

**ALÜMİNYUM ESASLI KOMPOZİT
KÖPÜK ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU
SÜLEYMAN İSMAİL ÇAĞLAR
Yüksek Lisans Tezi
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Danışman
Yrd. Doç. Dr. NİLHAN ÜRKMEZ TAŞKIN
2009
EDİRNE**

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ESASLI KOMPOZİT KÖPÜK ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Mak. Müh. SÜLEYMAN İSMAİL ÇAĞLAR

Yüksek Lisans Tezi

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YRD. DOÇ. DR. NİLHAN ÜRKMEZ TAŞKIN

2009

EDİRNE

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
ÖNSÖZ	VI
TEŞEKKÜR	VII
1. GİRİŞ	1
1.1. Metal Köpüklerin Tarihçesi.....	2
1.2. Metal Köpüklerin Sınıflandırılması.....	3
1.2.1. Hücresel (selüler) metaller.....	3
1.2.2. Gözenekli (poroz) metaller.....	3
1.2.3. Metal köpükler.....	3
1.2.4. Katı köpükler.....	3
1.3. Metal Köpüklerin Kullanım Alanları.....	4
1.3.1. Metal köpüklerin çeşitli endüstriyel sektörlerdeki yapısal uygulamaları.....	4
1.3.2. Fonksiyonel uygulamalar için hücresel metaller.....	11
1.3.3. Dekorasyon ve sanat için hücresel malzemeler.....	14
1.3.4. Uygulama seçimlerinin belirlenmesi.....	15
2. METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ	16
2.1. Metal Gaz Enjeksiyonu.....	17
2.2. Gaz Bırakan Partiküllerin Eriyiğin İçinde Çözülmesi.....	19
2.3. Yarı Katı İçinde Gaz Bırakan Partikül Çözülmesi.....	21
2.4. Polimer Yada Balmumu Prekursörünü Master Olarak Kullanarak Yapılan Döküm.....	22
2.5. Hücresel Preformlar Üzerine Metal Kaplanması.....	24
2.6. Hapsedilmiş Gaz Genişlemesi.....	25
2.7. Boş Küre Yapılar.....	27
2.8. Bir Tanesi Eriyebilen İki Malzemenin Yeniden Sıkıştırılarak Dökümü.....	31
2.9. Gaz-Metal Ötektik Katılaştırma.....	32
3. HÜCRESEL METALLERİN KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ	35
3.1. Tahribatsız Muayene.....	35
3.1.1. Yoğunluk ölçümleri.....	35

3.1.2. Boya nüfuz ettirme ölçümleri.....	35
3.1.3. X-Işını radyoskopi ve radyografisi	35
3.1.4. X-Işını ölçümlü tomografi.....	36
3.1.5. Girdap akım algılama	36
3.1.6. Akustik ölçümler.....	36
3.1.7. Titreşimsel analiz.....	36
3.1.8. Gözeneklilik ve geçirgenlik.....	36
3.1.9. Elektriksel ve ısı iletim ölçümleri.....	37
3.1.10. Diğer metotlar.....	37
3.2. Tahribatlı Muayene.....	37
3.2.1. Optik suret analizi.....	37
3.2.2. Mekanik testler.....	37
3.2.3. Korozyon testi.....	38
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	39
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	43
5.1. Kompozit Köpük Üretimi.....	43
5.1.1. Malzeme Seçimi	43
5.1.1.1 TiH ₂ Tozlarının Isıl İşlemi	44
5.1.2 Deney Düzenegi	45
5.1.2.1. Kompozit Köpük Hazırlama Ünitesi.....	45
5.1.2.2. Döküm Kalıpları.....	47
5.1.3. Yarı-katı Karıştırma Yöntemiyle Metal Köpük Üretimi.....	47
5.1.3.1. Alüminyum Alaşımlarının Yarı-katı Sıcaklık Aralıklarının Belirlenmesi.....	47
5.1.3.2. Kompozit Metal Köpük Üretimi ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi....	49
5.2. Karakterizasyon.....	50
5.2.1. Özgül Ağırlıkların Tespit Edilmesi.....	50
5.2.2. Mikro Yapı İnceleme.....	50
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	52
6.1. TiH ₂ Tozlarının Isıl İşlemi.....	52
6.2. Kalıp Malzemesi Belirlenmesi İçin Deneme Sonuçları	53
6.3. Özgül Ağırlıklar ve Gözenek Oranları	55
6.4. Proses Değişkenlerinin Belirlenmesi	56

