2. Tedarikçi veri formundan alınan oda sıcaklığında ölçülmüş çeşitli yoğunluklardaki hücresel alüminyumun, elektriksel ve termal iletkenliği (Degischer and Kristz 2002)

Tedarikçiler	Yoğunluk (kg.m ⁻³)	Termal iletkenlik (W/mK)	Elektriksel iletkenlik (m/Ωmm ²)
Alporas	570	-	9.9
	400	-	5.0
	300	-	3.8
	200	-	2.6
	94	-	1.0
Alulight	500	13	3.1
	400	10	2.6

Çizelge 2.2. (Devam)Tedarikçi veri formundan alınan oda sıcaklığında ölçülmüş çeşitli yoğunluklardaki hücresel alüminyumun, elektriksel ve termal iletkenliği (Degischer and Kristz 2002)

Tedarikçiler	Yoğunluk (kg.m ⁻³)	Termal iletkenlik (W/mK)	Elektriksel iletkenlik (m/Ωmm ²)
Cymat	300	8.9	1.9
	540	0.91	-
	410	0.7	-
	270	0.4	-
	160	0.36	-
	68	0.28	-
ERG	330	-	2.1
	250	-	1.6
	200	-	1.2
	140	-	0.9
Norsk Hydro	300	2.1	0.50
	250	2.1	0.36
	150	1.5	0.27

Hücresel metaller ile ilgili pratik öneme sahip ana termal özellikler, ergime noktası, kararlı sıcaklık, ısıl genleşme katsayısı, termal iletkenlik, termal difüzyon, yüzeye yayılma, ısı ve termal şok direncidir. Bu özelliklerin bir kısmı, dökme malzemeler için hemen hemen aynıdır, diğerleri ise gözenek yapısına bağlıdır.

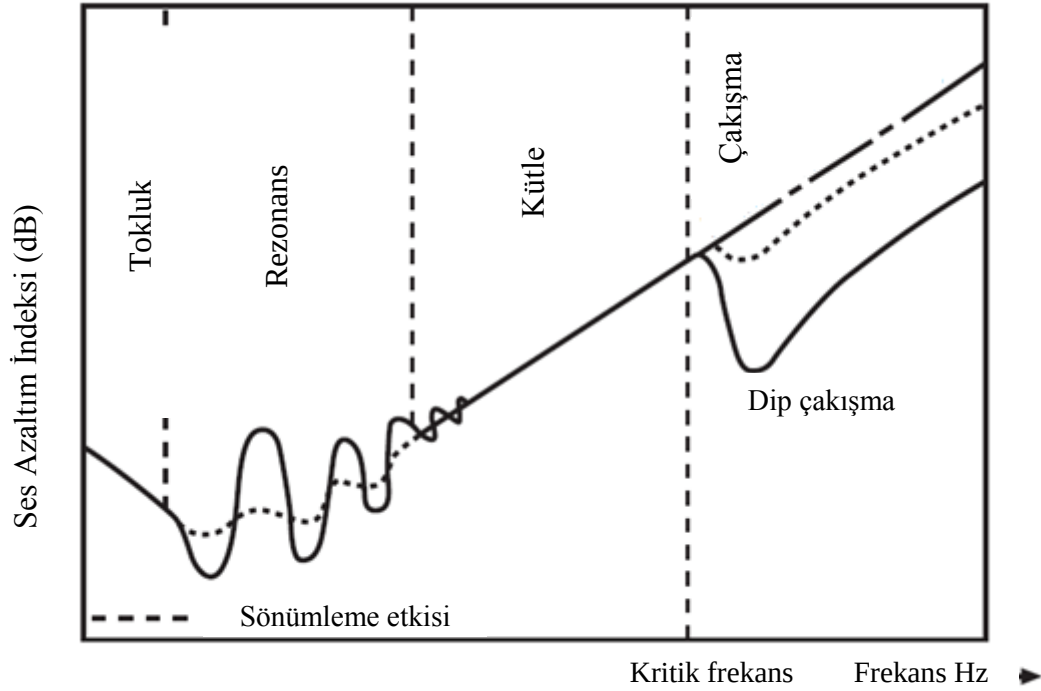
Hücresel metallerin ergime noktası, köpükten yapılmış bir alaşım için pratik olarak aynıdır. Ancak yüzey yoğun olarak, örneğin malzemenin alüminyum olması durumunda genellikle oldukça yüksek olan ergime noktası ile devam eden bir oksit tabakası tarafından kapatılmıştır. Oksit tabakası ile çevrilmiş yüzey bölgesi, artan gözeneklilik ve azalan gözenek boyutu ile artar. Yapı, yeterince uzun süre için ergime noktasına yakın hava veya oksitleyici atmosfer içerisinde ısıtıldığında, oksit tabakasının kalınlığı artar ve daha kararlı hale gelir. Belirli bir kalınlığa vardıktan sonra numunenin mekaniksel kararlılığına bağlı olarak, metalik hücre duvarları seramik bir köpük içine hücresel metalin çevrilme sıcaklığından sonra tamamen okside olur. Örneğin bu

davranış, Duocell süngerlerine benzer açık hücreli metalik öncülerden seramik süngerin hazırlanması için kullanılmıştır.

Bir birim sıcaklık tarafından hücresel yapının sıcaklığını arttırmayı gerektiren enerji, birim kütle dikkate alındığında hücre duvarlı malzemeler için gerektirdiğine benzer olarak hemen hemen aynıdır. Küçük fark, ince oksit yüzeyleri ve içerdiği havanın varlığı oluşturuyor olabilir. Ancak hücresel bir yapıda birim hacme düşen öz ısı (C_v), önemli derecede daha düşük olmasına sebebiyet verir. Termal kapasitenin düşük olduğu yerlerdeki uygulamalar için onları çekici kılan, örneğin hızlı ısıtma ve soğutma sistemleri için gereklidir.

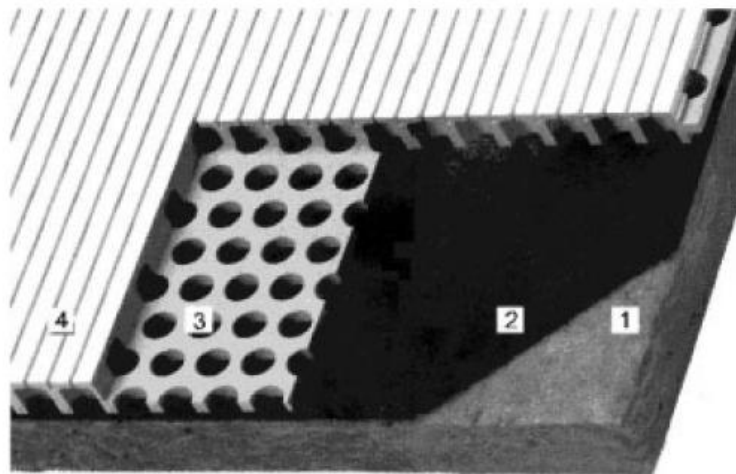
Hücresel metallerin ısı genleşme katsayısı (α), termal iletkenlikten (λ) çok daha düşük olduğunda hücre duvarlı malzeme ile neredeyse aynıdır. Distorsiyondan kaynaklanan yüksek ısı, (α/λ) oranının yükselmesi ile artar. Bunu önlemek için, ısıtma veya soğutmada hücresel yapı içindeki sıcaklık farkları en aza indirilmelidir.

Malzemenin ses yalıtım performansı, ses iletim katsayısı ile ses azaltma endeksi doğru orantılı olduğu için logaritmik skalada bu değer, ses azaltma endeksi açısından tanımlanmıştır. Bir panel için ses iletim katsayısı, ses yoğunluğu olayında iletim oranı tarafından belirlenir. Ses azaltma endeksi, frekansa, yapının malzemesine ve geometrisine bağlıdır. Belirli bir malzeme için ses azaltma endeksi, belirli frekans aralığında önem kazandığı için çeşitli mekanizmalar tarafından kontrol edilir. Şekil 2.12’de iletim kaybı eğrisinin genel formu görülmektedir (Degischer and Kristz 2002).



Şekil 2.12 Belirli bir malzeme ve yapı geometrisi için frekansın, bir panelin ses azaltım endeksine bağlılığı (Degischer and Kristz 2002)

Frekans, maksimum ses emilimine ulaşıldığında boşluk geometrisi tarafından ayarlanabilir. Düşük frekanslara doğru (tercihen 100-1000Hz aralığında) emilim performansı artar. Şekil 2.13’de ses emiliminin artması amacıyla malzemenin kendi üzerine daha karmaşık yapıların yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Tipik bir ses emici yapı: kalın cam fiber emici (1), ince koruyucu ve sönümleyici folyo (2), rezonatör boşluğuna sahip ağaç panel (3) ve dış tasarım (4).

2.5. Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri

Metalik köpükler uzun yıllardır üretilmekle birlikte daha düşük maliyet ve daha iyi performans sağlayan ürünler meydana getirilebilmesi için birçok üretim metodu geliştirilmiştir. Farklı üretim yöntemlerinden bazıları ise ticari isimleri ile adlandırılmıştır.

Metalik köpükler; ergitme bazlı, toz bazlı ve çökelme yardımıyla olmak üzere genel olarak 3 farklı üretim yöntemi mevcuttur. Çizelge 2.3’de üretim yöntemlerinin bir özeti gösterilmiştir.

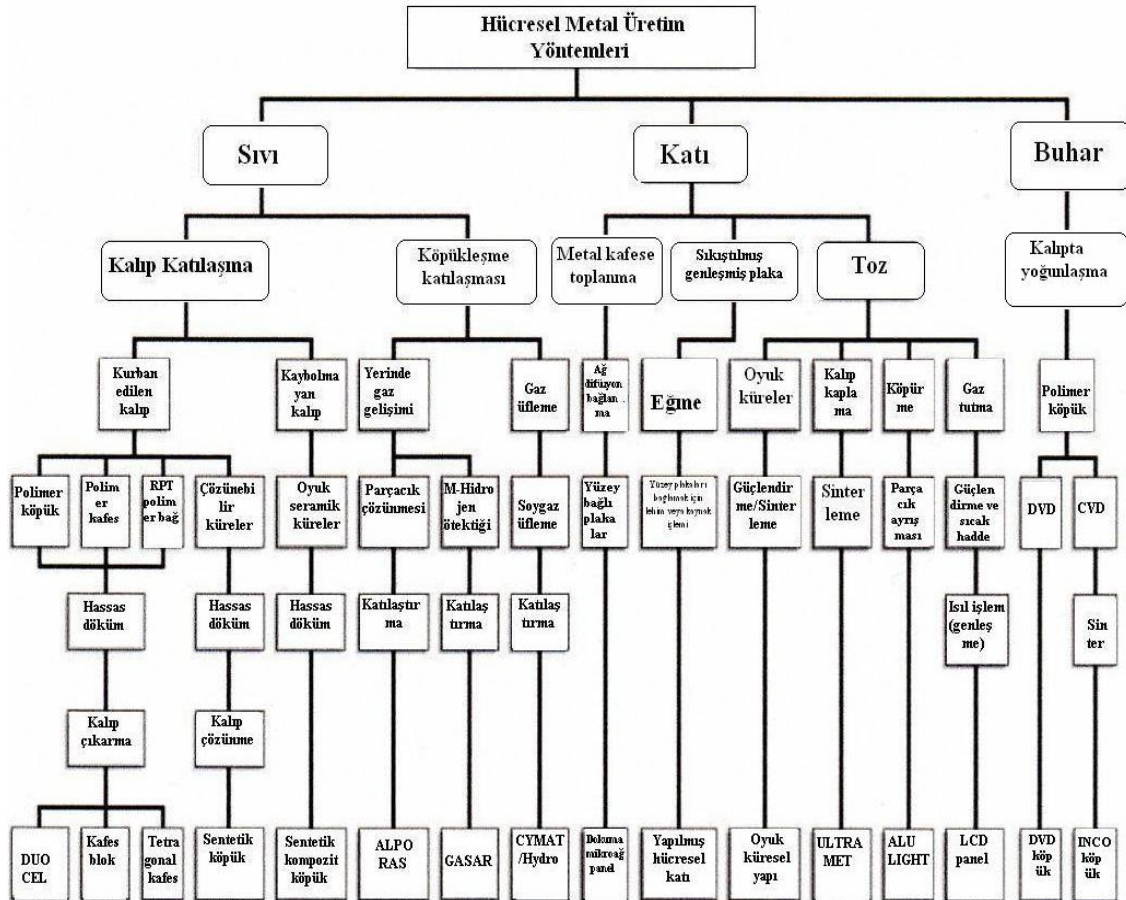
Çizelge 2.3. Temel malzeme özellikleri ile birlikte verilen metalik köpüklerin ve köpüklü yapıların ana üretim tekniklerinin listesi (Gergely *et al.* 2000)

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

Çizelge 2.3. (Devam) Temel malzeme özellikleri ile birlikte verilen metalik köpüklerin ve köpüklü yapıların ana üretim tekniklerinin listesi (Gergely *et al.* 2000)

Üretim Tekniği	Katı Hal Bileşimi	Gözeneklilik	Hücre boyutu ve tipi	Ticari adı veya tipi
Sinterleme	Çelik, Ti ve Ni bazlı içi boş küreler	%65-87	0,5-6mm, kapalı hücreli	İçi boş küre yapılar
	Farklı metal tozlar	%30-50	Ara bağlantılı ağlar	Sinterlenmiş tozlar
	Farklı metal fiberler	<%95	Ara bağlantılı ağlar	Sinterlenmiş fiberler
Çökelme				
Elektro-kimyasal	Ni	<%96	Açık hücreli köpük	CELLMET METAPORE
Akımsız	Ni	<%99	Açık hücreli köpük	INCO

Şekil 2.14’de metalik köpüklerin çeşitli üretim yöntemlerinin kısa bir özeti verilmiştir.



Şekil 2.14 Hücresel metal üretim yöntemlerinin katı, sıvı ve buhar fazı olarak sınıflandırılması (Haydn and Wadley 2002, Özer 2005)

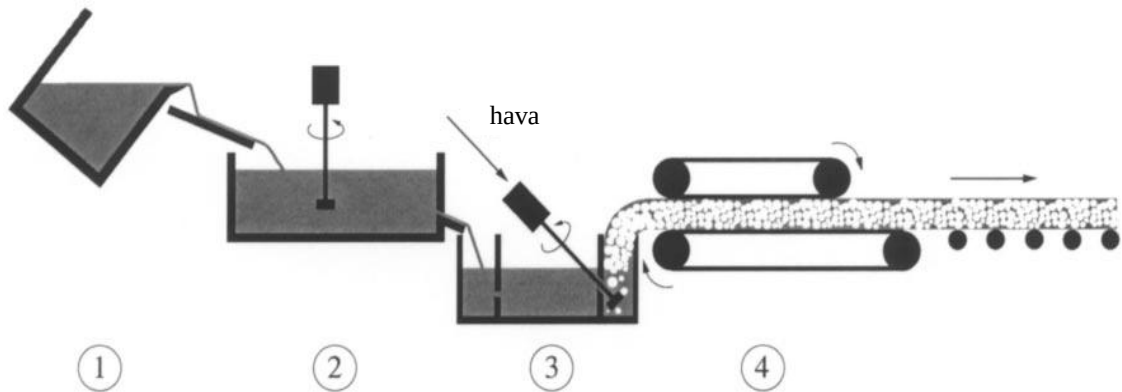
2.5.1. Ergitme Bazlı Metalik Köpük Üretimi

Ergitme ve döküm yöntemi ile metalik köpük üretimi başlıca 3 aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada köpürtülecek metal veya alaşım ergiyik hale getirilir. İkinci aşamada gözenekli yapı oluşturmak için gaz veya köpürtücü madde ilave edilir. Üçüncü aşamada soğutma işlemi yapılarak ergiyik metal katı hale getirilir (Çinici 2004).

Ergiyik metal içerisinde gaz kabarcıkları oluşturularak yapılan köpük üretiminde, sıvının yüksek kaldırma kuvvetinden dolayı yüzeye doğru hızlı kabarma eğiliminde olan gaz kabarcıklarıyla metalik köpük şekli verilmiştir. Aşırı derecede yüksek viskozite, kabarcıkların düzeninin bastırılmasına neden olurken, aşırı derecede düşük viskozite, kabarcıkların hızlı yüzdürülmesine neden olur (Ashold 1999).

2.5.1.1. Gaz Enjekte Ederek Gözeneklendirme

Köpüklendirme için bu ilk yol alüminyum ve alüminyum alaşımları kullanılarak Norveç'te Hydro alüminyum ve Kanada'da Cymat alüminyum firmaları tarafından kullanılmıştır (Kullanılan metotlar ve patentler Alcan International tarafından geliştirilmiştir.). Şekil 2.15'te bu işlemin şematik bir özeti gösterilmiştir (Ogan 2008).

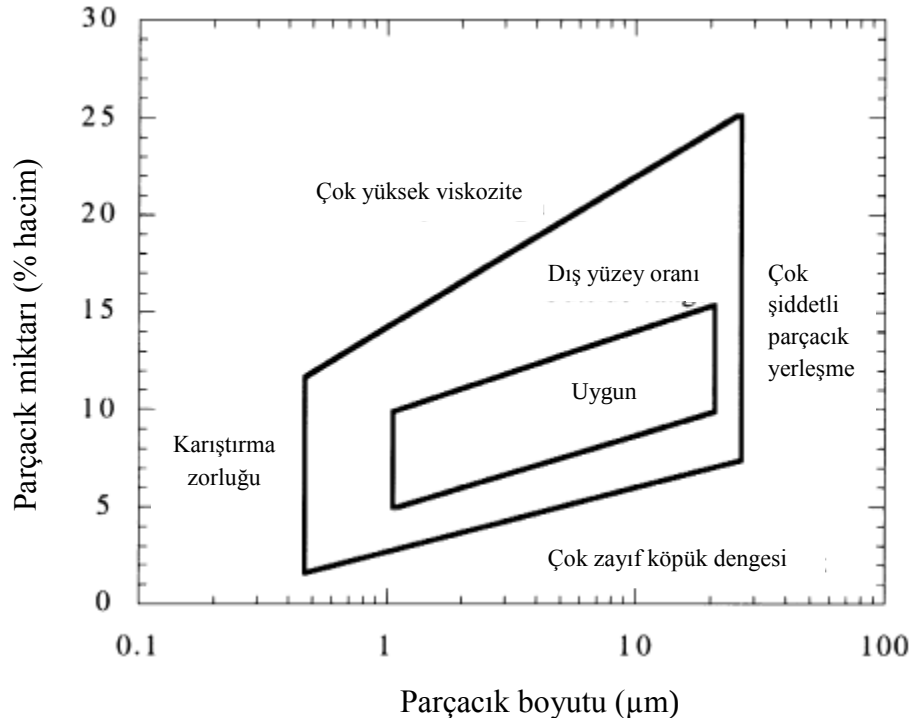


Şekil 2.15 İnce panellerin üretimi için Alcan tarafından geliştirilmiş sürekli olan köpük işleminin şematik gösterimi. Resimdeki sistemin bileşenleri: 1-Ergitme fırını, 2-Bekletme fırını, 3-Köpükleştirme kabı, 4-İkiz kemer tekerlekleri (Ogan 2008).

Şekil 2.15'te de gösterildiği gibi, ilk aşamada köpürtülecek metal ergitilir. Ergitilen metal içerisine viskoziteyi ayarlamak için refrakter parçacıklar ilave edilir ve karıştırılır. İkinci aşamada özel olarak tasarlanmış dönel pervane ve titreşimli nozullar yardımıyla ergiyik içerisine hava, azot veya argon üflenerek gaz kabarcıkları meydana getirilir.

Yüzeyde oluşan metal-gaz kabarcıkları taşıma bantları kullanılarak ergiyik yüzeyinden çekilip düz levha şeklinde hafifçe haddeden geçirilmiştir. Son olarak metalik köpük soğutulmuştur (Çinici 2004).

Bu işlemde kullanılan refrakterler zirkon veya silisyum karbür, alüminyum oksit, magnezyum oksit ve titanyum diborür gibi parçacıklardır ve genellikle bazı eritilmiş alüminyum alaşımlarından birini stabilize etmek için kullanılmışlardır. Takviye parçacıkları %10-20 hacminde ve 5-20 μ boyutları arasında ilave edilir. Parçacık hacmi ve boyutunun çok az veya fazla seçilmesi çeşitli problemler yaratmaktadır. Bu durum Şekil 2.16’da görülmektedir (Gergely *et al.* 2000, Banhart 2005, Özer 2005).