6.4.1. Zamanın Yoğunluk Değişimine ve Köpük Oluşumuna Etkisi.....	56
6.4.2. TiH ₂ Miktarının Yoğunluk Değişimine ve Köpük Oluşumuna Etkisi.....	58
6.4.3. SiC Miktarının Yoğunluğa ve Köpük Yapısına Etkisi.....	59
6.4.4. Döküm Sıcaklığının Köpük Oluşumuna Etkisi.....	60
6.4.5. Farklı Boyuttaki TiH ₂ Tozlarının Etkisi.....	61
6.4.6. TiH ₂ Tozlarına Isıl İşlem Yapılmasının Köpük Oluşumuna Etkisi.....	61
6.4.7. SiC Boyutunun Etkisi.....	63
6.5. Mikro Yapı İncelemeleri.....	63
6.6. Tarama Elektron Mikroskobu EDS Analiz Sonuçları.....	65
7. SONUÇLAR.....	69
8. KAYNAKLAR.....	71

ÖZET

Bu çalışmada AlMg3 (EN AW 5754) Alüminyum alaşımı, yarı-katı halde değişik % ağırlık oranlarında köpürtme ajanı (TiH₂) katılmak suretiyle, farklı sürelerde bekletilerek köpürtülmüştür. Köpük malzeme farklı oranlarda SiC_p ile takviye edilerek, takviyenin köpük stabilizasyonuna etkisi incelenmiştir. Üretilen kompozit köpüklerin rölatif yoğunlukları belirlenmiş, SEM ve mikro yapı analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda SiC_p takviyenin köpük malzemede hücre stabilizasyonu sağladığı görülmüştür. Köpük oluşumunda, köpürtme süresi, takviye boyutu ve oranı, sıcaklık ve köpürtücü madde özelliklerinin köpük oluşumunu etkileyen başlıca parametreler olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : AlMg3, Alüminyum, kompozit, köpük, üretim, karakterizasyon, yarı-katı.

ABSTRACT

In this study EN AW 5754 Aluminium alloy is foamed in semi-solid state with different time intervals by adding different %wt. of blowing agent (TiH_2). Different %wt. of SiC was reinforced and the effect of SiC to foam stabilization was investigated. Relative densities were determined by density measurements of the specimens, SEM and micro-structure images were taken. The result of this study showed that, SiC_p reinforcement stabilize the cell structure of the foam material. Foaming time, reinforcement size and percentage, temperature and the properties of the blowing agent were determined as the basic parameters of the foam formation.

Key Words: AlMg3, Aluminium, composite, foam, production, characterization, semi-solid.

ÖNSÖZ

Yeni bir malzeme için uygulamalar bulmak genellikle zordur. Bu hücreli metallere ve metal köpükler için de geçerlidir. Eğer ilginç hafif yapı malzemeye ise kullanılacak daha ucuz bir malzeme mevcuttur. Fakat düşük ağırlıkla beraber iyi enerji soğurma karakteristiği ısı dayanım gerekli ise, metal köpüklerin rekabet gücü oldukça artar. Bu nedenle, her yeni uygulama fikri hangi özelliklerin gerektiği tartılarak belirlenmelidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada emeği geçen değerli hocalarım Nilhan Ürkmez TAŞKIN, Vedat TAŞKIN ve Metin AYDOęDU'ya, yardımlarından dolayı proje arkadaşlarım Pınar Aydan Demirhan, İsmail Mutlu ve Anıl Őahin'e, destek ve hoőgörülerinden dolayı eőim Tuba'ya, oğlum Mesut Deniz'e, anneme ve babama çok teşekkür ederim.

Bu tez TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı tarafından 108M325 numaralı proje kapsamında desteklenmiőtir.

1. GİRİŞ

Köpük metal, gaz gözeneklerinin ince film tabakalarla ayrıldığı ve sürekli matrisin hacim oranının genellikle küçük olduğu (10-30%) sentetik hücreli bir malzemedir. Normal metallere karşılık, metal köpükler polimer köpüklerin ve ağaçların kullanılmadığı özel ortamlarda ve sıcaklıklarda mühendislik uygulamaları için bazı sıra dışı avantajlar sunarlar (Song v.d. 2007). Metalik köpüklerin, polimerik olanlara göre çeşitli mühendislik özellikleri daha üstündür: daha serttirler, yüksek sıcaklıklarda daha stabildirler, üstün yanma direncine sahiptirler, yangında zehirli dumanlar üretmezler. Daha da fazlası bu malzemeler kirlilik ya da çöp problemi olmadan tamamıyla geri dönüştürülebilirler. Hücreli metaller çarpma yönüne bağlı olmaksızın yüksek çarpma enerjisi emerler ve ses emmesinde, elektromanyetik perdelemede, titreşim sönümlemede oldukça verimlidirler (Degischer v.d. 2002).

Metal köpükler düşük yoğunluk ve yeni fiziksel, mekanik, termal, elektriksel ve akustik özellikleriyle yeni bir malzeme sınıfıdır. Metal köpükler, yapıldıkları katı metal malzemeyle kıyaslandıklarında farklı etkileyici özellikler gösteren devrim niteliğinde malzemelerdir (Ashby v.d. 2000). Metal köpükler mükemmel sertlik/kütle oranları sayesinde mekanik uygulamalardan termal uygulamalara kadar bir çok alanda kullanılabilirler (Behrendt v.d. 2006). Metal köpüklerin, yüksek sertliğin çok düşük rölatif yoğunlukla birleşmesiyle ya da, yüksek gaz geçirgenliğinin yüksek ısı iletimle birleşmesiyle ilginç fiziksel ve mekanik özellik kombinasyonları oluşur. Metal köpükler yapısal olarak hücre topolojilerine, açık ya da kapalı hücre olmalarına, rölatif yoğunluğuna, hücre boyutuna, hücre şekline ve anizotropiye göre karakterize edilir (M.F. Ashby v.d., 2000, John Banhart v.d., 2001). Metal köpükler alüminyum, titanyum, nikel ve birkaç farklı materyalden yapılır. Sonuçta uygulama alanı, metal köpüğün hangi materyalden yapılacağını belirler (Ashby v.d., 2000). Metal köpüklerin özellikleri, gözenek boyut dağılımı, hücre duvar eğriliği, kusurlar vs. gibi birçok morfolojik özelliğe dayanır. Özellikler ve yapı arasındaki karşılıklı ilişki tam olarak bilinmemesine rağmen kusursuz konveks gözeneklerin düzgün dağılımı oldukça arzulanır (Babsan v.d., 2002).

1.1. Metal Köpüklerin Tarihçesi

Benjamin Sosnick, 1943 yılında, alüminyum cıvayla birlikte köpükleştirmeyi denedi. Önce, Alüminyum ve cıva karışımını kapalı bir kaptaki yüksek basınç altında eritti. Basınç kaldırılınca, cıva, alüminyumun erime ısısında buharlaştı ve köpük oluştu. 1950'lerde, sıvı metallerin, önceden akışmazlıklarını arttırıcı işlemlerden geçirildiklerinde çok daha kolay köpükleştirilebileceğinin anlaşılmasıyla, daha tehlikesiz işlemler gerçekleştirilmeye başlandı. Akışkanlığı azaltma (Drenajı azaltma), ergimiş kütleyi oksitleyerek oksit parçacıkları ekleyerek yapılabildi. 1950'lerin sonlarında, Madison-Wisconsin'deki Brojsten Araştırma Laboratuvarları'ndan William Elliot ve Stuard Fiedler, ABD Donanması için bir alüminyum köpükleştirme işlemi gerçekleştirdiler. Bunun ardından yaklaşık 10X20X0,25 santimetrelik paneller üretecek bir pilot fabrika kuruldu. Burada arabalar için ezilen tampon yapımı gibi, alüminyum köpüklerin olası kullanımları da araştırıldı.