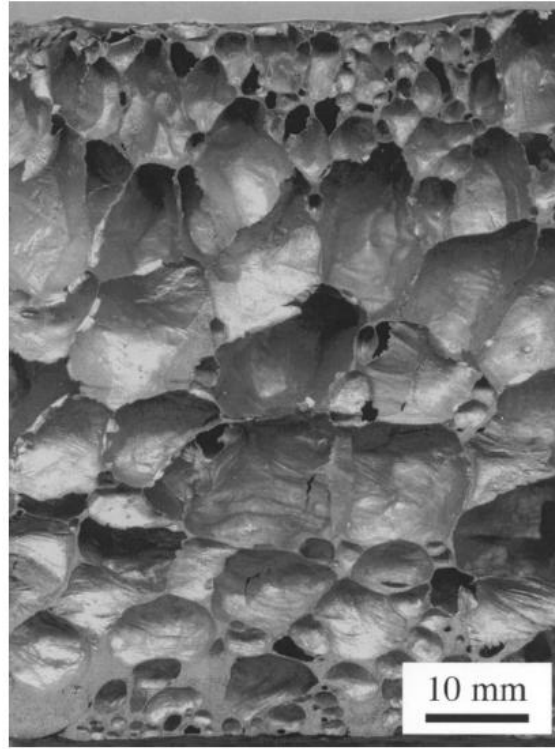


Şekil 2.16 Gaz enjeksiyon (Alcan) yöntemi yardımıyla üretilen köpüğün optimizasyonu için önerilen seramik parçacık boyutu ve hacim oranları (Gergely *et al.* 2000)

Bu yöntemle üretilmiş alüminyum köpüğün yoğunluğu 0,069 g/cm³ ile 0,54 g/cm³ arasında değişmekte, ortalama gözenek ebatları 3-25 mm ve gözenek duvar kalınlığı 50-85 μ m arasında olmaktadır. Özel olarak tasarlanmış dönel pervaneler ve titreşimli nozullarla homojen dağılımlı gaz kabarcıkları meydana getirmek mümkündür. Gaz akışı, nozul titreşim frekansı, pervane hızı ve diğer parametrelerin ayarlanması ile ortalama gözenek boyutları, ortalama gözenek duvar kalınlığı ve köpük yoğunluğu değiştirilebilir. Kullanılan çeşitli alaşımlar ise şöyledir: 1060, 3003, 6016 veya 6061

gibi dövme alaşımlar veya AlSi10Mg (A359) dökme alaşımlar gibi çeşitli alüminyum alaşımlar (Kenny 1996, Banhart 2001,).

Ergiyik metal içerisine gaz enjekte edilerek üretilen metalik köpüğün gözenek yapısı Resim 2.2’de gösterilmiştir. Hafif haddeden geçirilerek oluşturulan metalik köpükte, gözeneklerin birbirlerine benzedikleri görülmüştür. Yer çekimi etkisinden dolayı ergiyik metalde aşağı doğru meydana gelen akma, üst kısımda gözenek yoğunluğunun artmasına sebep olmuştur. Metalik köpük merkezinde meydana gelen uzun soğuma süresinden dolayı gözeneklerde genişleme meydana gelmiştir (Çinici 2004).



Resim 2.2 Gaz enjeksiyon (Alcan) yöntemi ile üretilmiş bir köpüğün bir bölümünün optik mikrografı (Çinici 2004)

Bu yöntemin en önemli avantajı büyük hacimlerdeki köpüklerin sürekli bir şekilde üretilmesi ve düşük yoğunluğun başarılabilmesidir. Bu yöntemle üretilen alüminyum köpük metaller daha düşük fiyata sahip olabilmektedir. Kanada şirketi Cymat 1,5 m genişlikte, 2,5-15 cm kalınlığında köpük plakaları saatte 1000 kg kapasite ile dökmeaktadır. Bu yöntemin dezavantajı ise üretilen panellerin kesilmesi, istenilen şekle getirilmesi gibi problemlerdir. Yöntemin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.4’de görülmektedir (Özer 2005).

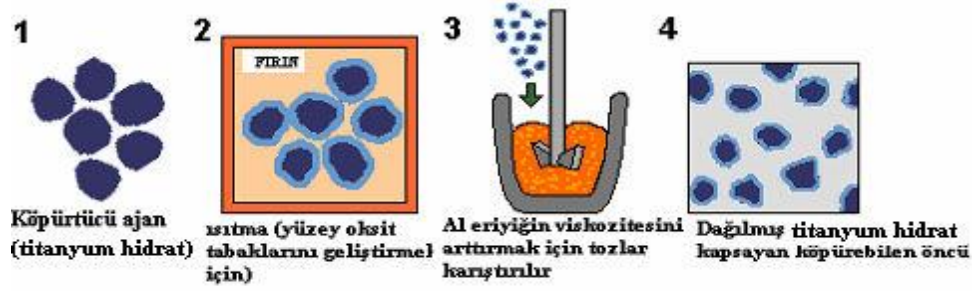
Çizelge 2.4. Gaz üfleyerek üretilen metalik köpüklerin avantaj ve dezavantajları (Özer 2005).

Avantajlar	Dezavantajlar
• Sürekli üretim için çok uygun bir yöntemdir ve büyük miktarlarda üretim yapılabilir. • Ucuz ve nispeten basit bir işlemdir.	• Gaz dağılımını kontrol etmek zordur ve gözenekler her zaman büyüktür (0,5-1cm). • Gözenek boyutu üzerinde kontrol zordur ve tesadüfî çok büyük gözenekler oluşabilir bu da mukavemeti kötü etkiler. • Sadece levha dökümüne uygundur ve yüzey kesimi düzensizdir. • Önceden seramik parçacıkların araştırılması gerekir. Bu bütün alaşımlar için uygun değildir (bazı alaşımlar yeteri kadar viskoz değildir).

2.5.1.2. Gecikmeli Serbest Gaz Oluşumu ile Gözeneklendirme

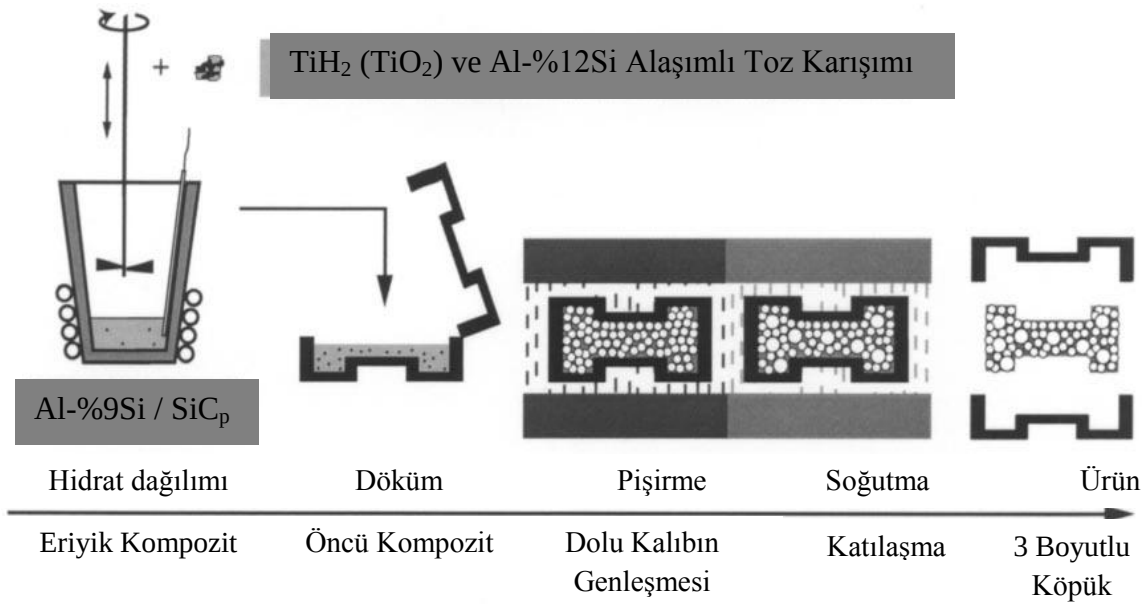
Bu işlem, “Foaming of reinforced metals by gas release in precursors” kelimelerinin baş harfleri kullanılarak FORMGRIP ismini almıştır. Bu işleme göre titanyum hidrat parçacıkları, sıvı metale eklenip karıştırıldıktan sonra eriyiğin katılaşmasına olanak verilmiştir (Banhart 2003, Babcsán *et al.* 2003, Banhart 2005, Özer 2005,)

Şekil 2.17’de görüldüğü gibi ilk işlem olarak, titanyum hidrat ısıtılma tabi tutulur ve eriyik içerisinde ayrışmalarını geciktirmek için her hidrür parçacık üzerinde bir oksit bariyeri oluşturulur. Daha sonra hidrit, eriyik alüminyumla karıştırılır (bununla beraber viskoziteyi arttırmak için eriyiğe SiC parçacıkları ilave edilir) ve hidrit parçacıklarının üzerindeki oksit, çözünmeyi geciktirici bariyer rolü oynar. Bu da metal, köpürtücü ajan ve SiC’den yapılmış düşük oranda gözenekli öncü üretir. Kararlı köpükler elde etmek için hacimsel olarak %10-15 SiC parçacıkları içeren eriyikler kullanılır (Banhart 2000, Babcsán *et al.* 2003, Banhart 2003, Banhart 2005, Özer 2005).



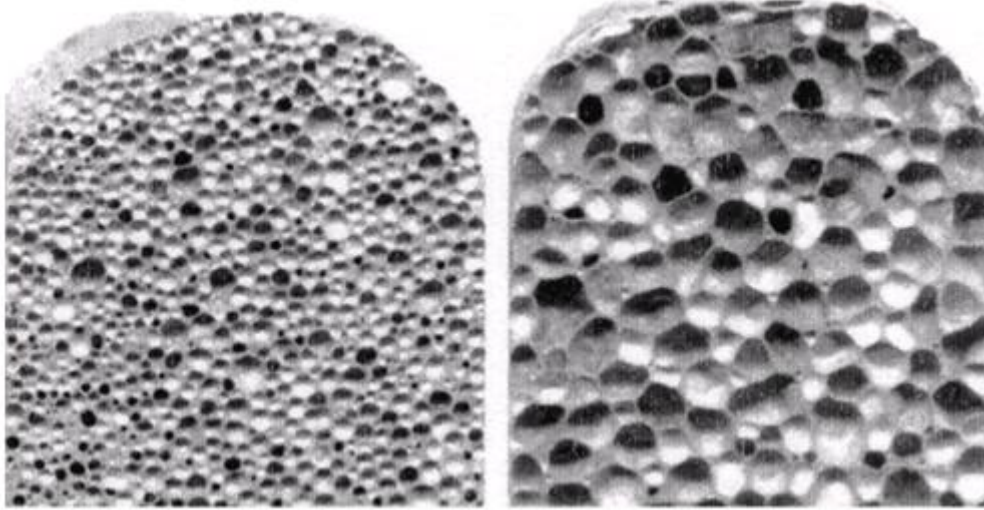
Şekil 2.17 FORMGRIP işleminin ilk adımı (Özer 2005)

İşlemin ikinci adımında, titanyum hidritin hidrojen gazı salıp çözünmesi için alaşım eritilerek, öncü yaklaşık 630°C 'ye ısıtılır. Dağılımın gelişmesinden dolayı köpükler tekdüze bir yapıya sahiptir. Pişirme zamanı ayarlanarak, 1-10 mm arası hücre boyutu ve %50-95 gözenekli yapıya sahip köpükler elde edilebilir. Daha sonra soğutularak ürün elde edilmektedir. Şekil 2.18'de FORMGRIP yönteminin tamamı şematik olarak görülmektedir (Özer 2005).



Şekil 2.18 FORMGRIP işleminin şematik olarak gösterimi (Gergely et al. 2000)

Köpükleştirme işlemi, farklı sıcaklık oranları ve final köpükleştirme sıcaklıkları tarafından etkilenebilir. Bu da, Resim 2.3'de görüldüğü gibi farklı gözenek boyutlarına sahip çeşitli ürünlerin oluşumunu sağlamaktadır (Banhart 2000).



Resim 2.3 Silisyum karbürlü alüminyum köpükler (Banhart 2000)

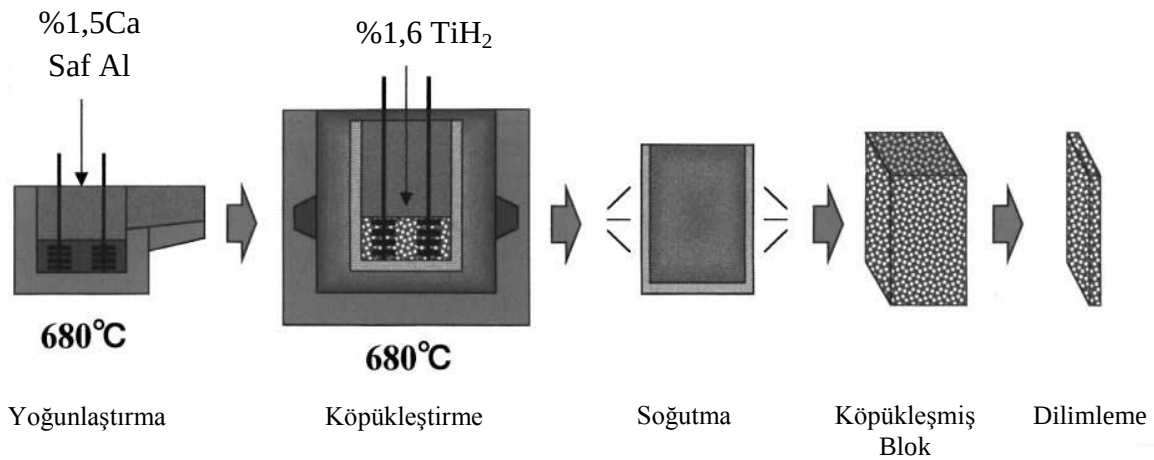
FORMGRIP işleminin ilk ve ikinci adımlarında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. İlk işlemde, titanyum hidrat parçacıkların eriyiğe atılıp karıştırılırken, erken hidrojen dönüşümünü önlemek için ya katılaşma hızlı olmalıdır ya da köpükleştirici ajan, bu aşamada daha çok gazın serbest kalmasını önlemek için pasif olmak zorundadır. İkinci adımda ise kalıp içerisinde TiH_2 tozlarının homojen dağılımı oldukça zordur. Bu yüzden, TiH_2 tozları nispeten yavaşça karıştırılarak eriyik içerisine ilave edilip ve daha sonra soğutmaya bırakılabilir (Banhart 2003, Babcsán *et al.* 2003, Bhanhart 2005).

Yakın zamanda, $CaCO_3$ vasıtasıyla alüminyum alaşımlarının köpükleştirilmesi yeniden araştırılmış ve “FORMGRIP” işlemine benzer olarak “FOAMCARP” işlemi geliştirilmiştir. $CaCO_3$ köpüğünden meydana çıkan CO_2 , bir oksit tabakası oluşturarak hücrelerin yüzeyini oksitlendirir ve CO’yu azaltır (Wightman and Fray 1983, Gergely *et al.* 2003).

FORMGRIP işlemi olarak adlandırılan bu teknik, ekonomik cazibesi ve kirlilik toleransı açısından bir eriyik yönteminin avantajlarına sahiptir. Aynı zamanda malzemenin katı haldeki stoku, bir kalıp içerisine yerleştirilebilmesi ve basit bir “fırın” operasyonu yardımıyla köpükleştirilebilmesi için uygundur ve üretilebilmesinde toz bazlı yöntemlerin çok yönlü karakteristiğinin olmasının da payı vardır. Köpükleşmiş metal, geleneksel yöntemlerle üretilmiş parçalarla birleştirilebildiği için bu teknik aynı zamanda karmaşık sistemlerin üretimi için de uygundur (Gergely *et al.* 2000).

2.5.1.3. Köpükleştirici Ajanlar Yardımıyla Gözeneklendirme

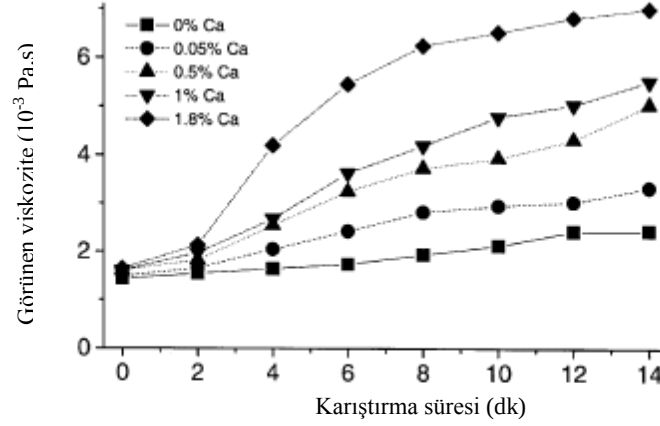
Alüminyum köpük üretmek için toplu bir döküm işlemi olan bu işlemin patenti, Japonya Amagasaki'deki Shinko Wire Company Ltd. tarafından alınmıştır ve bu köpük şu an endüstriyel alanda “ALPORAS” ticari ismiyle kullanılmaktadır. Firma, 1986'dan beri günde 1000kg köpük üretim hacmi ile köpükler üretmektedir. Şekil 2.19'de bu işlemin genel bir şekli gösterilmiştir (Akiyama *et al.* 1987, Gergely *et al.* 2000, Banhart 2001, Banhart 2003, Çinici 2004, Özer 2005, Banhart 2005) .



Şekil 2.19 Üfürülen ajanlar ile eriyiğin direkt köpükleştirilmesi (Alporas işlemi)

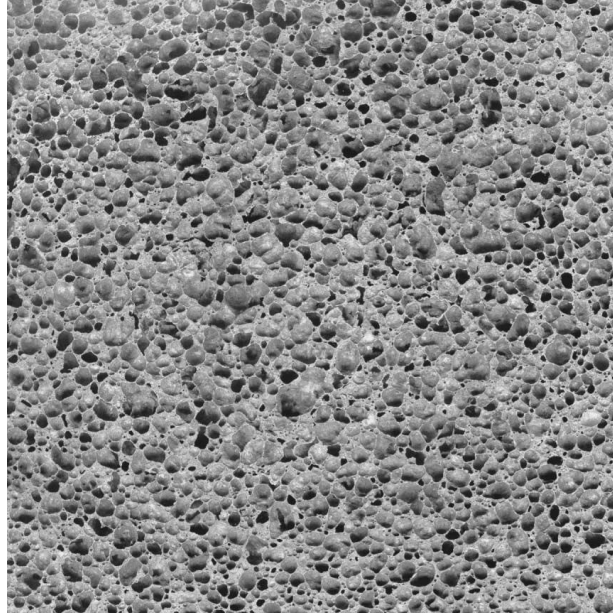
Bu işlemde ilk olarak, eriyik alüminyum (yaklaşık 680°C) içerisine kalsiyum (yaklaşık olarak metal ağırlığının $\%1,5$ oranında) dağıtılır ve karıştırılır. Bu esnada, kalsiyumun oksijene karşı büyük bir ilgisi olduğundan, meydana gelen CaO ve CaAl_2O_4 gibi oksitlenmiş ve ince bileşikler, eriyik geneline dağılmışlardır. Bu, eriyiğin viskozitesinin önemli derecede artmasına neden olur. Ardından, eriyik içerisine titanyum hidrit tozu ilave edilir ve eriyik, daha sonra bir kalıba dökülür. Hidrit, termal ayrışmaya ve/veya oksidasyon reaksiyonuna uğrar ve gaz, eriyik içerisinde köpükler oluşturur. Son olarak köpük, hava püskürtmeli soğutma kullanılarak soğutma oranının arttırılması ile katılaşmasına izin verilir. Köpükleştirme tamamlandığında eriyik, hidrojenin serbest kalması ve köpüklerin birleşmesi veya çökmesinden önce köpük katılaşmıştır (Gergely 2000 *et al.*, Ashby *et al.* 2000).

İşlemin kontrolü basınç, sıcaklık ve zamanın ayarlanması ile sağlanmaktadır. Şekil 2.20’de farklı kalsiyum oranlarıyla viskozitesinin değişimi gösterilmektedir (Ashby 2000 *et al.*, Miyoshi *et al.* 2000).



Şekil 2.20 Kalsiyum metalinin ilave edilip karıştırılmasından sonra bir alüminyum eriyiğin viskozitesi üzerine karıştırmanın etkisi (Miyoshi *et al.* 2000)

Bu yöntemle üretilmiş köpüklerin boyutları 2050*450*650mm, gözenek boyutları yaklaşık 4,8mm ve gözenekliliği ise %84-93 oranındadır. Malzeme, yapısal homojenliği açısından ticari olarak en iyi kapalı hücreli köpüklerden biri olarak kabul edilir. Resim 2.4’de bu yöntemle üretilmiş bir alüminyum köpük gösterilmiştir (Gergely *et al.* 2000).



Resim 2.4 TiH₂ eklenmesi ile köpükleştirilmiş 80*80 mm² boyutundaki alüminyum köpüğün gözenek yapısı (Banhart 2001)

Alporas işleminin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.5’de verilmiştir (Özer 2005).