Ayrıca kurşun ve çinko gibi başka metalleri köpükleştirme yöntemleri üzerine araştırmalar uzun yıllar boyunca sürdürüldü. İlk yıllarda günümüzde de kullanılan ergimiş maddeye sürekli gaz püskürtme ve ergimiş kütleye –plastik köpük endüstrisindeki şişirici maddelere mayaya benzeyen- gaz çıkaran yakıtlar (Blowing Agent) eklenmesi yöntemleri kullanıldı. O yıllarda alüminyumun köpük üretimi için çok uygun bir malzeme olduğu anlaşıldı. 1972 yılında Ethyl şirketi, dikkate değer ölçüde yüksek kaliteli alüminyum köpük üreterek, değerlendirme yapması için Ford Motor Şirketi'ne verdi. Ancak bu girişimlerin hepsi başarısızlıkla sonuçlandı. Enerji kaynaklarının sınırsızmış gibi görüldüğü o dönem, hafif malzemeler için uygun bir zaman değildi. Güvenlik ve geri kazanım gibi konular da bugünkü kadar önemsenmiyordu. Belki de bu yeni malzemenin düzensiz doğası kalite kontrolünde sorunlara yol açıyordu. 1975 yılından sonra metal köpük ar-ge çalışmalarının sayısı azaldı. 1980'lerin sonlarındaysa metal köpük araştırmaları tüm dünya da yeniden canlılık kazandı. Shinko Wire şirketindeki Japon mühendisler bugün "Alporas işlemi" olarak bilinen işleme yöntemini geliştirdiler. Norveç'teki Norsk Hydro ve Kanada'daki Alcan şirketleri, birbirinden ayrı olarak parçacıkları stabilize edilmiş eriyikler için bir köpükleştirme işlemi geliştirdiler. 1990 yılında, alman fizikçi Joachim Baumesiter,

1950'lerin sonunda United Aircraft Şirketi'nden Benjamin Allen'in geliştirdiği sıkıştırılmış toz köpükleştirme işlemini yeniden keşfetti. İlk olarak sıkıştırılan sonra yeniden ergitilerek köpükleştirilen toz karışımlarının kullanıldığı bu yöntem, Almanya'daki Fraunhofer Enstitüsü'nde daha da geliştirildi. Tüm bu işlemler ve başka çeşitlemeler, sürekli geliştirilip iyileştirilerek günümüze kadar geldi (Banhart v.d., 2002).

1.2. Metal Köpüklerin Sınıflandırılması

Literatürde ve pratik kullanımda, metalik köpük teriminin, yoğun-olmayan herhangi bir metalik malzeme için kullanılması gibi bir karmaşa mevcuttur. Metalik köpüğü doğru tanımlamak için;

1.2.1. Hücresel (selüler) metallere, destek ve tabakaların ara bağı ağı ile oluşan yüksek hacim fraksiyonlu boşluklara sahip malzemelerdir.

1.2.2. Gözenekli (poroz) metallere, izole edilmiş kabaca küresel gözeneklere sahiptir ve porozite seviyesi genellikle 70%'den düşüktür. Mekanik olarak, gözenekler porozitenin 20 %'den düşük olduğu durumlarda birbirleriyle etkileşmezler.

1.2.3. Metal köpükler, hücresel metallere bir alt grubudur, genellikle çok yüzlü hücreleri vardır, şekilleri duruma göre değişebilir, örneğin yönlü katılaştırma değişik morfolojiler yaratabilir. Hücreleri ayıran ya da bitştiren hücre zarlarıyla kapalı hücre, ya da hücre zarı olmaksızın hücrelerin ara bağı olmasıyla açık hücre olabilirler. Metal köpük ifadesi, sadece sıvı faz için kesinlikle geçerlidir, sık sık katı ürünü tanımlamak için de kullanılır. Böylece; sıvı mukabili sıvı-metal köpük olarak tanımlanır.

1.2.4. Katı köpükler, sıvı köpükten oluşurlarsa kapalı hücrelidirler. Bazıları açık hücre metalik yapılara metal köpük yerine, *metal sünger* demeyi tercih ederler (Babscan v.d., 2002).

1.3. Metal Köpüklerin Kullanım Alanları

Metal köpükler, termal, mekanik, biomedikal, yakıt pili, elektriksel ve sönümlenme gibi uygulamalarda, endüstriyel ve bilimsel olarak geniş bir yelpazede kullanılabilir.

Metal köpükler genişleyen bir yelpazede uygulama alanı bulmaktadırlar. Uygun metal köpüğün bir probleme çözüm olması bir takım şartlara bağlıdır.

A) Morfoloji: İstenen porozite tipi (açık kapalı), istenen porozite miktarı, istenen porozitenin boyut skalası, metal köpüğün toplam iç yüzey alanı.

B) Metalürji: istenen metal, alaşım ya da mikro yapısal hal.