Çizelge 2.5. Alporas yönteminin avantaj ve dezavantajları

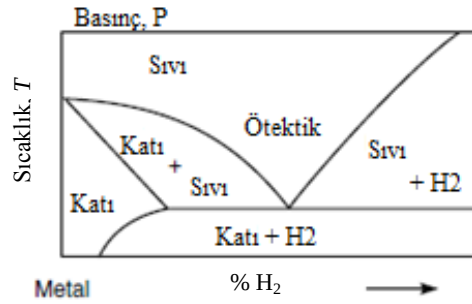
Avantajlar	Dezavantajlar
• Oldukça tekdüze (üniform) hücre boyutu. Alcan yönteminden daha homojen köpük yapısı. • Küçük hücreler.	• Katkı malzemelerinden dolayı pahalı bir yöntem. • İstenilen son şekilde parça üretilmemesi.

2.5.1.4. Gaz-Ötektik Reaksiyonunu Kullanarak Gözeneklendirme

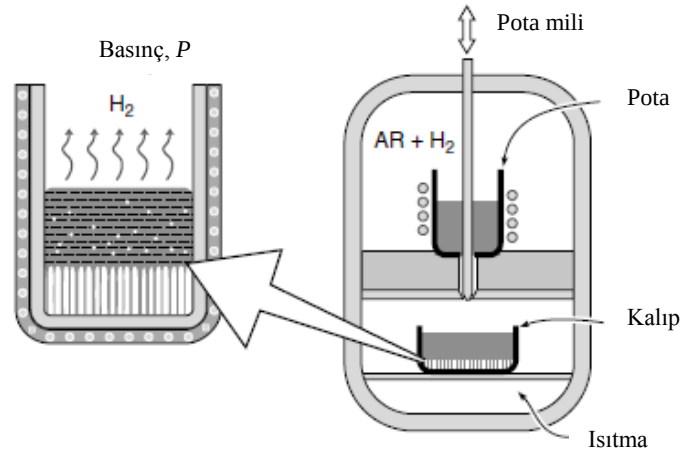
Katı-gaz ötektik katılaşması ile meydana gelmiş gözenekli malzemeler için “gasar” kelimesi, bir Rus kısaltması olan “gaz takviyeli” anlamı içerir. Yakın zamanda bu yöntem Japonya’da, lotus köklerine benzerliğinden dolayı “yapılandırılmış lotus” ismine uyarlanmıştır (Hyun and Nakajima 2000, Banhart 2001).

GASAR yönteminde metal, üst kısımdaki pota içerisinde ergitilmiştir. Dışarıdan sistem içerisine gönderilen hidrojen gazı eriyik tarafından emilir. Emilen hidrojen gazı metali çözerek, ergiyik metal içerisinde gaz kabarcıkları oluşturur. Ergiyik metal içerisindeki hidrojenin çözücülüğü, basıncın artması ile artar. Gaz emmiş olan ergiyik, tabanı soğutulmuş olan başka bir pota içerisine aktarılır. Ergiyik metal, potanın soğutulmuş olan tabanından yukarı doğru ilerleyerek katılaşır. Sistemin tamamı kontrollü basınç altındaki gaz ile kuşatılmıştır. Katılaşma hızı 0.05-5 mm/sn oranındadır. Bu işlemin basit bir şematik diyagramı Şekil 2.21’de gösterilmiştir (Ashby *et al.* 2000, Çinici 2004).

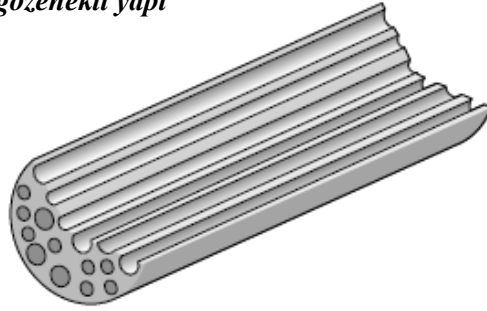
a) a) Metal-Hidrojen ikili faz diyagramı



b) Yönsel katılaşma

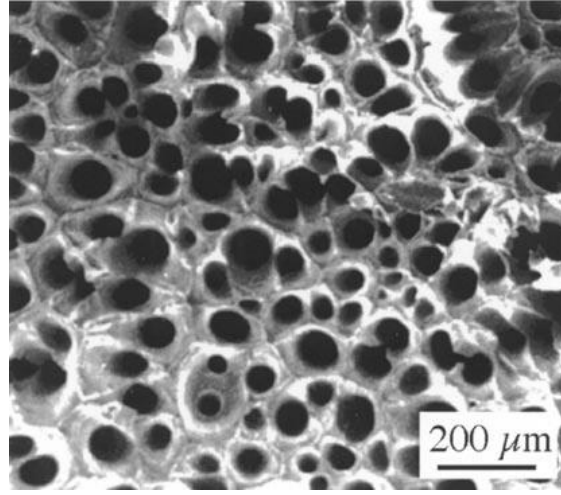


c) Final gözenekli yapı



Şekil 2.21 GASAR üretimi için gaz-metal ötektik katılaşması (Ashby *et al.* 2000)

Bu yöntemle üretilmiş malzemelerin gözenek morfolojisi büyük oranda, gaz içeriği, eriyik üzerindeki basınç, sıcaklık azaltma oranı ve yönü ve eriyiğin kimyasal bileşeni ile belirlenmiştir. Gözenek çapları 10µm-10mm, gözenek uzunlukları 100µm-300mm ve gözeneklilik %5-75 oranındadır. GASAR işlemi ile üretilmiş bir örnek Resim 2.5’de gösterilmiştir (Shapovalov 1998, Banhart 2003).



Resim 2.5 Tipik GASAR yapı. Gözenek yönüne dik kesilen yüzey (Shapovalov 1998)

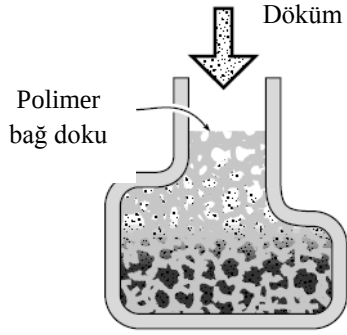
GASAR yönteminin pek çok işlem değişkeni olduğundan dolayı gözenek yapısının kontrolü ve optimizasyonu zordur. Bu işlem bazı güvenlik sorunları oluşturmaktadır. Sonuç olarak bu malzemelerle üretilmiş ürünler pahalıdır ve buna rağmen GASAR malzemeler, büyük ilgi çekerek ilk yüksek gözenekli malzemeler arasında yer almıştır. Bu malzemeler laboratuvar ile sınırlı kalmış ve henüz ticari olarak kullanılabilir değildir (Ashby *et al.* 2000).

2.5.1.5. Dökme, Süzme ve Çoğaltma Tekniği ile Gözeneklendirme

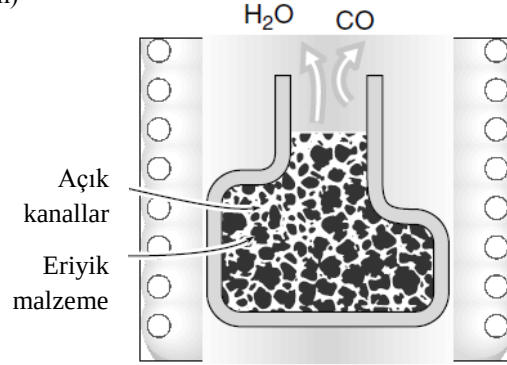
Bu işlemle üretilmiş ürünler ticari olarak “Duocel” ismiyle bilinmektedir ve işlem, 1968’den beri California’daki Energy Research and Generation (ERG) Inc. tarafından kullanılmaktadır. Bu metot Şekil 2.22’de şematik olarak gösterilmiştir (Ashby *et al.* 2000).

AÇIK HÜCRELİ ERİYİK İÇİNDEKİ KATILAŞMA

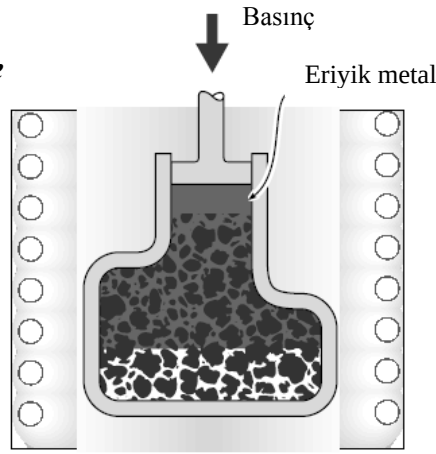
a) Kalıp



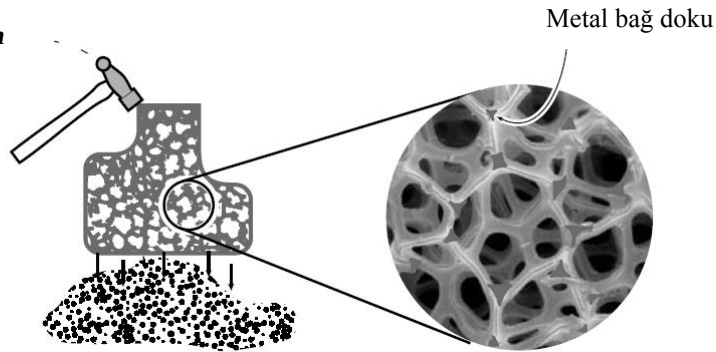
b) Yanma



c) Süzme



d) Eriyik malzemenin çıkarılması



Şekil 2.22 Açık hücreli köpükler üretmek için kullanılmış hassas döküm metodu (DUOCEL işlemi) (Ashby *et al.* 2000)

İşlemde ilk olarak, istenilen hücre boyutu ve göreceli yoğunluğa göre açık hücreli bir polimer köpük şablon kalıbı seçilmiştir. Bu şablon kalıp, bir kalıba dökülen çamur (seramik toz) ile kaplanabilir, daha sonra kurutulur ve kum kalıba gömülür. Kalıp daha sonra, ardından olumsuz bir köpük görüntüsü bırakarak, hem döküm malzemesinin

sertleşmesi için ve hem de polimer şablonun ayrışması için pişirilmiştir. Kalıp daha sonra bir metal alaşımı ile doldurulmuş ve ardından soğutulmuştur. Eriyik süzme esnasında orta düzeyli bir basıncın kullanımı, bazı sıvı alaşımların akış direncinin üstesinden gelebilir. Kalıp malzemeleri, soğuma ve yönsel katılaşmadan sonra, orijinal polimer köpüğe denk metal geride bırakarak çıkartılır.

Bu metot, 1-5mm gözenek boyutları ve 0.05 gibi düşük göreceli yoğunluklu açık hücreli köpükler sağlar. Bu işlem, hassas döküm yapılabilecek hemen hemen her metalden köpükler üretilmesi için kullanılabilir (Ashby *et al.* 2000).

University of Aachen’de elde edilen bazı alüminyum köpük örnekleri Resim 2.6’da görülebilir (Ogan 2008).



Resim 2.6 (a) : “Duocell” in görünüşü. (b) : Hassas dökümle üretilen parçalar (Ogan 2008)

Duocel köpük, savunma ve havacılık uygulamaları gibi çeşitli sanayilerde kullanılmıştır. Köpük gözenekliliği %88-92 arasında değişir ve mevcut ortalama hücre boyutları 4.3, 2, 1 ve 0.5 mm’dir. Köpük için kullanılmış tipik alüminyum alaşımları 6101 ve A356’dır (Gergely *et al.* 2000).

2.5.2. Toz Bazlı Metalik Köpük Üretimi

Hücreli metalik yapılar yapmak için erimiş bir metal yerine, tozlaşmış biçimdeki katı metaller kullanılmıştır. Toz, tüm işlem boyunca katı haldedir ve sadece bir sinterleme işlemi veya diğer katı hal işlemlerinden geçer. Bu, kapalı gözenek oluşumu eğilimine neden oluyorsa, yalnızca sıvı hal yüzey geriliminden beri ortaya çıkan hücreli yapısının morfolojisi için çok önemlidir. Oysaki sinterlenmiş gözenekli ürünler, sinter

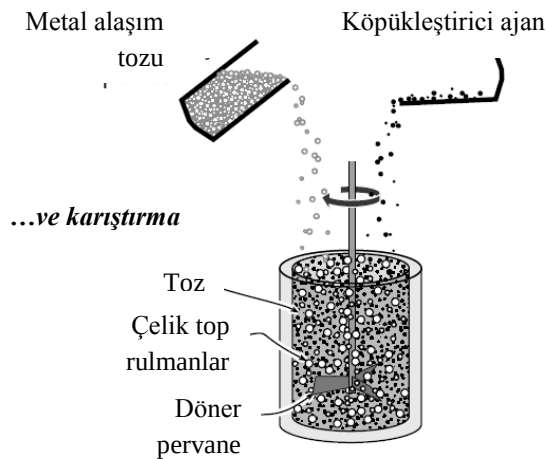
boyunları ile bağlanmış daha fazla veya daha az küresel parçacıklar, tipik olarak izole edilmiş açık hücreler gösterir. Günümüzde, tozlar veya fiberlerin kaybolan hacimlerinin sinterlenmesi, P/M sanayisinde belirlenmiş bir üretim yöntemi ve gözenekli metaller elde etmek için en basit yoldur. Daha ileri teknolojilerde, bir toz sıkıştırması içindeki gazın tutulmasıyla, içi boş kürecikler veya boşluk tutan doldurucu malzemeler kullanarak veya finalde, metal toz çamurlarının köpükleştirilmesiyle gözeneklilik oluşturabilir (Banhart 2001).

2.5.2.1. Öncü Malzemeler Karıştırılmış Tozun Pişirilmesi ile Gözeneklendirme

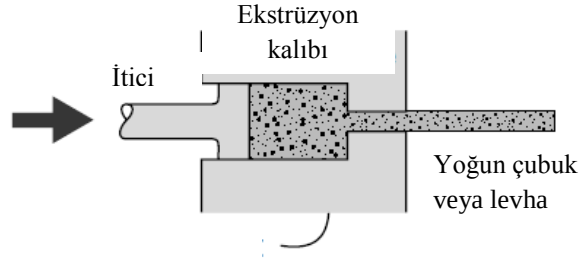
Köpükleştirici ajanlar, karıştırma ve tozların birleştirilmesi ile katı haldeki metaller içine ilave edilebilir. En fazla kullanılan köpükleştirici ajan olan titanyum hidrat, yaklaşık 465°C’de ayrışmaya başlar ki o saf alüminyum (660°C) ve onun alaşımlarının ergime noktasının çok altındadır. Bu, toz metalürjisi işlemi kullanılarak katı alüminyum içindeki köpükleştirici ajanın dağıtılması ile bir köpük oluşumuna imkân sağlar ve daha sonra metalin kısmi veya tam erimesi, kabarcıkların gelişimine imkân sağlayan ve gaz salınımına neden olan yeterli sıcaklığa çıkarılır. Bu işlem Şekil 2.23’de şematik olarak gösterilmiştir (Ashby *et al.* 2000).

YARI-KATI İÇİNDE PARÇACIK AYRIŞMASI

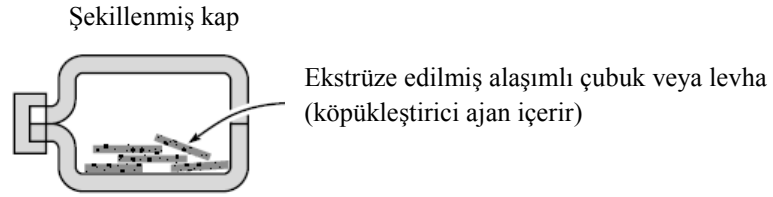
a) İçeriklerin Seçilmesi



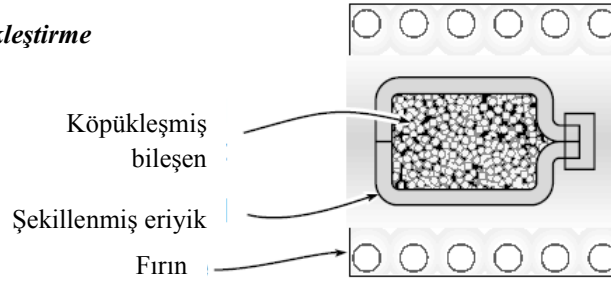
b) Pekleşme&Ekstrüzyon



c) Şekillenmiş eriyik

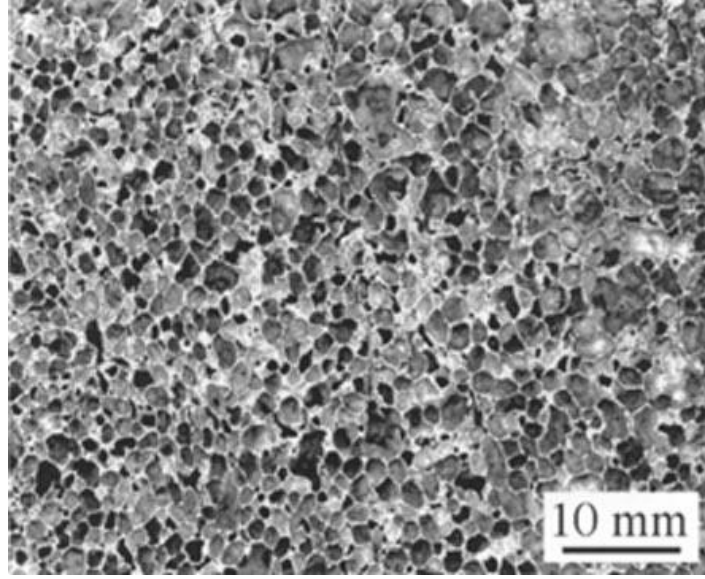


d) Köpükleştirme



Şekil 2.23 Yarı-katı içindeki gaz salan parçacıklar ile üretilen metal köpükler için kullanılmış toz metalürji adımlarının sırası (Ashby *et al.* 2000)

İşlem, bir alüminyum alaşımı tozu ile bir köpükleştirici ajan parçacıklarının birleştirilmesi ile başlar. İçerikler iyice karıştırıldıktan sonra toz, soğuk olarak sıkıştırılır ve daha sonra teoriksel yoğunluğa yakın levha veya bir çubuk şekline ekstrüze edilir. Bu “öncü” malzeme, küçük parçalar halinde doğranmış, ağzı kapalı bölünmüş bir kalıp içerisine yerleştirilmiş ve alaşım katılaşma sıcaklığının biraz üzerine kadar ısıtılmıştır. Titanyum hidrat daha sonra ayrılmış, yüksek bir basınç ile boşluklar oluşturmuştur. Bu, yarı-katı akış ve şişen alüminyum ile genişleyerek, kalıbı dolduran bir köpük oluşturur. İşlem, 0.08 gibi düşük bir göreceli yoğunluklar ve kap ile aynı şekle benzer bileşenler şeklinde sonuçlanır. Köpük, 1-5mm çapındaki oranlar ile kapalı hücrelere sahiptir. Resim 2.7’de bu işlemle üretilmiş bir alüminyum alaşımın optik mikrofrafı gösterilmiştir (Ashby *et al.* 2000, Gergely *et al.* 2000).

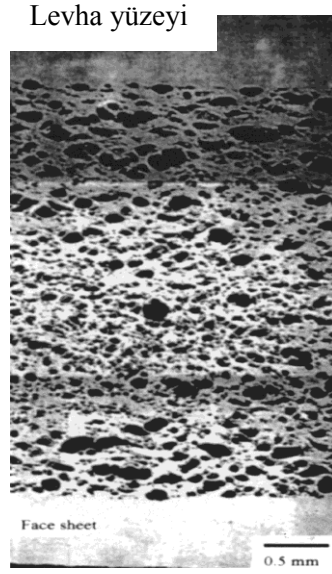


Resim 2.7 Alulight işlemi kullanılarak bir toz yöntemi öncüden pişirilmiş köpükleşmiş alüminyum alaşımdan bir bölümün optik mikrografı (Gergely *et al.* 2000)

Bu metot, alüminyum ve alaşımları ile sınırlı değildir. Kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal ve alaşımları, işlem parametreleri ve köpürtücü maddelerle ayrıştırılarak metalik köpük elde edilebilir. Köpürtücü madde olarak TiH_2 gibi metal hidrürlerin yanında karbonatlar (kalsiyum karbonat, potasyum karbonat, sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat), hidratlar (alüminyum sülfat hidrat, alüminyum hidroksit) veya hızlıca buharlaşan maddeler (cıva bileşikleri veya pulverize edilmiş organik maddeler) kullanılabilir (Çinici 2004).

2.5.2.2. Düşük Yoğunluklu Çekirdeğin Gaz Kaynaklı Büyümesi ile Gözeneklendirme

Düşük yoğunluklu çekirdek (LDC) işlemi, McDonnell-Douglas Şirketi tarafından patenti alınmış, ayrılmaz gözenekli cisimlerin (ilk olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı) üretilmesi için bir metottur. Bu metodun gelişimi, benzer mekaniksel performans ile maliyet de geleneksel bal peteği yapılar ile rekabet edebilecek bir malzeme için talep ile yönlendirilmiştir. Resim 2.8’de bir LDC sandviç levha kesiti gösterilmiştir (Martin 1996, Gergely *et al.* 2000).

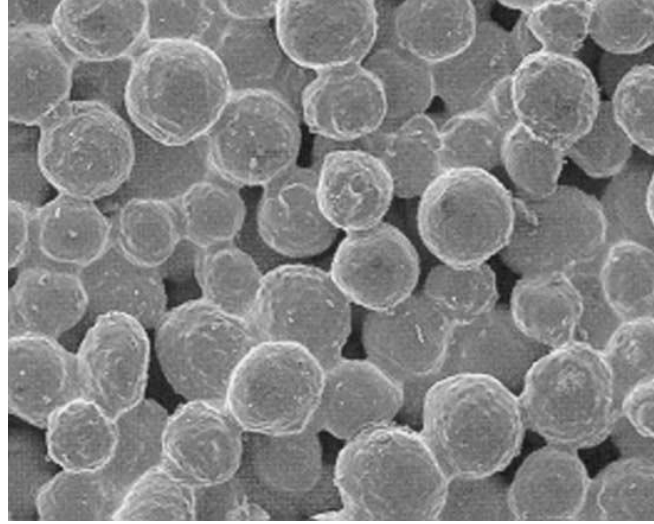


Resim 2.8 Gazın genişlemesi ile basınçlandırılması tarafından köpükleştirilmiş bir çekirdek ile Ti-6Al-4V alaşımının LDC sandviç levhası boyunca bir bölümün optik mikrografı (Gergely *et al.* 2000)

Bu yöntemde toz, gözenek seviyesinin yaklaşık %2 seviyesine kadar birleştirilir, gözenekler yüksek basınçlı argon ile doldurulmuştur. Daha sonra HIP malzeme, geleneksel teknikler kullanılarak net şekle yakın bir ürünün içine sıcak olarak işlenmiştir. Sonunda, malzeme, uygun bir süre (6-24 saat) için 0.6Tm'den daha yüksek sıcaklıklarda tavlannmıştır. Bu, alaşımın yumuşamasına yol açar ve hapsolmuş gazın basıncını daha da artırır. Bu da, malzemenin genişlemesine yol açar, yaklaşık %20-40 gibi çekirdek gözeneklilik seviyesi ile sandviç bir yapı ortaya çıkarır. Bu yolla, boyutları 2000*1200*4 mm'ye kadar LDC malzeme levhaları üretilmiştir. Tipik çekirdek boyutları, 10-100 µm oranındadır (Gergely *et al.* 2000).

2.5.2.3. Toz Ve Fiber Sinterleyerek Gözeneklendirme

Gözenekli yapıların üretimi genelde, toz miktarı ve hazırlanması, sıkıştırma veya döküm ve sinterleme gibi çeşitli adımlar içerir. Sinter sıcaklıkları yaklaşık 820°C civarındadır ve %20-50 oranında gözeneklilikler elde edilebilmesine rağmen dayanımları nispeten düşüktür. Böyle bir malzeme Resim 2.9'da gösterilmiştir (Banhart 2001).



Resim 2.9 Yaklaşık 100µm çapındaki parçacıklardan yapılmış sinterlenmiş bronzun gözenekleri (Banhart 2001).

Sinterleme öncesi tozlara, aksenel kalıp sıkıştırılması, izostatik presleme veya merdaneli haddeleme yapmak onların temas noktalarındaki parçacıklara soğuk kaynak yapılması ile ham parçacığın dayanımı artırılır. Sonraki sinterleme, dayanımı ve yoğunluğu daha da artırır ve çok ince bir gözeneklilik ile karakterize edilmiş parçalar üretilebilir.

Alüminyum alaşımlı tozlar veya tanelerden elde edilen gözenekli metaller, alüminyumun genellikle, birlikte sinterlemeden gelen parçacıkları önleyen yoğun bir oksit tabakası ile çevrilmiş olması sebebiyle diğer metallerin kullanımından daha zordur. Bu sorunu aşabilmek için ilk olarak, parçacıklar arasında oluşan metalik bağları ve oksit filmleri kırarak presleme yaparak, bu esnada toz veya tanelerin karışımı deforme edilebilir. Alternatif olarak, 595-625°C de sinterleme esnasında düşük bir eriyik ötektik alaşım formu olarak örneğin bakır, silikon veya magnezyum sinterleme yardımcıları kullanılabilir (Banhart 2001).

Fiber sinterleme, yaklaşık %95'e kadar gözeneklilik seviyesi ile yüksek gözenekli malzemelerin üretimi için kullanılmıştır. Lifli yapılar, tozlardan hazırlanmış gözenekli malzemeler ile karşılaştırıldığında şu avantajlara sahiptir: (i) gözeneklilik, çok geniş sınırlar içerisinde kontrol edilebilir, (ii) oldukça yüksek dayanım ve süneklik seviyelerine ulaşılabilir, (iii) ürünler, yüksek geçirgenliğe sahip olabilir ve (iv) bu tip lifli ağlar, iyi enerji emme karakteristikleri sergileyebilirler. Metal fiberlerden üretilen

gözenekli malzemeler pahalıya mal olmuştur. Bunun temel sebebi ise fiber hazırlama maliyetidir (Gergely *et al.* 2000).

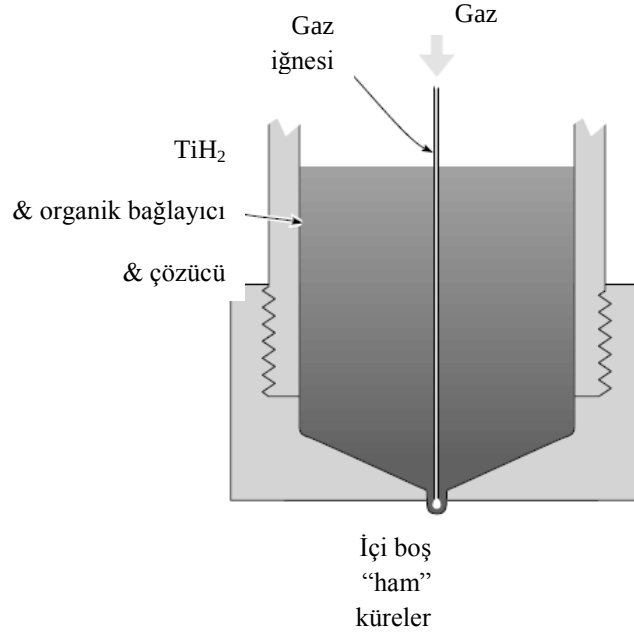
2.5.2.4. İçi Boş Kürelerin Sinterlenmesiyle Gözeneklendirme

İçi boş küreler (200µm-10mm çapı, 1µm-1mm duvar kalınlığında), dağıtılmış parçacıklar, bir bağlayıcı, film bir stabilize edici öncü ve titreşen gaz içsel jet içerisinde geçirilirken eş aksel bir nozulun dışsal jet içerisindeki sürekli bir sıvı fazı içeren bir bulamacın enjekte edilmesi ile yapılabilir. Bulamaç malzemesi silindirden içi boş küreler şeklinde, yüzey gerilimi ve hidrostatik kuvvetler altında periyodik olarak ısıran nozuldan ayrılır. Bunlar, sıvı ve uçucu malzemelerin çıkarılmasıyla sertleştirilir. İçi boş ham mikro kürecikler bu yolla ağırlıklı olarak, dağıtılmış parçacıklar ve bağlayıcılar oluşturularak hazırlanmıştır. Potansiyel olarak daha ucuz olan içi boş küreler elde etme yolu, atomize edilmiş gaz ile rutin olarak üretilmiş tozdan onları ayırmaktadır (Gergely *et al.* 2000).

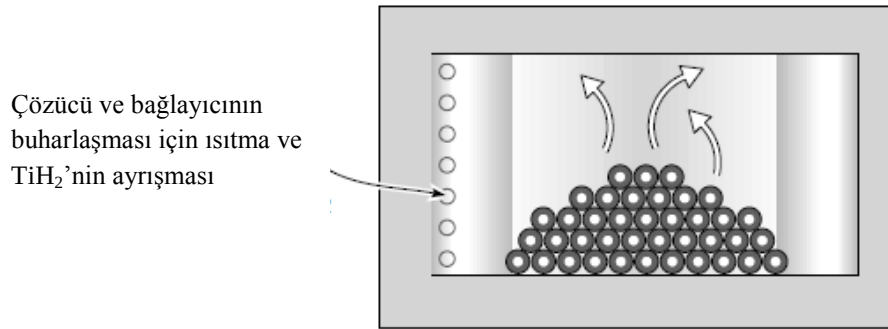
Diğer bir yöntemde içi boş küreler “atomizasyon” çamuru yardımıyla üretilip, paslanmaz çelik gözenekli yapılar(gözeneklilik seviyesi %80-87) üretmek için Georgia Teknoloji Enstitüsü’nde istihdam edilmiştir. Küreler, çözücüleri çıkarmak ve bağlayıcıyı buharlaştırmak için ısıtılmış, uzun bir damla kulesinde onların uçması esnasında buharlaşması ile sertleştirilmiştir. Son bir ısıtma işlemle metal hidrat, içi boş metal küreler bırakarak ayrılmıştır. Şekil 2.24’de bu işlem şematik olarak gösterilmiştir (Gergely *et al.* 2000, Ashby *et al.* 2000).

İÇİ BOŞ KÜRESEL TOZ SENTEZİ

a) İçi boş kürelerin bulamaca dökümü



b) İçi boş kürelerin metalizasyonu



Şekil 2.24. Açık ve kapalı hücreli gözeneklilik ile bir köpük oluşturmak ve içi boş küreler oluşturmak için Georgia Tech yöntemi (Ashby *et al.* 2000)

3. MATERYAL VE METOT

Deneysel çalışmalar iki temel bölümden meydana gelmektedir. Deneysel çalışmaların ilk bölümünü toz metalürjisi yöntemiyle ve çözünen tip boşluk tutucu tuzlar kullanılarak yapılan çalışmalar oluşturmaktadır. Deneysel çalışmaların ikinci bölümünü ise vakum döküm yöntemiyle ve çözünmeyen tip boşluk tutucu malzeme kullanımıyla yapılan metalik köpük üretimi için yapılan çalışmalar oluşturmaktadır. Öncelikle bu bölümde deneylerde kullanılan malzemelerin özellikleri, hazırlanma yöntemleri ve bu yöntemler sonucu ulaşılan temel özellikler anlatılmıştır. Daha sonra ise metalik köpüklerin nasıl hazırlandıkları açıklanmıştır.

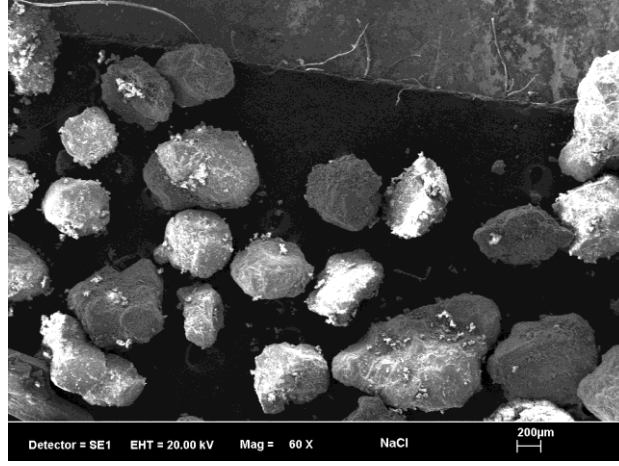
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Toz metalürjisi tekniği kullanılarak üretilen alüminyum köpük için Alfa Aesar firmasının -40+325 tane boyutuna sahip, %99,8 saflığındaki alüminyum tozları, döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpük için %99,7 saflığındaki alüminyum (Etial-5) ve Al-12Si alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan metalik malzemelerin spektral analizleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

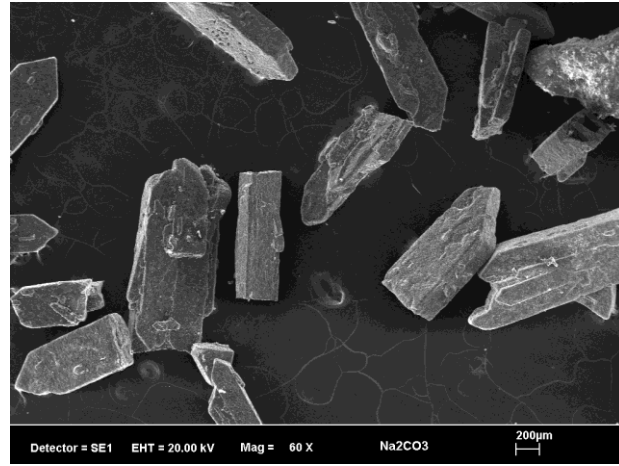
Çizelge 3.1. Etial-5 ve Al-12Si külçelerin spektral analizleri

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

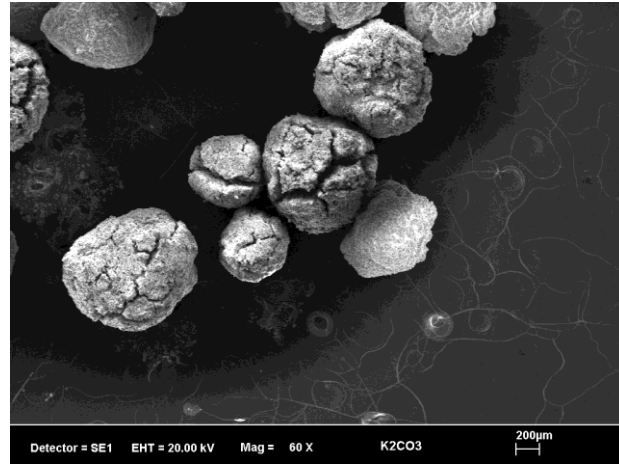
Çözünen tip boşluk tutucu malzemeler olarak teknik kalite Na_2CO_3 (sodyum karbonat), K_2CO_3 (potasyum karbonat) ve sofr tuzu olarak kullanılan kayaç NaCl (sodyum klorür) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan çözünen tip boşluk tutucu malzemelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri resim 3.1’de gösterilmiştir. Resim 3.1’den görüleceği gibi NaCl kırma işleminin sonucu olarak köşeli bir tane yapısına sahiptir. Na_2CO_3 taneleri ise çubuksu şekle sahiptir. K_2CO_3 taneleri ise eşeksenli küresel şekillidir. Deneylerde kullanılan boşluk tutucu tuzlar; 250, 500, 1000, 2000 μm elekler kullanılarak elenmişlerdir. Bu işlemden sonra elde edilen tuzlar, +250-500, +500-1000, +1000-2000 μm olarak 3 farklı tane boyut grubuna ayrılmış ve farklı seriler üretilmiştir.



(a)



(b)

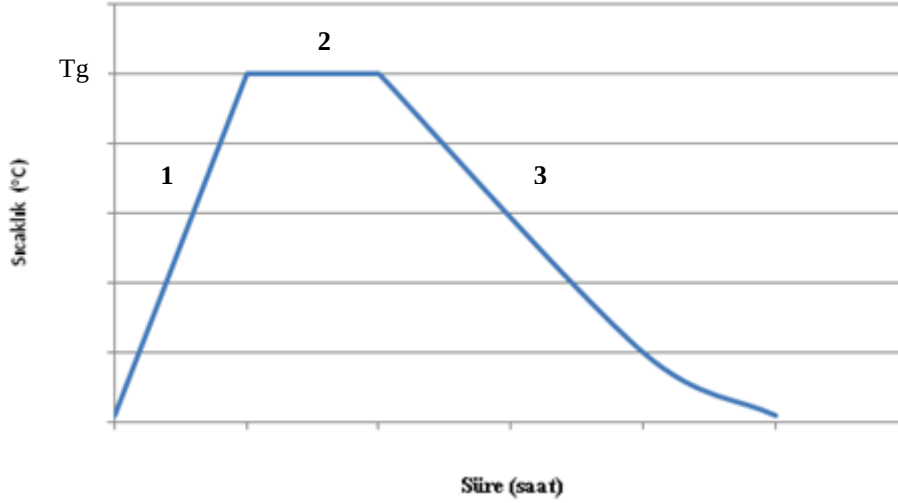


(c)

Resim 3.1 T/M yönteminde kullanılan tuzların SEM görüntüleri: a) NaCl, b) Na₂CO₃,c) K₂CO₃

Çözünmeyen tip boşluk tutucu malzeme üretmek için Damla Kimya Ltd. Şti. tarafından sağlanan 1-3mm boyutunda beyaz silika jel kullanılmıştır. Silika Jel köpük üretiminden önce farklı sıcaklıklarda ısıtılma işleminden geçirilerek yoğunluğu azaltılmıştır. Silika jel

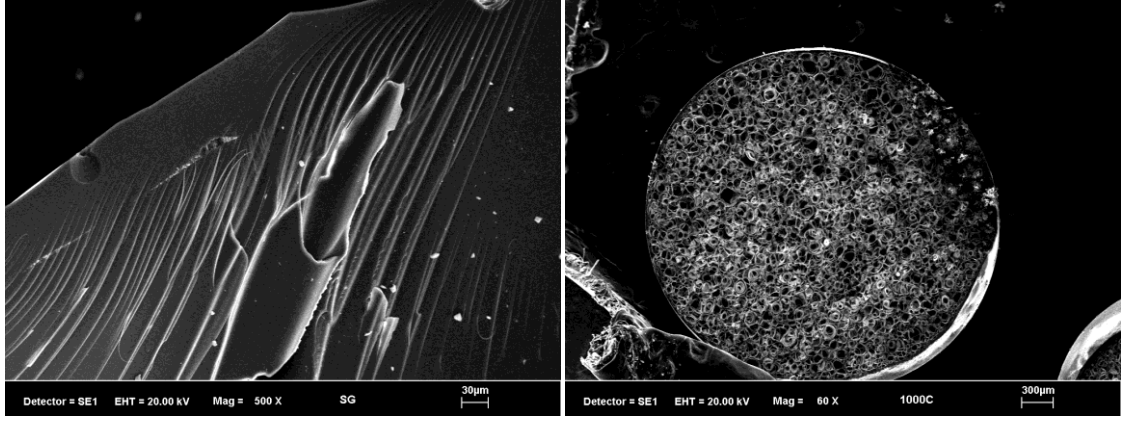
küreleri 1000 °C, 1100 °C ve 1200 °C'ye kadar standart fırın rejimi ile ısıtılarak genleşmeleri sağlanmıştır. Uygulanan ısıtma ve soğutma rejim grafiği Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Silika jellerin genleştirilmesinde kullanılan ısıtma ve soğutma rejimi

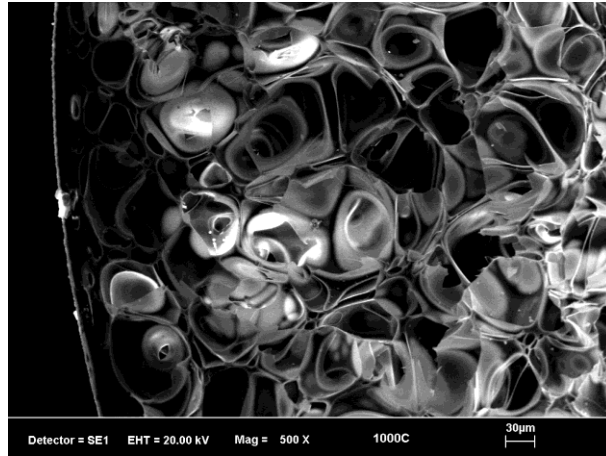
Şekil 3.1'de görüldüğü gibi genleşme işlemi 3 bölüme ayrılmıştır. 1'nci bölümde genleşecek olan silika jeller oda sıcaklığından, genleştirilmek istenen sıcaklığa kadar 10°C/dk hız ile ısıtılmıştır. Silika jeller 2'nci bölümde, genleştirilmek istenen sıcaklıkta yaklaşık olarak 1 saat bekletilmiştir. 3'üncü bölümde ise silika jeller, yaklaşık 200 °C'ye kadar fırın içerisinde, daha sonra ise oda sıcaklığına kadar havada soğumaya bırakılmıştır.

Genleştirme öncesi silika jel kırık yüzey görüntüsü ve farklı sıcaklıklarda yapılan genleştirme işlemi sonrası gözenek yapısı görüntüleri Resim 3.2'de ve Resim 3.3'de gösterilmiştir. Resim 3.2a'da genleştirme öncesi yoğun silika jel yapısı gözlenirken, genleştirme işlemi sonrasında tamamen gözenekli hafif silika jel tane yapısı gözlemlenmektedir.