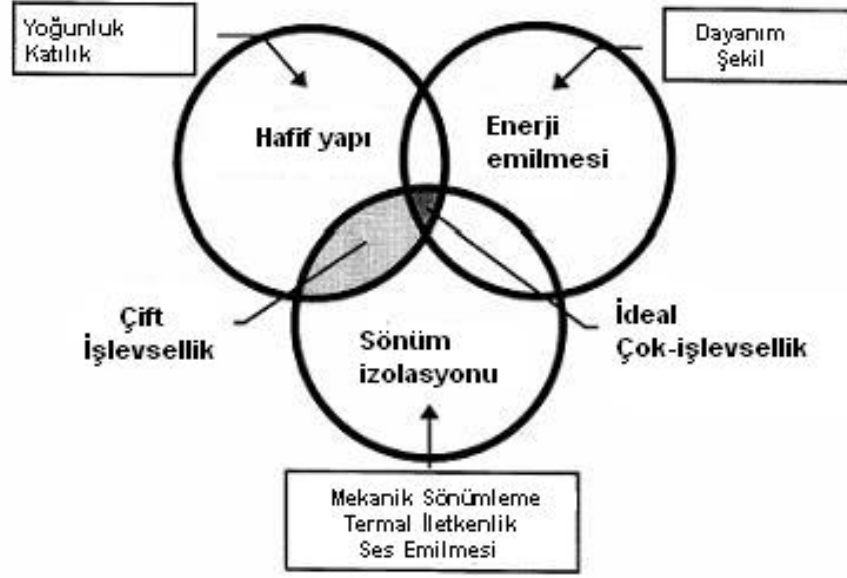
C) Proses: köpüğün şekillendirilebilirliği ya da köpük ve geleneksel levha ya da profillerle kompozit üretilebilirliği.

D) Ekonomi: Maliyet masrafları, geniş hacimde üretime uygunluğu (Banhart, 2001).

1.3.1. Metal köpüklerin çeşitli endüstriyel sektörlerdeki yapısal uygulamaları

Otomotiv endüstrisi

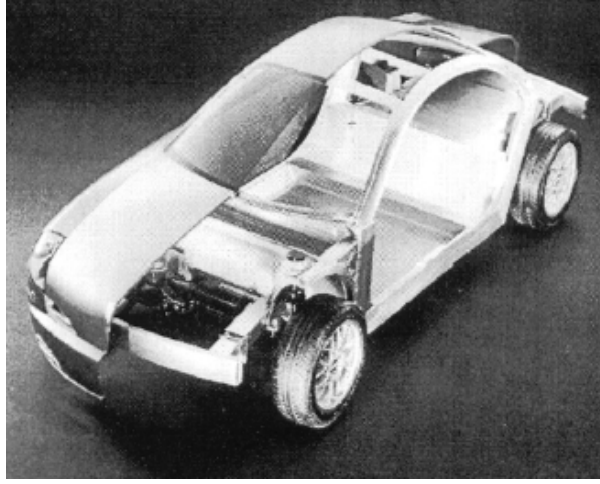
Otomobillerin güvenliği konusunda artan talepler, birçok durumda daha ağır araç üretilmesiyle sonuçlanmıştır. Bu da daha az yakıt tüketme talepleriyle çakışmakta ve ağırlığın düşürülmesi için ek hesaplar yapılma gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Özellikle Avrupa ve Japonya'da kısa araçlar tercih edilmektedir, fakat bu kısaltma yolcunun hareket alanını etkilememelidir. Bunun için daha küçük motorlar denenmiş fakat, bu sefer de parçaların birbirine çok yakın olmasından dolayı ısınma problemi, ve çarpışma alanının azaltılması problemi ortaya çıkmıştır. Sonuçta akustik emisyonları azaltmak için yeni ses emicilere ihtiyaç doğmuştur. Metal köpükler bu problemlerin bazılarına çözüm olabilir. Hafif panel, çarpışmada enerji soğurması, ses ya da ısı soğurması için kullanılabilir (Banhart, 2001).



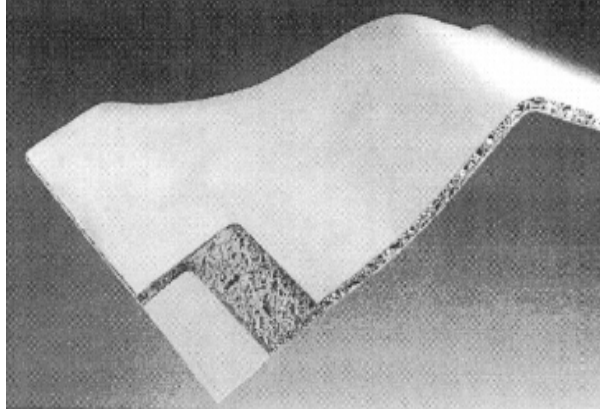
Şekil 1.1. Metal Köpüklerin Temel Otomotiv Sektöründeki Kullanım Alanları