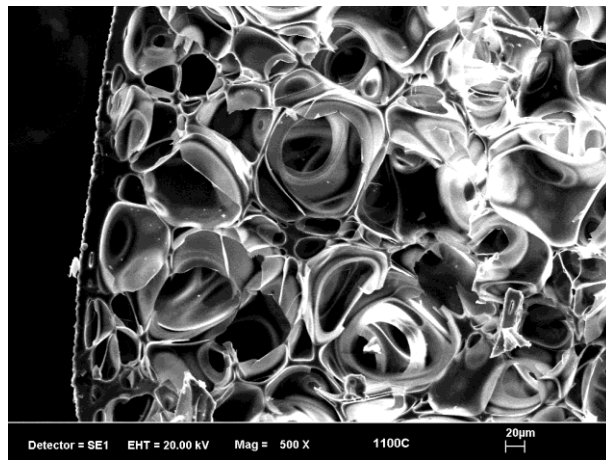


Resim 3.2 Genleştirme işlemi öncesi silika jel kırık yüzeyi (a) ve genleşme sonrası gözenekli silika jel küre yapısı (b)

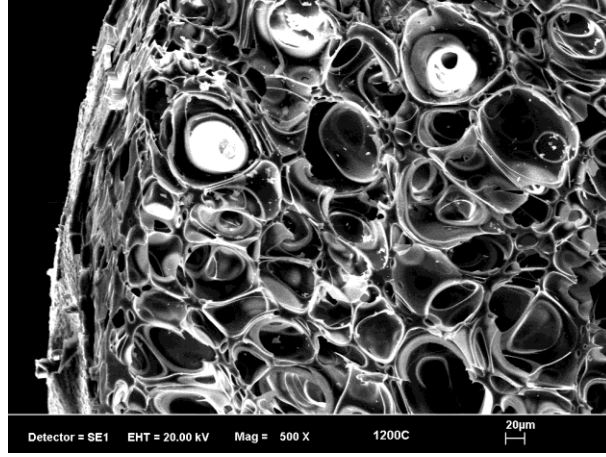
Resim 3.3’de gösterilen kürelerin dış çeper kalınlıkları karşılaştırıldığında, sıcaklığın artmasıyla çeper kalınlıklarının azaldığı gözlemlenmiştir.



(a)



(b)



(c)

Resim 3.3 Farklı sıcaklıklarda işlem görmüş silika jellerin gözenek ve duvar yapıları (a: 1000 °C, b: 1100 °C, c: 1200 °C)

1200 °C’de yapılan genleştirme işlemi sonrası dış çeperleri çok inceldiği ve kırılğan küreler oluştuğu görülmüştür. Gözenek büyüklükleri karşılaştırıldığında ise 1100 °C’de yapılan genleştirme işlemi sonunda daha iri boyutlu gözenekler elde edildiği görülmüştür. 1200 °C’de sıcaklığın yüksekliği nedeniyle silika jel tanelerinin sinterlenmeye başladığı ve bu nedenle gözenek boyutlarının tekrar küçülmeye başladığı gözlenmiştir. Çizelge 3.2’de farklı genleştirme sıcaklıkları sonrasında ölçülen silika jel yoğunlukları verilmiştir. Buradan da görüleceği gibi 1100 °C’de en düşük yoğunluklu taneler elde edilmektedir. Silika jel yoğunlukları ölçülürken her gruptan 50 adet küre seçilmiş ağırlık ve çapları ölçülmüştür. Hacimler hesaplandıktan sonra her küre için yoğunluk hesaplanmış ve ortalama değerler çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.2. Farklı genleşme sıcaklığına bağlı silika jel yoğunlukları.

Genleştirme Sıcaklığı (°C)	Silika jel yoğunluğu (gr/cm ³)
1000	0,346
1100	0,217
1200	0,317

3.2 Metalik Köpüklerin Hazırlanması

Çalışmanın bu aşamasında metalik köpük üretimi için uygulanan iki farklı metot iki ana başlık halinde açıklanmıştır. Birinci bölümde çözünen boşluk tutucu tipi ve toz metalürjisi yöntemi ile metalik köpük üretim çalışmaları açıklanmıştır. İkinci bölümde

ise çözünmeyen boşluk tutucu tipi ve vakum döküm yöntemi kullanılarak yapılan metalik köpük üretim çalışmaları açıklanmıştır.

3.2.1. Toz Metalürjisi Yöntemiyle Alüminyum Köpük Üretimi

Toz metalürjisi yönteminde kullanılacak ticari kaya tuzu, bilyeleri seramik olan bir öğütücüye konularak yaklaşık 2 saat süreyle öğütülmeye bırakılmıştır. Öğütülen tuz (NaCl) ile birlikte sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve potasyum karbonat (K_2CO_3) tozları, nemlerinin giderilmesi için sıcaklığı sabit tutabilen bir etüv içerisinde yaklaşık 100 °C’de 1,5 saat süre ile bekletilmiştir.

Karışımında kullanılan boşluk tutucu çözünen tip tozların yanı sıra, karışım oranları göz önüne alınarak Al miktarının %1’i kadar Mg tozu kullanılmıştır. Mg kullanımının esas amacı; karışım içindeki Al tozunun oksitlenmesini önleyerek karışımın sinterleme esnasında daha iyi bağ yapmasını sağlamaktır.

Kurutulan tozlar, sırasıyla 1000 µm, 500 µm ve 250 µm açıklıklara sahip eleklerden geçirilmiş, farklı numunelerde kullanılmak üzere paketlenmişlerdir.

Tüm toz karışımları, alüminyumun hacimsel miktarı %60 ve boşluk tutucu malzemelerin hacimsel miktarı %40 olarak ayarlanmıştır. Hesaplamalar yapılırken alınan yoğunluklar NaCl için 2,165 gr/cm³, K_2CO_3 için 2,29 gr/cm³ ve Na_2CO_3 için 2,54 gr/cm³ olarak alınmıştır. Bu sayede, boşluk tutucu malzeme olarak NaCl kullanıldığında ağırlık oranları %65,2 Al tozu, % 34,8 NaCl ve Al miktarının %1’i Mg tozudur. Boşluk tutucu malzeme olarak K_2CO_3 kullanıldığında ağırlık oranları %63,9 Al tozu, % 36,1 K_2CO_3 ve Al miktarının %1’i Mg tozudur. Boşluk tutucu malzeme olarak Na_2CO_3 kullanıldığında ağırlık oranları %61,5 Al tozu, % 38,5 Na_2CO_3 ve Al miktarının %1’i Mg tozudur.

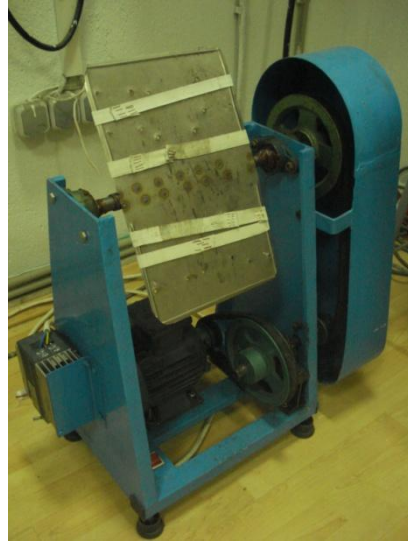
Toz halindeki alüminyum, magnezyum ve boşluk tutucu malzemeler 0,001 gr hassasiyetindeki elektronik terazi kullanılarak tartılmıştır. Alüminyum tozları, boşluk tutucu malzeme olarak NaCl kullanıldığında 19,56 gr, boşluk tutucu malzeme olarak K_2CO_3 kullanıldığında 10,83 gr ve boşluk tutucu malzeme olarak Na_2CO_3 kullanıldığında ise 18,45 gr olarak tartılmıştır. Karışıma ilave edilen boşluk tutucu

malzemelerden NaCl 10,44 gr, K₂CO₃ 10,83 gr ve Na₂CO₃ ise 11,55 gr olarak tartılmıştır. Son olarak karışıma ilave edilen son toz olan magnezyum tozu, boşluk tutucu malzeme olarak NaCl kullanıldığında 0,196 gr, boşluk tutucu malzeme olarak K₂CO₃ kullanıldığında 0,192 gr ve boşluk tutucu malzeme olarak Na₂CO₃ kullanıldığında ise 0,184 gr olarak tartılmıştır. Hazırlanan numunelerin ağırlıkları bu şekilde belirlenmiştir. Çizelge 3.3’de numunelerin yüzdesel olarak karışım oranları görülmektedir.

Çizelge 3.3. T/M yöntemiyle hazırlanan numunelerin ağırlıkça yüzdeleri

Seri Adı	% Al	% NaCl	% K ₂ CO ₃	% Na ₂ CO ₃	% Mg
Al-40NaCl	65,2	34,8	--	--	1
Al-40K ₂ CO ₃	63,9	--	36,1	--	1
Al-40Na ₂ CO ₃	61,5	--	--	38,5	1

Tartılan tozların homojen olarak dağılması için Resim 3.4’de verilen Afyon Kocatepe Üniversitesi Metal Atölyesinde laboratuvarında bulunan karıştırıcı yardımıyla yaklaşık olarak 1 saat karıştırılmıştır.



Resim 3.4 Toz karıştırma cihazı

Karıştırılan tozlar, iç çapı 30 mm, boyu 65 mm ve et kalınlığı 30 mm olan bir kalıp kullanılarak Afyon Kocatepe Üniversitesi Metal Bölümü atölyesinde bulunan pres ile

sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma basıncı olarak presin en yüksek basma gücü olan 20 MPa (yaklaşık 3000psi) uygulanabilmektedir. Elde edilen numune boyutları, 31 mm çapında ve yaklaşık olarak ortalama 22 mm uzunluğundadır. Resim 3.5’de toz sıkıştırma kalıbı gösterilmiştir.



Resim 3.5 Toz sıkıştırma kalıbı

Numuneleri sinterlemek için Protherm marka fırın kullanılmıştır. Numunelerin uygun sinterlenme sıcaklığını bulmak amacıyla 650-670 °C arasında, 2 ve 3 saatlik bekleme sürelerinin uygulandığı deneme pişirimleri yapılmış ve numuneler fırın içinde soğumaya bırakılmıştır.

Sinterlenmiş numuneler, Resim 3.6’da verilen Velp ARE marka ve model bir manyetik karıştırıcı kullanılarak su içinde çözünme işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler, öncelikle içi yaklaşık 800 ml su ile dolu beher içerisinde asılı kalacak şekilde bir düzenek içerisine oturtulmuş, ardından cihaz çalıştırılmıştır. Cihazın çalıştırılma parametreleri; sabit dönme ve sıcaklık olarak ise yaklaşık 200 °C olarak belirlenmiştir. Bu sayede beher içindeki su sıcaklığı 80 °C’de tutulmaya çalışılmıştır.



Resim 3.6 Çözme işlemi tertibatı

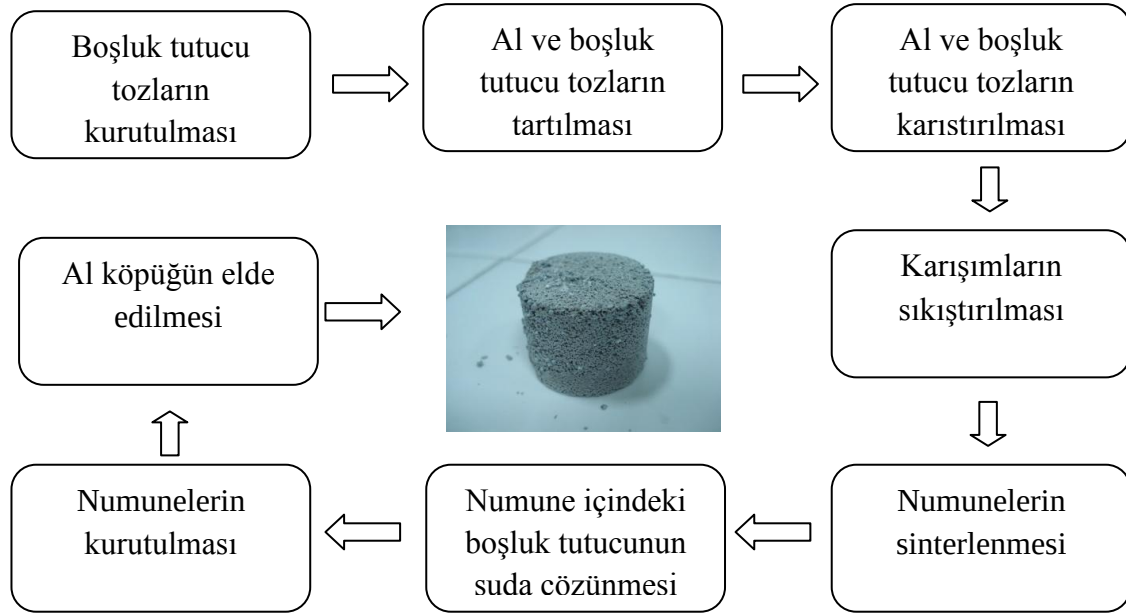
Beher içerisindeki suyun sıcaklığı yaklaşık olarak 80 °C olarak belirlendiğinde NaCl boşluk tutucuya sahip sinterlenmiş alüminyum numuneler düzenli ve hasarsız şekilde çözünürken, K_2CO_3 ve Na_2CO_3 boşluk tutucuya sahip alüminyum numuneler ise suda yapılan çözündürme işlemi sonucunda hacimsel bütünlüklerini koruyamayarak dağılmışlardır. Bu yüzden K_2CO_3 ve Na_2CO_3 boşluk tutucuya sahip alüminyum numuneler oda sıcaklığındaki suda (20 °C) çözünme işlemine tabi tutulmuşlardır. Çözündürme işlemi değişkenleri Çizelge 3.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Sinterlenmiş alüminyum numunelerin, boşluk tutucu malzeme tipine göre değişen çözünme sıcaklık ve süreleri

Çözünen boşluk tutucu malzeme	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)
NaCl	80	90
Na_2CO_3 - K_2CO_3	25	90

Çözme süresi 90 dakika olarak belirlenmiştir. 45 dakika çözme işleminden sonra suyun çözünen tuzlara doyması ile çözebilirliği düşeceği göz önüne alınarak, numunenin içine konulduğu su yenilenmiştir. Böylelikle çözme işlemi 45+45 olmak üzere toplam 90 dakika sürdürülmüştür. Çözme işleminden sonra alüminyum köpük numuneler, fırında

yaklaşık 200°C’de 2 saat boyunca kuruması için bekletilmiştir. Şekil 3.2’de toz metalürjisi yöntemiyle elde edilebilecek alüminyum köpüğün akım şeması verilmiştir.



Şekil 3.2 T/M yöntemiyle elde edilecek alüminyum köpüğün akım şeması

Sonuçta elde edilen numuneler bir seri haline getirilmiş ve isimlendirilmiştir. Çizelge 3.5’de bu seriler, bir çizelge halinde gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. T/M yöntemiyle elde edilen alüminyum köpük numunelerinin serileri

Seri Adı	Bileşim (Hacim %)
T1	%60 Al +%40 NaCl
T2	% 60 Al +%40 Na ₂ CO ₃
T3	% 60 Al +%40 K ₂ CO ₃

3.2.2. Vakum Döküm Yöntemi ile Alüminyum Köpük Üretimi

Döküm işlemine geçilmeden önce gözenek yerinde hacim oluşturacak malzeme olarak kullanılacak ham silika jeller bir ön işleme tabi tutulmuştur. Bu işlem için, yaklaşık 900 gr ham silika jel 300’er gr bölüştürülerek bir paslanmaz çelik kabın içerisine

yerleştirilmiştir. Bu kap elektrikle ısınan bir fırın içerisine yerleştirilerek farklı sıcaklıklara çıkarılmıştır. İlk işlemde kap, dakikada 10 °C artmaya ayarlı olan fırın içerisinde 1000 °C'ye çıkarılmış ve bu sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. İkinci işlemde kap, dakikada 10 °C artmaya ayarlı olan fırın içerisinde 1100 °C'ye çıkarılmış ve bu sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Üçüncü ve son işlemde ise kap, dakikada 10 °C artmaya ayarlı olan fırın içerisinde 1200 °C'ye çıkarılmış ve bu sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Resim 3.7'de genişletirmede kullanılan fırının bir resmi gösterilmiştir.



Resim 3.7 Silika jellerin genişletildiği fırın sistemi.

Elde edilen genişmiş silika jeller, farklı açıklıklara sahip eleklerden elenerek (-4,75+ 4) ve (-4+2) mm tane boyut sınıflarına ayrılmıştır.

Külçe alüminyum ve alüminyum-silisyum alaşımlı malzemeler, döküm işleminde kullanılacak ağırlık için ve potaya sığacak şekilde kesilmiştir. Bu işlem için Resim 3.8'de verilmiş olan DISPA DMSY 280 marka ve model elektrikli testere kullanılmıştır.



Resim 3.8 Al ve Al-12Si alaşımlı külçelerin kesildiği elektrikli testere

Ergitme yapılacak gaz ısıtmalı (LPG) fırın ve Al ve Al-12Si ergitme potası Resim 3.9’da gösterilmiştir. Fırında ısıtılan yalnız pota olmayıp bununla birlikte silika jellerin bulunduğu metal kap ve kalıp da ısıtılmıştır. Kalıp ve silika jellerin oda sıcaklığında bulunması, döküm esnasında sıvı metalin hızlı soğumasına neden olmuş ve sıvı metalin taneler arasında ilerlemesini zorlaştırmıştır. Kalıp ve silika jellerin ısıtılması, sıvı alüminyumun silika jel taneleri arasından kolayca sızmasını kolaylaştırmıştır. Fırının belirli bir sıcaklık ölçer bir cihazı yoktur ancak K tipi (Ni-NiCr) bir termokupl ve buna bağlı sıcaklığı ölçen cihazla potanın içinde eritilen metalin sıcaklığı termokuplun erimiş metale daldırılması ile hassas olarak ölçülmüştür. Kalıp sıcaklığı ve silika jellerin bulunduğu kabın sıcaklığı ise optik pirometre ile hassas olarak ölçülmüştür. Kullanılan bu cihazlar, Resim 3.10’da gösterilmiştir.

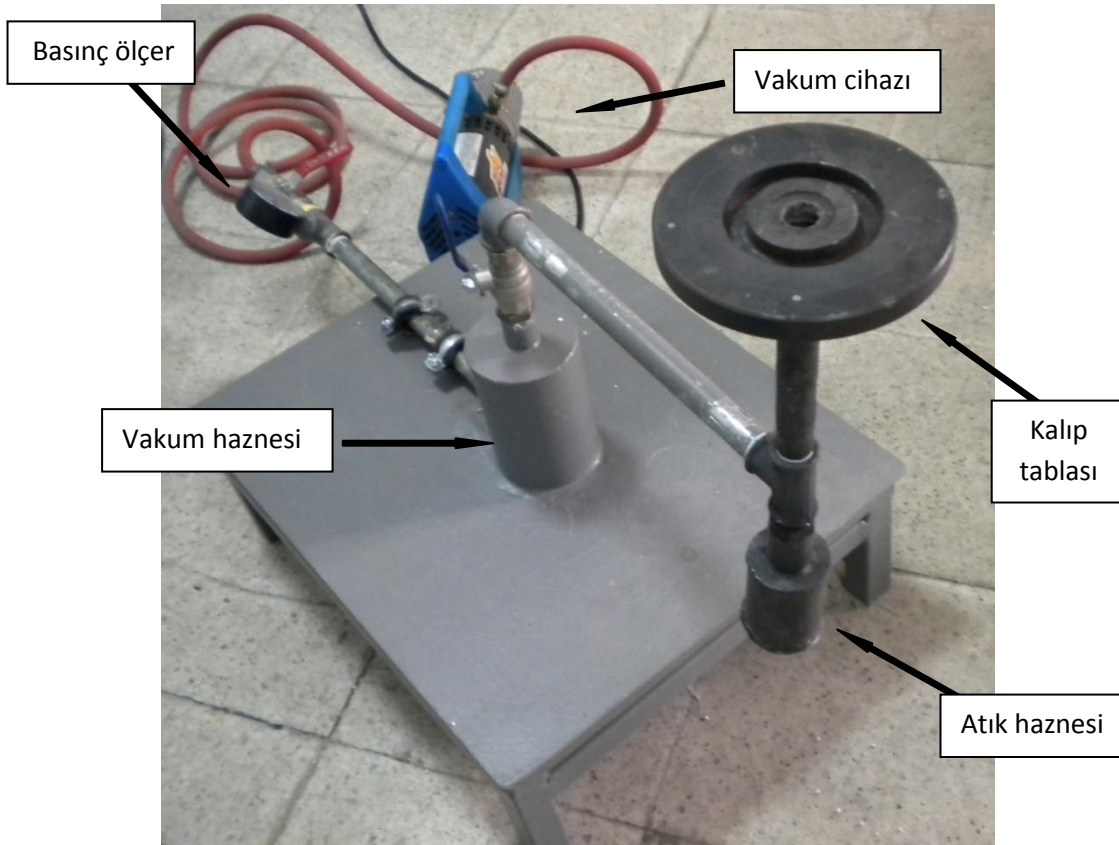


Resim 3.9 Isıtılan pota ve döküm kalıbı



Resim 3.10 Pota ve kalıbın sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan cihazlar

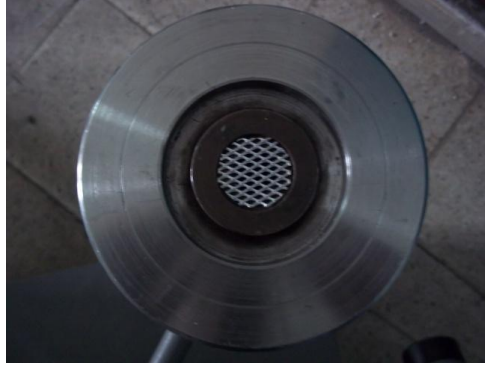
Kalıbın içerisine yerleştirilen silika jel taneleri arasına sıvı alüminyum vakum yöntemiyle sızdırılmıştır. Kullanılan vakum ve döküm sistemi Resim 3.11’de gösterilmiştir.



Resim 3.11 Vakum döküm tertibatı

Alüminyum köpük oluşturma tertibatı; bir vakum pompası, metal bir vakum haznesi, bir basınçölçer, kalıbın oturduğu tabla ve boru sisteminden oluşmaktadır (Resim 3.11).

Döküm işlemi için öncelikle fırın yakılarak içerisine, içerisinde alüminyum veya alüminyum-silisyum alaşımı bulunan pota yerleştirilmiştir. Fırının yan kısımlarında bulunan çıkıntılara ise kalıp ve içerisinde silika jellerin bulunduğu metal kap konulmuştur. Silika jellerin vakum borusuna kaçmaması için kalıbın oturduğu tablaya alüminyum bir filtre konulmuştur. Bu filtrenin bir resmi Resim 3.12’de gösterilmiştir.



Resim 3.12 Vakum hattında kullanılan Al filtre

Sıcaklıklar istenilen değerlere ulaştığında bir maşa yardımıyla öncelikle ısıtılmış olan kalıp, alüminyum köpükleştirme tertibatında bulunan tablaya konulmuştur. Hemen ardından, kalıp içerisine ısınmış olan silika jeller dökülmüş ve hemen üzerine, silika jellerin döküm esnasında yüzmesini önlemek için çelik bir filtre konulmuştur. Bundan sonra vakum haznesi içerisindeki hava alınarak yaklaşık -0,8 bar basınç değerine ulaşılmış ve vanalar kapatılmıştır. Döküm sıcaklık değerine ulaşan sıvı alüminyum ve Al-12Si alaşımı, içerisinde silika jeller bulunan kalıba ilave edilmiş ve daha sonra bekleme yapılmadan vakum haznesinin vanası açılmıştır. Vakumlu hava, silika jeller üzerindeki sıvı alüminyumu silika jeller içerisine sızmasını sağlamıştır. Kullanılan metalik döküm kalıbının boyutları: iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve boyu ise 100 mm’dir. Döküm kalıbı iki parça halinde tasarlanmış olup, soğumaya bırakılan numunenin soğuduktan sonra döküm kalıbından daha rahat çıkarılmasını sağlamıştır. Resim 3.13’de döküm kalıbının bir resmi gösterilmiştir.



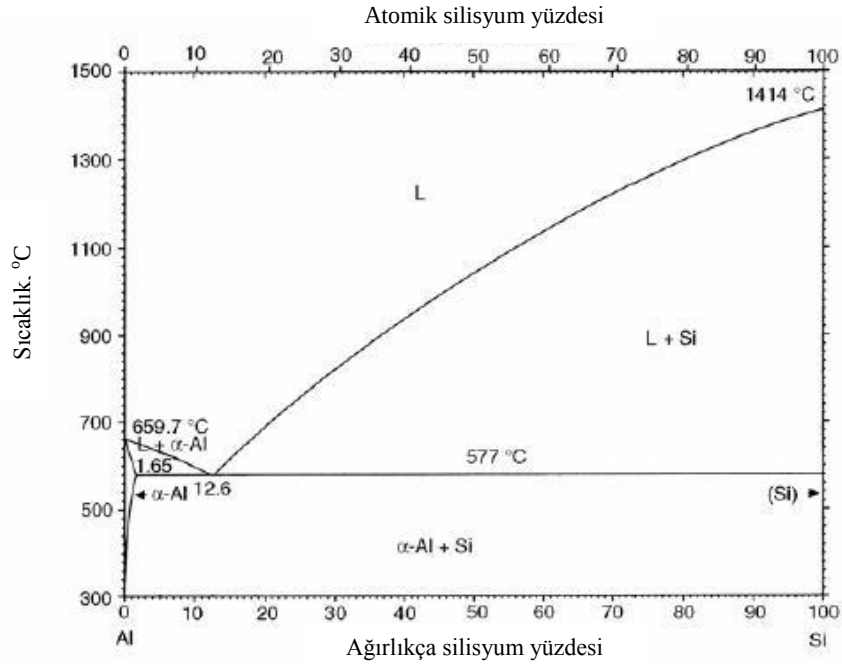
Resim 3.13 Kalıbın genel görünüşü

Çizelge 3.6’da Al ve Al-12Si döküm sıcaklıkları bir çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 3.6. Al ve Al-12Si döküm sıcaklıkları

Döküm malzemesi	Döküm sıcaklığı (°C)
Al	~700
Al-12Si	~650

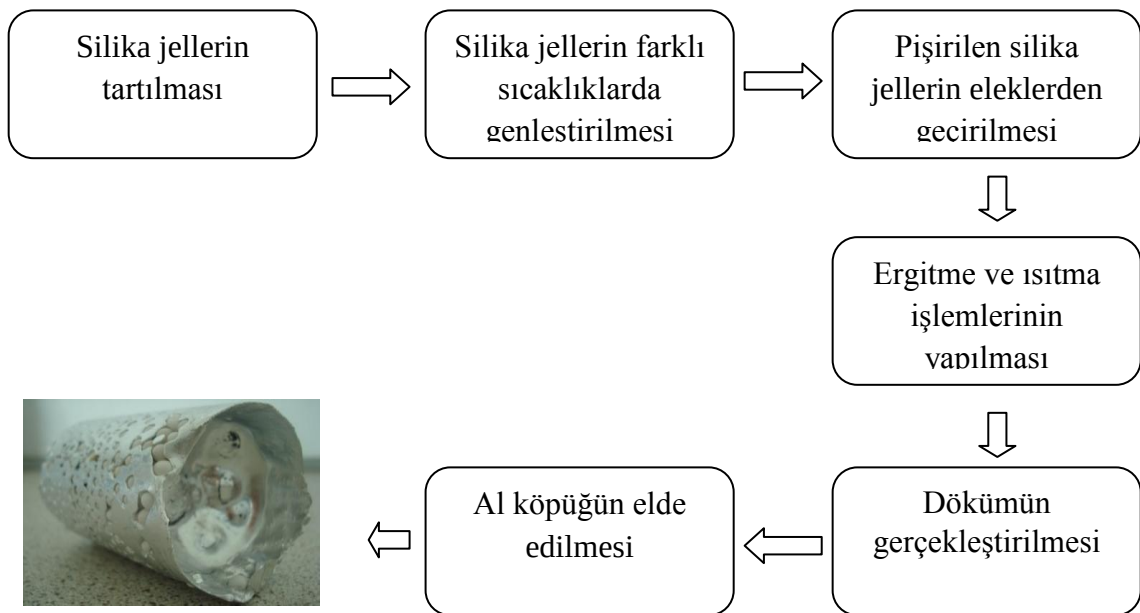
Çizelge 3.6 incelendiğinde, döküm sıcaklıkları kullanılan döküm malzemesine göre değişiklik göstermiştir. Bu değişiklikler, Al-Si denge diyagramı ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 3.3’de Al-Si denge diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Al-Si denge diyagramı

Şekil 3.3’deki Al-Si denge diyagramı incelendiğinde, Al’un ergime sıcaklığı yaklaşık olarak 670°C, Al-12Si alaşımının ergime sıcaklığı ise 577°C’dir. Döküm esnasında ergitilen metallerin sıcaklıkları ise Çizelge 3.6’de görüldüğü gibi ergime sıcaklıklarından biraz fazladır.

Döküm yöntemiyle üretilen alüminyum köpüğün üretim akım şeması şematik olarak Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4 Döküm yöntemiyle elde edilecek alüminyum köpüğün akım şeması

Döküm yöntemiyle elde edilen alüminyum köpük serileri Çizelge 3.7’de kodlanmıştır.

Çizelge 3.7. Döküm yöntemi ile elde edilen alüminyum köpük serileri

Seri Adı	Bileşim
D1	-4+2 mm, 1000°C’de genleşmiş silika jel+Al
D2	-4+2 mm, 1100°C’de genleşmiş silika jel+Al
D3	-4+2 mm, 1200°C’de genleşmiş silika jel+Al
DS1	-4+2 mm, 1000°C’de genleşmiş silika jel+Al12Si
DS2	-4+2 mm, 1100°C’de genleşmiş silika jel+Al12Si
DS3	-4+2 mm, 1200°C’de genleşmiş silika jel+Al12Si

3.3. Deney Numunelerine Uygulanan Testler

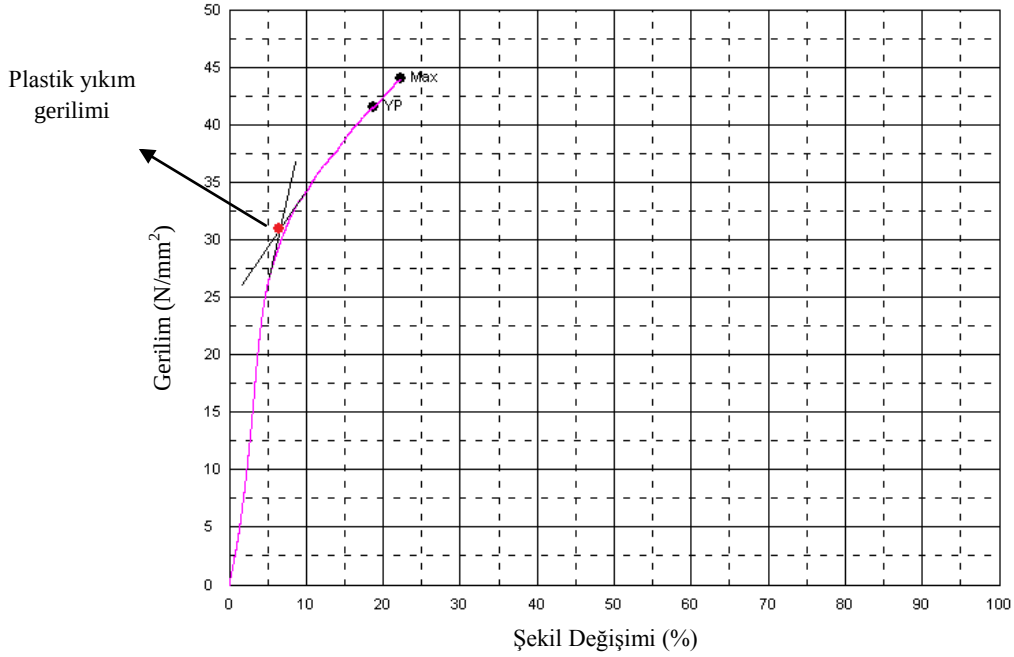
3.3.1 Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi

T/M yöntemiyle üretilmiş alüminyum köpüklerin yoğunlukları, numunelerin hacimsel bütünlüklerini koruyamadıkları için yoğunlukları ölçülememiştir. Döküm yöntemiyle üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluk ölçümleri, hacim ve kütle formülleriyle hesaplanmıştır. Aynı numunelerin yoğunlukları Arşimet yöntemi ile ölçülmeye çalışılmış fakat numunelerin yoğunlukları suyun yoğunluğundan düşük olduğu için suda yüzmüş ve yoğunlukları ölçülememiştir.

3.3.2 Basma Dayanımı

Basma dayanımının köpüklerin mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir yöntem olup farklı yöntemlerle üretilen alüminyum köpüklere uygulanmaya çalışılmıştır. Basma dayanımı, yapısal bütünlüğünü koruyamayan T/M ile üretilmiş alüminyum köpüklere uygulanmaya çalışılmış fakat başarılı olunamamıştır. Döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpüklere uygulanan basma deneyi için numuneler 40x50 mm (boy x çap) standart boyutlara getirilmiştir. Deneyde kullanılan Schimadzu marka universal çekme-basma cihazı 10 ton kapasitelidir. Basma deneyinde numunelere, 1 mm/dk hız ile yaklaşık %50 deformasyon uygulanmıştır.

Elde edilen basma deney grafiklerinden, plastik yıkım gerilimi hesaplanmıştır. Buna göre grafiklerdeki numunenin, elastik bölgedeki davranışını gösteren çizgi ve plastik bölgedeki davranışını gösteren çizgiye doğrusallar çizilmiş, bu çizgilerin kesiştiği yer plastik yıkım gerilimi olarak ölçülmüştür. Plastik yıkım geriliminin hesaplanmasına örnek teşkil edecek grafik Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5 Plastik yıkım geriliminin ölçülmesi için temsili bir basma deney grafiği

3.3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi

Döküm yöntemi ile elde edilen alüminyum köpüklerin SEM (Taramalı elektron mikroskobu) görüntüleme çalışması Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (TUAM) gerçekleştirilmiştir.

Taramalı elektron mikroskobunda incelenmeye tabi tutulacak silika jeller ve numuneler farklı sıcaklıklarda genleştirilmiş silika jeller ve DS2 numunesinden seçilmiştir. İncelenecek olan silika jeller ham ve 1000 °C, 1100 °C ve 1200 °C’de genleştirilmiş silika jellerden seçilmişlerdir. Ham silika jel küçük ve belirli bir sertliğe sahip olduğu için tam olarak kesilememiş ve kırılmıştır. Genleştirilmiş silika jeller ise ufak bir neşter yardımıyla rahatlıkla kesilerek incelenmişlerdir. Ayrıca elde edilen DS2 numunesinden de kuru olarak ufak bir parça kesilerek mikroskopta incelenmiştir.

İncelenmeye tabi tutulacak silika jeller ve DS2 serisi numunenin, elektrik iletkenlikleri olmadıklarından dolayı mikroskopta incelenmeye tabi tutulabilmeleri için kaplama yapılmıştır. Daha sonra, incelenecek ürünler, farklı büyütmelemlerle farklı açılardan çekilerek işlem tamamlanmıştır.

4. BULGULAR

4.1. T/M Yöntemiyle Üretilen Alüminyum Köpükler

Toz metalürjisi tekniği ile üretilen alüminyum köpüklerin içerdiği tozlar (Al, Mg, NaCl, Na₂CO₃, K₂CO₃) karıştırıldıktan sonra pres ile şekillendirme aşamasında uygulanan sıkıştırma basınç değeri oldukça düşük olduğu görülmüştür. Daha önce yapılan çalışmalarda, şekillendirme için uygulanan basınç değerleri 250 MPa, 100-350 MPa gibi olmasına rağmen bu çalışmada kullanılan preslerde uygulanabilen basınç değeri ancak 20 MPa seviyesindedir. Düşük şekillendirme basıncı düşük ham mukavemete sahip numunelerin şekillendirilmesine neden olmuştur. Presleme basıncının yetersizliği, taneler arasında oluşacak temas alanlarının azalmasına ve buna bağlı olarak sinterleşme etkisinde azalmaya yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu da, sinterleme sonrasında elde edilen alüminyum ürünün çözündürme aşamasında, yapısal bütünlüğünü koruyamamasına ve hızlı bir şekilde dağılmasına neden olmuştur. Resim 4.1’de alüminyum ürünün çözme aşamasında yapısal bütünlüğünü koruyamayan bir numune örnek resmi gösterilmiştir (Zhao *et al.* 2004, Sun and Zhao 2005a, Sun and Zhao 2005b).



Resim 4.1 Çözme esnasında dağılmış olan alüminyum köpük numune

Alüminyum köpük numunelerin preslenme aşamasından sonraki işlem olan sinterleme işlemi de ürünün elde edilmesinde büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmada sinterleme sıcaklığı yaklaşık 650-670 °C olarak belirlenmiştir. 670 °C olarak belirlenen sinterleme sıcaklığında, alüminyum köpükler yapılarını koruyamamışlar, numunelerde

ergime ve şekil değişimi gözlenmiştir. Bununla birlikte sinterleme süresi de büyük önem taşımaktadır. Sinterleme süresi 3 saat olarak belirlendiğinde alüminyum köpük numuneler yapılarını koruyamamışlardır. Şekillendirme basınçlarındaki düşüklük göz önüne alınarak nispeten yüksek ve uzun sinterleme programı seçilmiştir. Ancak uzun sinterleme süreleri sonunda sinterlenen örneklerde deformasyonlar gözlemlenmiştir (Resim 4.2).



Resim 4.2 Sinterleme sıcaklığının ve sinterleme süresinin yüksek seçilmesinde meydana gelen yapısal bozukluk

Resim 4.2'deki numuneler aynı olup bileşiminde; 19,56 gr Al, 10,44 gr NaCl ve 0,196 gr Mg bulunmaktadır.

Sinterleme sıcaklığı 650 °C olarak belirlendiğinde numunelerin yapısal bütünlüğünü daha iyi koruduğu gözlenmiştir. Sinterleme süresi olarak da 2 saat seçilmiştir. Daha önceki çalışmalarda sinterleme sıcaklıkları olarak 650 °C, 665-685 °C seçildiği tespit edilmiştir. Resim 4.3'de, 650°C'de 2 saat süre ile sinterlenmiş bir alüminyum köpük numune gösterilmiştir (Zhaoa *et al.* 2004, Sun and Zhao 2005).



Resim 4.3 650°C’de 2 saat süre ile sinterlenmiş bir alüminyum köpük numunenin çözündürme işlemi öncesi hali

Sinterlenen alüminyum köpük numunelerin su içinde yapılan çözündürme işleminde, çözme süresi ve çözme ortamının sıcaklığı büyük önem taşır. Yapılan çalışmada, çözme süresi tüm numuneler için sabit tutulmasına rağmen, çözme sıcaklığı ise boşluk tutucu malzemenin cinsine göre değişiklik göstermiştir. Çözme süresi 45+45 dakika olup ilk 45 dakika süreden sonra çözme suyunun çözebilme kabiliyeti azaldığı düşünülerek suyun değiştirilmesinden sonra 45 dakika daha çözme işlemine devam edilmiştir. Çözme sıcaklığı ise boşluk tutucu malzeme olarak NaCl seçildiğinde 80 °C, Na₂CO₃ ve K₂CO₃ seçildiğinde ise 20 °C olarak belirlenmiştir.

Suda yapılan çözme işleminde, boşluk tutucu malzeme olarak K₂CO₃ ve çözme sıcaklığı olarak da 80 °C seçildiğinde numunelerin tamamen dağıldığı gözlenmiştir. K₂CO₃’ın sudaki yüksek çözünürlüğünün bu tip bir dağılmaya sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Yüksek çözündürme sıcaklığı sonrasında K₂CO₃ numunelerin aldığı form Resim 4.4’de gösterilmiştir.



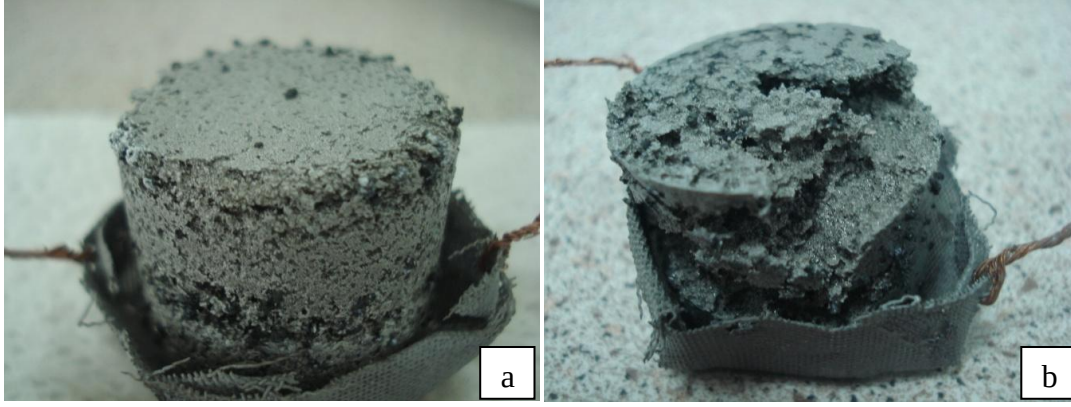
Resim 4.4 Yüksek çözündürme sıcaklığı sonrasında K_2CO_3 numunelerin aldığı form.