Hafif yapı

Hafif yapı metal köpüğün 2 özelliğine dayanır: neredeyse tersinir, sanki-elastik deformasyon gösterirler ve katılık-kütle oranı yüksektir. Bu oran aynı ağırlıktaki geleneksel panellerin 5 katıdır (Evans v.d., 1999). Sandviç panel formundaki metal köpükler arabaların ağırlığını azaltmak için kullanılabilir. Örneğin motor kapağı, bagaj kapağı, açılan tavanlar gibi yüksek peklik gerektiren yerlerde torsiyonel deformasyonu ve bu parçaların titreşmesini engellemek için kullanılabilir (Kretz v.d., 1999). Alman üreticisi Karmann, üstü açılır arabalar ve yarış arabaları için ciddi problem olan ağırlığı azaltmak için çelik paneller yerine, 3 boyutlu sandviç panelleri test etmektedir. Böylelikle herhangi bir parça için ağırlık %25 azaltılmakla kalmayıp peklik %700 arttırılmaktadır (Banhart, 1997, Banhart 1999).



Şekil 1.2. Hafif araç dizaynı Karmann GmbH



Şekil 1.3. Genişlemeden sonra preslenmiş panel. 3 boyutlu yapıyı gösteriyor. Karman GmbH

Çarpışma enerji soğurması

Metal köpükler, oldukça yüksek dayanımlarından dolayı, polimer köpükler gibi geleneksel köpüklerden daha iyi bir performans sergilerler (Niebylski, 1972). Baş darbeleri, yandan gelen darbeler, dolaylı darbeler ve takla atmaktan kaynaklanan darbeler azaltılabilir (Banhart v.d., 1997). Enerji soğurma karakteristikleri olabildiğince idealdir. Birim hacimde, uzunlukta ve kütlede yüksek enerji soğurma kapasitesi vardır. Enerji soğurma izotropisi, geniş bir yelpazedeki darbe yönlerinde iyi enerji soğurma karakteristikleri mevcuttur. Homojen alüminyum köpükler ya da sentetik hüresel metaller oldukça iyi soğurma özellikleri gösterirler. Gerilme-gerinim eğrisinde istenmeyen fazla bir eğrilik gözlenmesine rağmen, oldukça uzun bir plato sahası

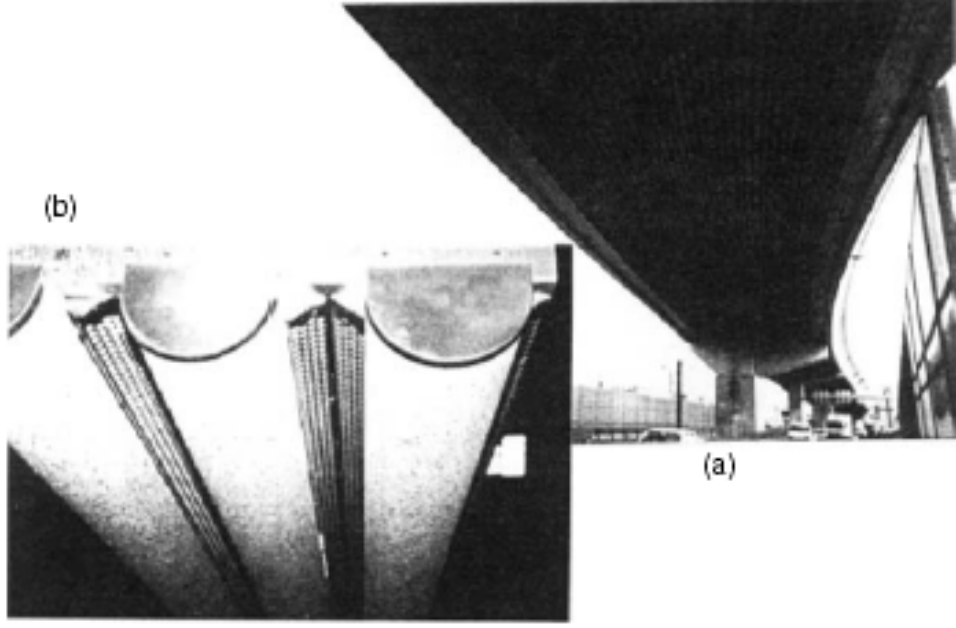
sergilerler (Banhart v.d., 1999). Daha da fazlası, üretim yönteminin yarattığı anizotropiler dışında enerji soğurulması oldukça izotropiktir (Banhart, 1998).

Ses kontrolü

Ses kontrolünde genellikle polimer köpükler kullanılır (Endler v.d., 1997). Metal köpüklerin elastisite modülü yapıldıkları metale göre daha düşüktür, ayrıca kayıp faktörü en az 10 kat daha fazladır, böylece titreşim sönümlenebilir (Banhart, 1996). Köpüğe gelen ses dalgalarının bir kısmı yansıtılır ve bir kısmı da yapıya girer. Giren dalgaların bir kısmı soğurulur ve bir kısmı da iletilir. Metal köpükler bazı frekanslarda %99 soğurma yapabilir (genellikle 1-5kHz). Ses izolasyonu ve soğurulması otomotiv endüstrisinde önemli bir konudur. Metal köpüklerin hafif yapısal özelliği otomotiv sektörü gibi, havacılık endüstrisi içinde önemlidir. Boeing firması gaz hapsetme yöntemiyle geniş titanyum köpük sandviç ve alüminyum köpük sandviç parçalar yapmıştır. Bu parçalar helikopterlerde kuyruk borusu olarak kullanılmıştır. Bu sandviçlerin en büyük avantajı, düz Honeycomb'ların aksine eğri ve 3 boyutlu olarak üretilibilmeleridir. İleriki uygulamalar, yüksek peklilik ve arttırılmış sönümlenmenin önemli olduğu türbinlerde yapısal parçalar olarak kullanılmalarıdır (Shinko Wire Co., 1998)



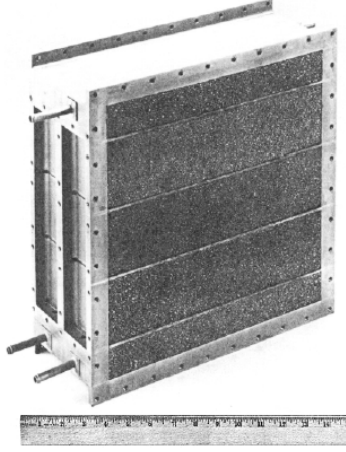
Şekil 1.4. Yerleşim alanlarına yakın otoyollar için ses izolasyonu. ALPORAS- Shinko Wire Company Ltd.



Şekil 1.5. a) Otoyol köprüsünün altında ses soğurucu astar b) Yarı küre şeklinde ses soğurucu elemanlar

Uzay teknolojisi

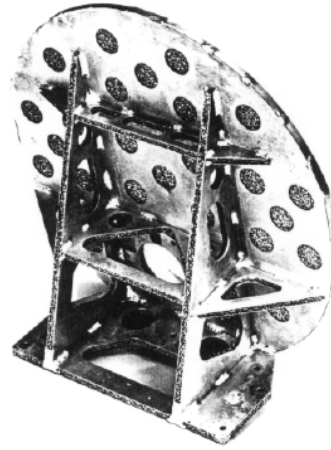
Köpük metallerin hafif yapısal durumu uzay ve otomotiv sektörleri için benzerlik gösterir. Uzay uygulamalarında, pahalı Honeycomb yapılarının köpürtülmüş alüminyum levhalar metal köpük sandviç panellerle değiştirilmesi azalan maliyetle birlikte daha yüksek performans sağlayabilir. Bir yandan darbe ve bozulma dayanımı aranırken, diğer yandan köpüklerin önemli bir avantajı, mekanik özelliklerinin izotropisi ve yapışıcı bağlamaya gerek duymadan kompozit yapılar elde edilebilmesidir (Schwartz DS v.d., 1998). Uzay teknolojisinde, uzay aracının iniş takımında çarpma etkisini azaltmak ve yük taşıyan uydularda takviye edilmek için alüminyum köpükler değer kazanmıştır. Ayrıca uzay şartlarına uymayan ve problem çıkaran parçalarla değiştirilebilirler. Gelecek uygulamalar; geliştirilmiş katılığın, arttırılmış sönümlenme ile birlikte değerli olduğu, türbinlerdeki yapısal parçaları kapsar. (Banhart, 2001).