Yapılan çözme işleminde, boşluk tutucu malzeme olarak NaCl ve çözme sıcaklığı olarak da 80 °C seçildiğinde numunenin yapısal bütünlüğünü, boşluk tutucu malzeme olarak K_2CO_3 içeren numunelere göre daha iyi koruduğu gözlenmiştir (Resim 4.5).



Resim 4.5 Çözme sıcaklığının 80°C seçilmesi ile numunenin yapısal bütünlüğünü koruduğu, boşluk tutucu malzeme olarak NaCl tozu içeren Al köpük

Boşluk tutucu malzeme olarak Na_2CO_3 ve K_2CO_3 ve çözme sıcaklığı olarak da oda sıcaklığı seçildiğinde de dahi numunenin yapısal bütünlüğünü bozduğu görülmüş ve hatta çözme esnasında tamamen dağılma meydana geldiği dahi gözlenmiştir. Kullanılan tozlardan Na_2CO_3 , K_2CO_3 tozuna göre daha iyi bir çözünme oranı göstermiştir (Resim 4.6).



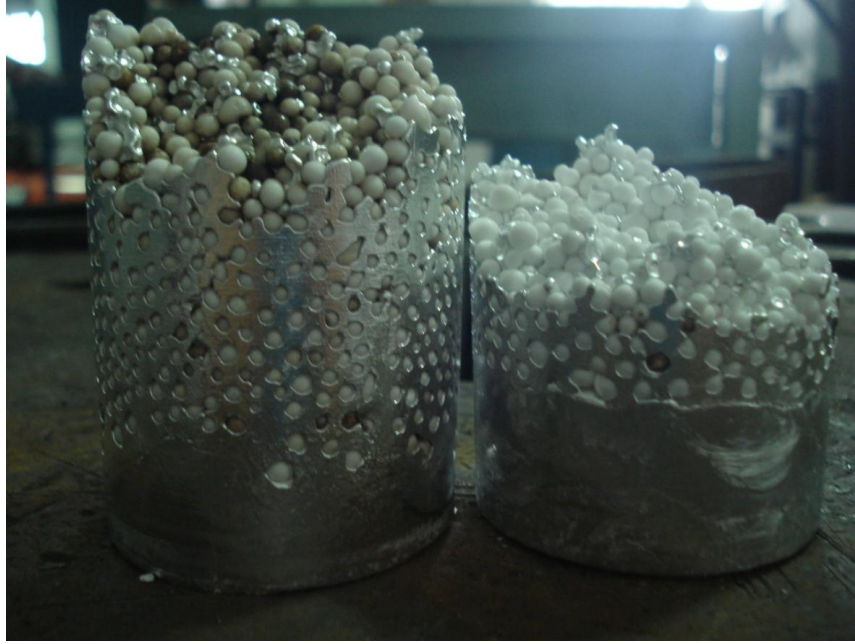
Resim 4.6 Alüminyum köpük numunelerin çözme esnasında dağılmaları: a) Na_2CO_3 ve b) K_2CO_3

4.2. Döküm Yöntemiyle Üretilen Alüminyum Köpükler

4.2.1. Vakum Ön Deneme Sonuçları

Döküm yöntemi ile elde edilecek olan alüminyum esaslı köpük numunelerin üretimi için; çeşitli sıcaklıklarda genleştirilen silika jel taneleri, alüminyum veya alüminyum-silisyum alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan vakumlu döküm sisteminde, sıvı alüminyumun kalıp içerisindeki silika jel tanelerinin arasına homojen olarak sızmasını sağlamak için kalıp ısıtma, silika jel tanelerinin ısıtılması, vakum basıncının ayarlanması ve döküm sıcaklığının ayarlanması gibi ön çalışmalar tek tek denenmiştir. Bu sayede sistemin optimize edilmesi için çalışılmış ve homojen alüminyum köpükler elde edilmeye çalışılmıştır.

Döküm işleminin ilk denemelerinde -0,4 ve -0,6 bar vakum kullanılmıştır. Resim 4.7’de de görüleceği gibi vakum değerinin sıvı metalin kürecikler arasında yeterli şekilde ilerlemeye yeterli gelmediği görülerek, daha sonraki döküm işlemleri -0,8 bar basınçlı vakum kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.7 Düşük vakum değerlerinde dökülen deneme numuneleri

Elde edilecek alüminyum köpük numunenin daha homojen elde edilmesi için kalıbın ve silika jellerin ısıtılması yöntemine de başvurulmuştur. İlk denemelerde kalıp ısıtılmasa da, sonraki çalışmalarda kalıp sıcaklığı değişik sıcaklık aralıklarında ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Kalıp sıcaklıkları sırasıyla; 100, 120, 130, 180, 200, 300 ve 450 °C gibi çeşitli boyutlarda denenmiştir. Silika jeller de; 110, 130, 180, 200, 250, 300 ve 400 °C gibi çeşitli sıcaklıklarda denenmiştir. Yapılan ön çalışmalar sonucunda Çizelge 4.1’de farklı seriler için kullanılan kalıp ve silika jel sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Üretilen alüminyum köpüklerin döküm esnasındaki kalıp ve silika jel sıcaklıkları

Seri Adı	Kalıp sıcaklıkları (°C)	Döküm esnasındaki silika jel
		sıcaklıkları (°C)
D1	300	300
D2	300	300
D3	300	300
DS1	200	200
DS2	130	130
DS3	130	130

Çizelge 4.1 incelendiğinde, döküm esnasındaki kalıp sıcaklıkları ve silika jel sıcaklıkları farklılıklar göstermiştir. D serisinin üretimindeki kalıp ve silika jel sıcaklıkları aynı olup, DS serisinin üretimindeki kalıp ve silika jel sıcaklıkları ise aynı değildir. D serisi alüminyum esaslı köpük üretiminde ön denemeler sonucu Çizelge 4.1'deki değerler optimum olarak belirlenmiştir. DS serisi Al12Si esaslı köpük üretiminde, sıvı metalin silika jeller arasına sızması kolay olduğu gözlenmiş, sıcaklık değerleri düşürülerek Çizelge 4.1'deki değerler optimum olarak belirlenmiştir. D serisi ile DS serisi alüminyum köpük üretimindeki kalıp ve silika jellerin sıcaklık oranlarının farklı olması ise Etial-5 ve Al12Si alaşımlarının ergime sıcaklıkları ile doğrudan ilişkilidir.

4.2.2. Numunelerin Kesitleri

Döküm yöntemiyle elde edilen numunelerin boyutları, dökümden sonra dökümün alt ve üst kısımlarından uygun şekilde kesilerek deneyler için standart (50 x 40 mm) ölçülere getirilmiştir. Resim 4.8'de ilk dökülen numune ile deney için belirli ölçülerde kesilmiş numunenin resimleri gösterilmiştir.



Resim 4.8 Kalıptan ilk çıkan numunenin şekli ve deneye hazır hale getirilmiş numune

Deney için elde edilen numuneler boyuna kesilerek, iç kısımdaki alüminyum ve silika jel granüllerinin dağılımı incelenmiştir. Buna göre numunenin üst kısmı, açık ve geçirgen bir gözenek yapısına sahipken, alt kısmı ise daha çok kapalı bir gözenek yapısına sahiptir (Resim 4.9).

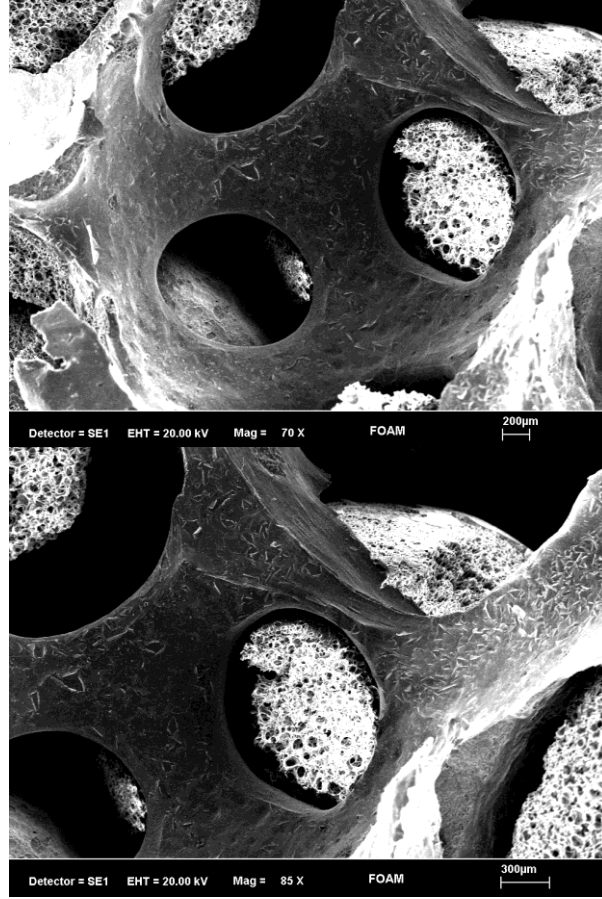


Resim 4.9 Boyuna kesilen alüminyum köpük numune

İncelenmiş olan alüminyum köpük numunenin döküm esnasındaki durumu göz önüne alındığında, dökülen alüminyum miktarı numunenin alt kısmına doğru artmaktadır. Bir başka ifadeyle üst kısımda daha az alüminyum miktarı bulunmakla birlikte alt kısımlarda daha fazla alüminyum miktarına sahip alüminyum köpükler elde edilmiştir. Alt kısımda alüminyum miktarının daha fazla olma sebebi döküm esnasında vakumdan kaynaklandığı söylenebilir.

4.2.3. SEM Değerlendirmeleri

Numunelerden elde edilen SEM görüntüleri bize, döküm yöntemiyle elde edilen alüminyum köpük numunenin düzenli bir hücre yapısı olduğunu göstermiştir. Genleşmiş silika jel taneleri etrafında düzenli oluşmuş, homojen hücre duvarları görülmüştür. Hücre duvar kalınlıklarının değişkenliği ise dikkat çekicidir. Kalıbın üst kısmına denk gelen numunenin iç yüzeyinde daha ince hücre duvarları bulunurken, alt kısmına denk gelen numunenin iç yüzeyinde daha kalın hücre duvarları gözlenmiştir (Resim 4.10).

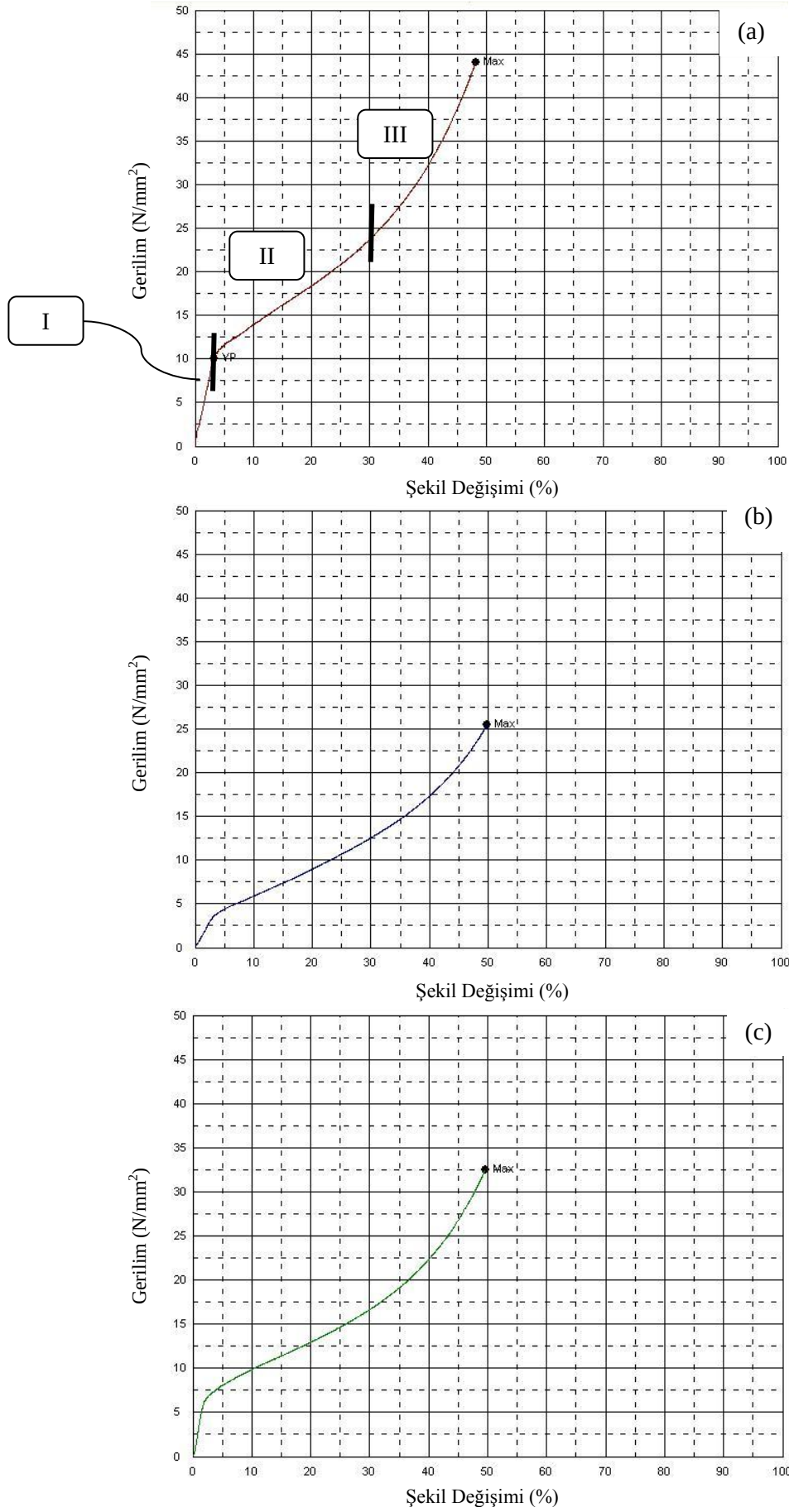


Resim 4.10 Alüminyum köpük numunenin, farklı büyütmelere sahip SEM görüntüleri

Resim 4.10 incelendiğinde, döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpükler, açık ve kapalı olmak üzere her iki gözenek tipini de içerisinde barındırmaktadır. Ancak ağısı yapının az olması ve gözeneklerin birbirleri arasında duvarların bulunması bize, ağırlıklı olarak kapalı gözeneklerin bulunduğunu göstermiştir.

4.2.4 Basma Deneyi Sonuçlarının Değerlendirmeleri

Döküm yöntemi ile üretilen alüminyum köpük numunelerin basma deneyleri, farklı serilerden 2’şer numune seçilerek gerçekleştirilmiştir. Bu deneye göre her numune, 1mm/dk hız ile yaklaşık olarak 20 dakika boyunca deformasyona maruz bırakılmış ve yaklaşık %50 deformasyona uğratılmıştır. Alüminyum esaslı köpük olan D serisi numunelerin basma deney grafikleri Şekil 4.1(a), 4.1(b) ve 4.1(c)’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 D serisinden numunelerin basma deney grafikleri: (a) D1, (b) D2, (c) D3

Şekil 4.1 (a) incelendiğinde, numune %50 deformasyona uğratılmak istense de basma deney makinesinin el verdiği ölçüde bu pek de mümkün olmamış ve numune %50 deformasyona uğrayamadan deney sonuçlandırılmıştır. Şekil 4.1 (b) ve (c) incelendiğinde ise numune % 50 deformasyona uğratılmış ve istenilen grafik elde edilmiştir.

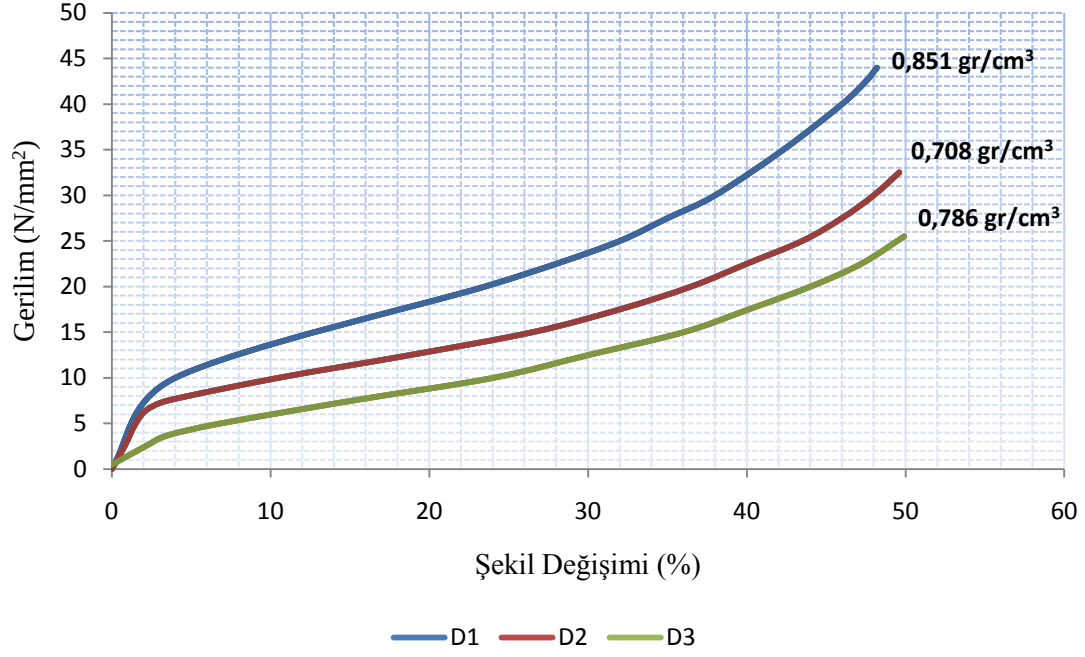
Temsili olarak gösterilmiş olan Şekil 4.1 (a) incelendiğinde, grafik 3 ana bölgeden oluşmaktadır. “I” bölgesinde numune, elastik bölgede bulunmaktadır ve silika jeller kırılmaya başlamıştır. “II” bölgesinde numune, plastik hasara maruz kalmış, hücrelerdeki silika jeller hasara uğramış ve hücreler kapanmaya başlamıştır. “III” bölgesinde ise numune, hücreler tamamen kapanmış ve süngerimsi özelliğini kaybetmiştir. Ayrıca, Şekil 4.1’deki grafiklerden I, II ve III bölgelerinin eğimleri de hesaplanmıştır. Hesaplanan eğimler ile yoğunluklar karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma çizelgede verilmiştir. Metalik köpüklerde II. bölge “plato bölgesi” olarak adlandırılır. Bu bölgede malzeme içindeki gözenekler teker teker deforme olarak hücre duvarları plastik deformasyona uğramaya başlar. Gerilimin azaldığı bu bölgenin eğiminin azalması ile eğri altında kalan alan artar. Bu ise malzemenin daha büyük bir enerji sönümleme yeteneği olduğu anlamına gelir. Çizelge 4.1’de metal köpüğün yoğunluğundaki azalmaya bağlı olarak ikinci bölgenin eğiminde önemli azalma olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.1. D serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen eğimleri

Seri Adı	I bölgesi eğimi	II bölgesi eğimi	III bölgesi eğimi	Yoğunluk
D1	3,9	0,588	1,256	0,851
D2	1,2	0,571	0,833	0,708
D3	4,75	0,448	1,5	0,786

Çizelge incelendiğinde serilerin I, II ve III bölgelerindeki eğim, yoğunlukla doğrudan ilişkili olarak değişmiştir. Alüminyum köpükler için “II” bölgesindeki eğimin oldukça düşük olması istendiği göz önüne alınırsa D3 kod numaralı numune, istenilen en iyi özelliklere sahip olduğu düşünülmektedir.

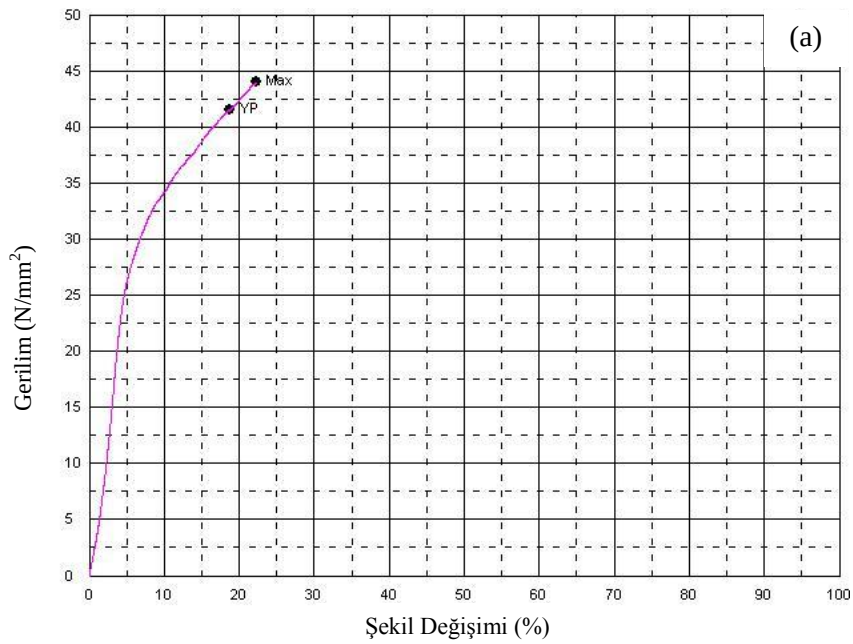
Şekil 4.2’de “D serisi” numunelerin basma deney grafikleri birleştirilerek verilmiştir.

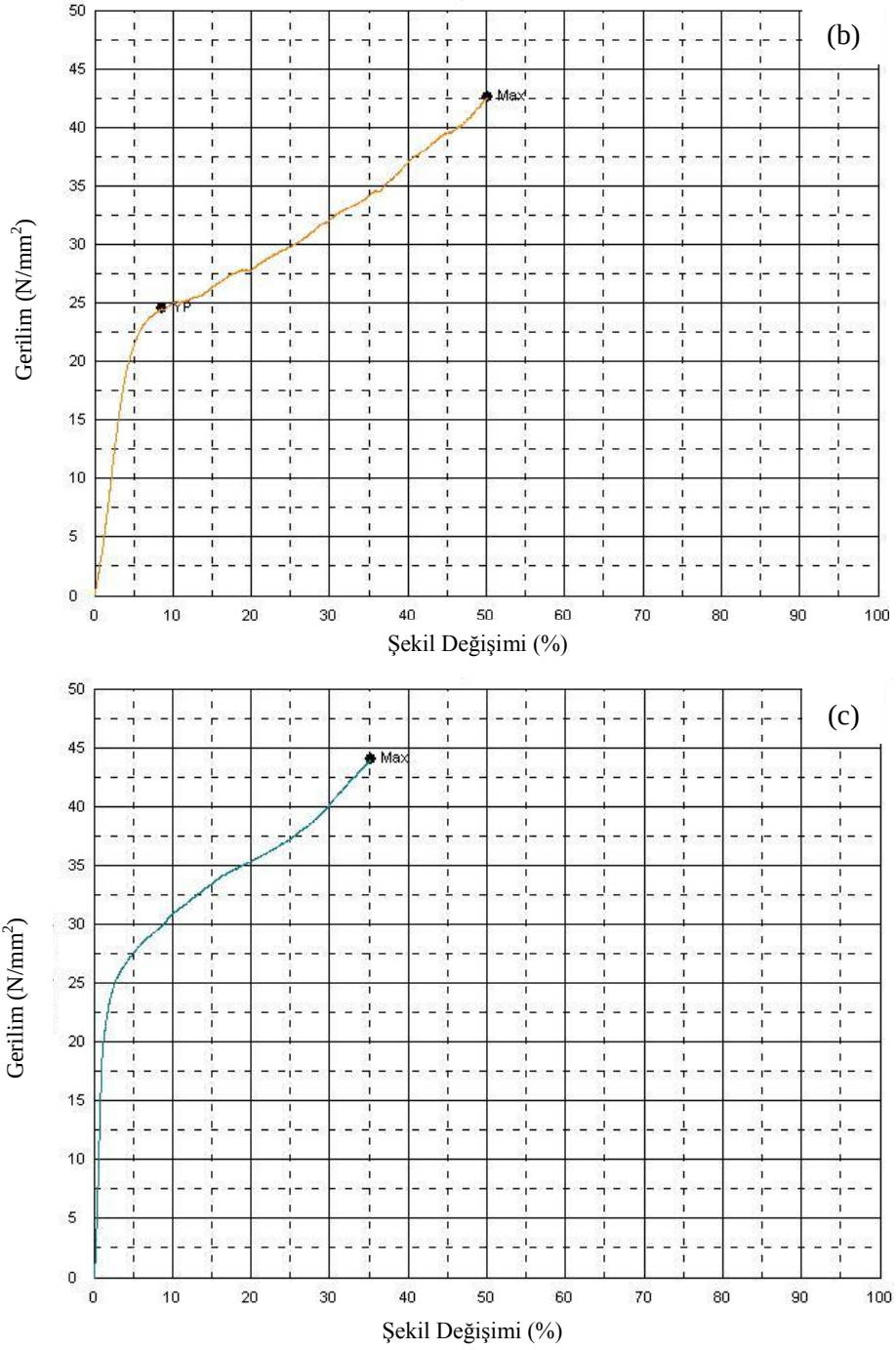


Şekil 4.2 D serisi numunelerin birleştirilmiş basma deney grafikleri

Şekil 4.4 incelendiğinde, elastik bölgelerin uzunluğu, yani plato bölgelerin uzunluğu dikkat çekicidir.

Al-12Si esaslı köpük olan DS serisi numunelerin basma deney grafikleri Şekil 4.3(a), 4.3(b) ve 4.3(c)'de gösterilmiştir.





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

Şekil 4.3 (a) ve (c) incelendiğinde, numune %50 deformasyona uğratılmak istense de basma deney makinesinin el verdiği ölçüde bu pek de mümkün olmamış ve numune %50 deformasyona uğrayamadan deney sonuçlandırılmıştır. Şekil 4.3 (b) incelendiğinde ise numune % 50 deformasyona uğratılmış ve istenilen grafik elde edilmiştir.

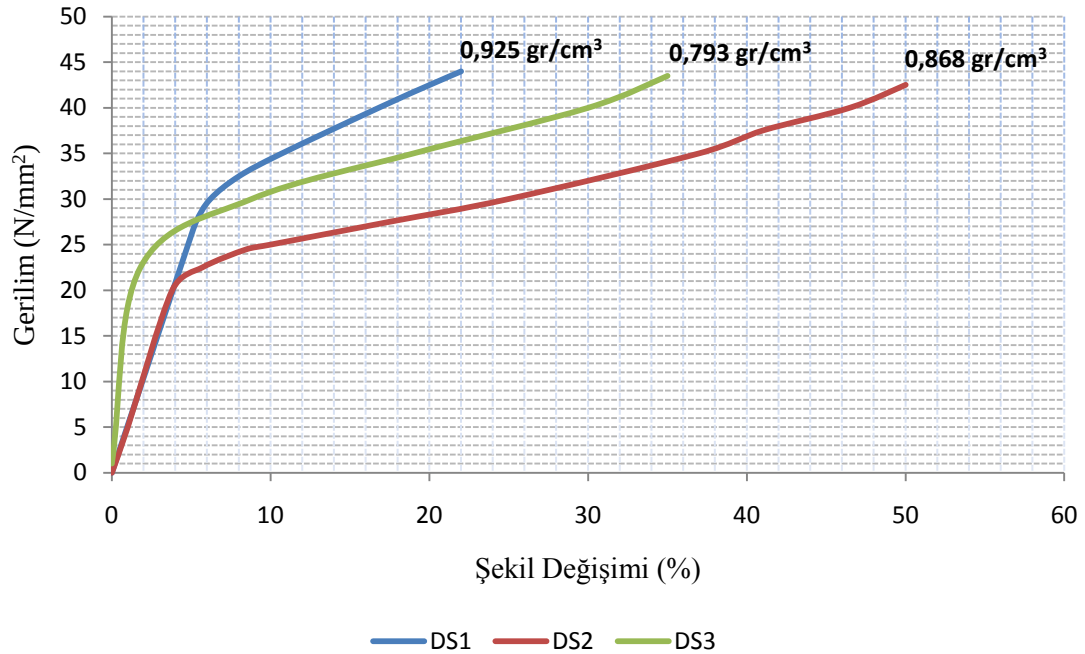
Şekil 4.3'deki grafiklerin eğimleri hesaplanmış ve numunelerin yoğunlukları ile karşılaştırılarak çizelge 4.2'de verilen değerler elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. DS serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen eğimleri

Seri Adı	I bölgesi eğimi	II bölgesi eğimi	III bölgesi eğimi	Yoğunluk
DS1	8,21	1,11	-	0,925
DS2	7,368	0,857	1,05	0,793
DS3	25	0,784	0,595	0,868

Çizelge 4.2 incelendiğinde serilerin I, II ve III bölgelerindeki eğim, yoğunlukla doğrudan ilişkili olarak değişmiştir. Alüminyum köpükler için “II” bölgesindeki eğimin oldukça düşük olması istendiği göz önüne alınırsa DS3 kod numaralı numune, istenilen en iyi özelliklere sahip olduğu düşünülmektedir. DS1 kod numaralı numune ise 3. bölgede hasara uğrayamadan deney sonuçlandırılmıştır.

Şekil 4.4'de “DS serisi” numunelerin basma deney grafikleri birleştirilerek verilmiştir.



Şekil 4.4 DS serisi numunelerin birleştirilmiş basma deney grafikleri

Elde edilen basma deneyleri ile birlikte elde edilen D ve DS seriden numunelerin, plastik yıkım gerilimi de hesaplanmıştır. Çizelge 4.3’de bununla ilgili bir çizelge verilmiştir.

Çizelge 4.3. Serilerin yoğunlukları ile plastik yıkım gerilimlerinin karşılaştırılması

Seri Adı	Köpük Yoğunluğu (gr/cm ³)	Kullanılan Silika Jel Yoğunluğu (gr/cm ³)	σ_{pl} (ortalama)
D1	0,851	0,346	8,64
D2	0,786	0,217	6,25
D3	0,708	0,3171	5,63
DS1	0,925	0,346	32,5
DS2	0,793	0,217	22,5
DS3	0,868	0,3171	26,35

σ_{pl} : Plastik yıkım gerilimi

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

- Seçilen tozların küresel veya çubuksu olması, tozların homojen karışmasında farklılıklar oluşmasına neden olmuştur. Küresel olan tozlar daha homojen karışırken, çubuksu tozlar homojen karışmadığı görülmüştür.
- Toz metalürjisi ile üretilen alüminyum köpük numunelerin yapısal bütünlüğünü koruyabilmesi için gerekli olan tozların preslenmesinde, pres basıncının önemli olduğu ve yapılan çalışmada basma değerinin oldukça düşük olduğu görülmüştür.
- Toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen alüminyum köpük numunelerin sinterlenme sıcaklığı olarak 640°C ve süre olarak da 2 saat sürenin uygun olduğu görülmüştür. Sinterleme sıcaklığının daha yüksek seçilmesi veya sürenin daha uzun seçilmesi, alüminyum köpük numunelerinin ergimesi, oksitlenmesi veya yapısal bütünlüğünün bozulmasına neden olmuştur.
- Toz metalürjisinde kullanılan NaCl, Na₂CO₃ ve K₂CO₃ boşluk tutucu tozlardan çözünmeye en uygun olan toz NaCl olarak belirlenmiştir. Diğer tozlar ise suda çözünme esnasında hızlı bir çözünme gerçekleştirdiği ve bunun da alüminyum köpük numunenin yapısını bozduğu görülmüştür.
- Alüminyum köpük elde etmek için yapılan çözme işleminde, suyun çözme sıcaklığı NaCl için 80°C olarak uygun olduğu gözlenmiştir. Diğer boşluk tutucu tozlar olan Na₂CO₃ ve K₂CO₃ için sıcaklığın çözme işlemine etkisinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, boşluk tutucu malzeme olarak NaCl tozu kullanıldığında çözme işlemi 80°C’de, Na₂CO₃ ve K₂CO₃ kullanıldığında çözme işleminin oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ancak buna rağmen Na₂CO₃ ve K₂CO₃ boşluk tutucu tozlar, alüminyum köpüğün yapısal bütünlüğünü bozmuştur.

- Silika jellerin genleştirme sıcaklıkları farklı farklı seçilmiş, her bir serinin ağırlık, hacim ve yoğunlukları hesap edilmiştir. Silika jellerin sıcaklıkla ağırlıkları azalmış, hacimleri artmış ve yoğunlukları düşmüştür.
- 1000 °C, 1100 °C ve 1200 °C gibi farklı sıcaklıklarda genleştirilmiş silika jellerin yoğunluklarına bakıldığında, 1100 °C sıcaklıkta genleştirilmiş olan silika jellerin yoğunluğu diğer sıcaklıkta genleştirilmiş silika jellerin yoğunluklarından düşük olduğu görülmüştür.
- Döküm yöntemiyle üretilecek köpükler için %99,7 saflığına sahip Al ve Al-12Si alaşımları kullanılmıştır. Dökümde kullanılan Al'un ergime sıcaklığı Al-12Si alaşımına göre daha yüksek olduğu nedeniyle, Al ve Al-12Si alaşımları farklı sıcaklıklarda dökülmüştür.
- Basma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre döküm yöntemiyle üretilmiş alüminyum köpüklerden Al-12Si esaslı köpük, Al esaslı köpükten daha mukavemetli olduğu ortaya çıkmıştır.
- Elde edilen D serisi numunelerden, yoğunluğu en düşük olan D2 kod numarasına sahip alüminyum esaslı metalik köpüktür. Bunun nedeni olarak ise 1100 °C'de genleştirilmiş silika jelin yoğunluğunun, diğer sıcaklıklarda genleştirilmiş olan silika jellerden daha düşük olduğu düşünülmektedir.
- Elde edilen DS serisi numunelerden, yoğunluğu en düşük olan DS2 kod numarasına sahip Al-12Si esaslı metalik köpüktür. Bunun nedeni olarak ise 1100 °C'de genleştirilmiş silika jelin yoğunluğunun, diğer sıcaklıklarda genleştirilmiş olan silika jellerden daha düşük olduğu düşünülmektedir.
- Döküm yöntemiyle elde edilmiş D ve DS serisi numunelerin yoğunlukları karşılaştırıldığında D serisinin yoğunlukları, boşluk tutucu malzeme olarak aynı sıcaklıkta genleştirilmiş silika jel kullanılmasına rağmen DS serisinin yoğunluklarından daha düşük olduğu görülmüştür.

- Döküm yöntemiyle elde edilen alüminyum köpüklerin çekilen SEM görüntülerinden, açık ve kapalı olmak üzere her iki hücre tipini de gösterdiği fakat numunelerde ağırlıklı olarak hücre duvarlarının bulunması bize kapalı hücreli alüminyum köpüğe yakın bir ürün elde ettiğimizi göstermiştir.
- Döküm yöntemi ile üretilmiş metalik köpüklerin vakum kısmına yakın olan bölgedeki alüminyum miktarı daha fazla, vakum kısmından uzaklaştıkça alüminyum miktarı azalma göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

- Akiyama S., Ueno H., Imagawa K., Kitahara A., S., Morimoto K., Nishikawa T., and Itoh M., 1987. US Pat. 4 713 277
- Amjad S., 2001. Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams.
- Ashby M. F., Jones D. R.H., 1998. Engineering Materials 2.
- Ashby M.F., Evans A. G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W. and Wadley H.N.G., 2000. Metal Foams: A Design Guide.
- Ashold P., 1999. Metal Foams and Porous Metal Structures, MIT-Verlag, German,13.
- Babcsán N., Banhart J. and Leitlmeier D., 2003. Metal Foams-Manufacture and Physics of Foaming
- Banhart J., 1999. Properties and applications of cast aluminium sponges, p 159.
- Banhart J., 2000. Manufacturing Routes for Metallic Foams, JOM, p. 22, December.
- Banhart J., 2000. Metallic Foams: Challenges and Opportunities.
- Banhart, J., 2001. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, Progress in Materials Science, 46, 559-632.
- Banhart J., Weaire D., 2002. Physics Today, July 2002, p 38.
- Banhart J., 2003. Aluminium Foams: On the Road to Real Applications, MRS BULLETIN, p.290, April.
- Banhart J., 2005. Aluminium foams for lighter vehicles, Int. J. Vehicle Design, Vol. 37, p. 119.
- Bart-Smith, Bastawros AF. Mumm Dr, Evans AG., 1998. Porous and cellular materials for structural applications. MRS Symp. Proc., vol.521, p.71.
- Baumeister J., Banhart J., Weber M., 1997. Aluminium foams for transport industry, Materials&Design, Volume 18, Number 4/6, p. 218.
- Baumgaertner F., Duarte I., Banhart J., 2000. Advanced Engineering Materials 2, 168.
- Çinici H., 2004. Toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretimi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara
- Davies G.J., Zhen S., 1983. Journal of Materials Science 18, 1891.
- Degischer H. P., Kristz B., 2002. Handbook of Cellular Metals.
- Dumais J., 2009. Lectures on Biomechanics, Lecture 3:Cellular Solids, Lesson notes.
- Elbir S., Yılmaz S., Güden M., 1999. Kapalı hücre alüminyum köpük metallerin üretim metotları ve mekanik özellikleri, TMMO Metalurji Dergisi, 23 (120): 35-42.

- Ergönerç Ç., 2008. Development and Design of Closed-Cell Aluminium Foam-Based Lightweight Sandwich Structures for Blast Protection, Izmir Institute of Tecnology, Master Thesis, Izmir.
- Gergely V., Degischer H. P., Clyne T. W., 2000. Recycling of MMCs and Production of Metallic Foams.
- Gergely V., Curran D.C. and Clyne T.W., 2003. The FOAMCARP process, Comp. Sci. and Technology
- Gibson L.J., Ashby M.F., 1997. Cellular Solids: Structure and Properties, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Hanssen A.G., Langseth, M., Happerstad, O.S., 2000. Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler, Int. J. of Impact Eng., 24(5); 475-507.
- Haydn, N. , Wadley G., 2002. Cellular Metals Manufacturing, Advanced Engineering Materials, (10):726-733.
- Hernández A.R.A., 2005. Combined flow and heat transfer characterization of open cell aluminum foams, University of Puerto Rico, Master of Science.
- Hyun S.K., Nakajima H., 2000. Adv. Eng. Mater., p. 168.
- Kasaplar G., 2007. Alüminyum yüzeyindeki oksit tabakasının okzalik asit anodizing yöntemi ile geliştirilmesi, Çukurova Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Kenny L.D., 1996. Mater. Sci. Forum, 217-222, p. 1883.
- Martin R. L., 1996. US Pat. 5 564 064.
- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., ve Kitahara, A., 2000. ALPORAS Aluminium Foam: Production process, Properties, and Applications, Advanced Engineering Materials (4):179-183.
- Ogan A. D., 2008. Alüminyum esaslı gözenekli malzeme elde edilmesi, karakterizasyonu ve bazı özelliklerinin irdelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Doktora, Kayseri
- Olurin O.B., Fleck N.A., Ashby M.F., 2000. Mat.Sci.and Eng.A 291, p.132-146.
- Özer G., 2005. Alüminyum esaslı köpük metal üretimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Sertkaya A. A., 2008. Alüminyum köpüğün ısı değıştirici olarak tasarımı ve ısı transferi modeli, Selçuk Üniversitesi, Doktora Tezi, Konya.
- Shapovalov V., I., 1998. Formation of Ordered Gas-Solid Structures Via Solidification in Metal-Hydrogen System, Porous and Cellular Materials for Structural

- Applications, Materials Research Society Symposium Proceedings Volume 521, p. 282
- Sun D.X., Zhao Y.Y., 2005. Simulation of thermal diffusivity of Al/NaCl powder compacts in producing Al foams by the sintering and dissolution process, Journal of Materials Processing Technology 169, 83–88.
- Sun D.X., Zhao Y.Y., 2005. Phase changes in sintering of Al/Mg/NaCl compacts for manufacturing Al foams by the sintering and dissolution process, Materials Letters 59 6– 10.
- Tunçer N., 2006. Metalik köpük malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu, Anadolu Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Uçak T., 2003. The effects of process parameters on the cell morphology of the aluminum foam, Istanbul Technical University, Master of Science, Istanbul.
- Wightman G., Fray D.J., 1983. Metallurgical Transaction 14B 625-631.
- Yang C.C., Nakae H., 2000. Foaming characteristics control during production of aluminium alloy foam, Journal of Alloys and Compounds, 313:188-191.
- Zhaoa Y., Han F., Fung T., 2004. Optimisation of compaction and liquid-state sintering in sintering and dissolution process for manufacturing Al foams, Materials Science and Engineering A364 117–125.

7.1 İnternet Kaynakları

Erişim Tarihi

1- <http://www.mmo.org.tr>

02.03.2011.

2- <http://www.metaldunyasi.com>

07.03.2011.

3- <http://www.gidamo.org.tr>

24.04.2011.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ali YAVUZ

Doğum Yeri : Kütahya

Doğum Tarihi : 10.09.1985

Medeni Hali : Bekâr

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Simav Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi,
Simav/KÜTAHYA, 2002

Üniversite : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Metal Öğretmenliği, 2009

Yüksek Lisans: Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal
Eğitimi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Set Elektrik-Mühendislik Sanayi ve Ticaret LTD. ŞTİ. Teknisyen, 08.2004-05.2005

Löher Asansör Sanayi ve Ticaret LTD. ŞTİ. Teknisyen, 07.2006-09.2006