Şekil 1.6. Uzay mekiği atmosferik kontrol sistemi için ısı değiştirgeci birimi DUOCEL alüminyum köpük
-ERG



Şekil 1.7. Hafif kompozit ayna yapımında kullanılan DUOCEL köpüğü - ERG



Şekil 1.8. Optik teleskop için güneřlik DUOCEL alüminyum köpük -ERG

Gemi yapımı

Hafif yapı gemi yapımında da önem kazanmıştır. Modern yolcu gemileri tamamen alüminyum ekstrüzyonlardan, alüminyum levhalardan alüminyum

Honeycomb'lardan yapılabilir. Levhalar köpük çekirdeklerine yüksek elastisiteye sahip poliüretan yapıştırıcılarla bağlanabilir ve pekliği oldukça yüksek, hafif ve mükemmel sönümlenme özelliğine sahip parçalar üretilebilir. Gemi yapım uygulamalarında, gemi üretimi boyunca köpük sandviç elemanlarının verimli bir şekilde birleştirilebilmesi ve uygun bağlama elemanlarının ortaya çıkarılması önemlidir (Banhart, 1998).

Demiryolu endüstrisi

Enerji soğurulması, özellikle kentsel alanlarda çalışan ve araçlarla çarpışabilme ihtimali olan tramvaylar için önemlidir. Japon trenleri, çarpma enerji soğurmasını arttırmak için metal köpük bloklarıyla donatılmıştır. Hafif yapı elemanlarının avantajları arabalarla aynıdır, fakat yolcu vagonları çok daha geniştir (Banhart, 2001).

Bina endüstrisi

Bina endüstrisinde geniş yelpazede olası uygulama alanı mevcuttur. Balkon tırabzanları gibi birçok destek elemanı alüminyum köpükten yapılabilir. Bugün kullanılan birçok materyal oldukça ağırdır ve yangına dayanıksızdır. Alüminyum köpük kullanılarak birçok problem çözülebilir. Alüminyum köpük ya da köpük paneller kullanılarak asansörlerdeki enerji sarfiyatı azaltılabilir. Modern asansörlerin yüksek hızlı olmalarından dolayı ivmelenme ve yavaşlama için hafif yapı önemlidir. Enerji sönümlenme ve katılık özelliklerinden dolayı alüminyum köpükler kullanılabilir. Alüminyumun ergime noktasının çok düşük olmasına karşın alüminyum köpükler ateş karşısında oldukça stabildirler (Giamei v.d., 1997).

Makina yapımı

Makine üretiminde metal köpüklerin bazı ilginç uygulamaları vardır. Ataleti azaltılmış ve sönümlenme özelliği artırılmış köpük dolgu kolon parçaları dingil gibi geleneksel metallere yapılan bazı parçaların yerini alabilir. Bu tarz parçalar matkap freze ve baya makinelerinde kullanılabilir. Köpük metal gövdeler elektrikli aletlerde elektromanyetik kalkan olarak kullanılabilir. Öğütme makinelerinde zararlı titreşimi

sönümlemek için kullanılabilir. Alüminyum köpükler ayrıca teleskop aynalarına destek olarak kullanılabilir (Banhart, 2001).

Spor ekipmanı

Bu sektördeki yüksek fiyatlardan dolayı yeni materyal uygulamalarına çok müsaittir. Örneğin alüminyum köpüğün iyi enerji soğurma kabiliyetinden dolayı, futbolcular için incik kemiği koruyucuları yapılabilir (Banhart, 2001).

Biomedikal endüstrisi

Titanyum ya da kobalt-kromyum alaşımları, biouyumlu oldukları için protez ve diş protezlerinde kullanılır. Metal köpük kullanılarak yoğunluk dağılımı istenen şekilde biçimlendirilebilir (Banhart, 2001).

1.3.2. Fonksiyonel uygulamalar için hücreli metaller

Filtreleme ve ayrıştırma

İki çeşit filtre vardır: katı partikülleri ya da bir sıvı içinde dağılmış olan lifleri tutan ve ayrıştıran filtreler ya da bir gaz içinde dağılan katı ya da sıvı partikülleri tutan filtreler. İlk çeşide örnek geri dönüştürülmüş polimer eriyiklerini temizlemek için, biradan mayayı çıkartmak için, kirlenmiş yağ için olan filtrelerdir. İkinci tip mazot dumanlarının filtrelenmesini ve hava yollarındaki suyun giderilmesini kapsar. Önemli filtreleme özellikleri, hassas filtreleme kapasitesi, iyi partikül tutuşu, temizlenebilirlik, mekanik özellikler, korozyon direnci ve maliyettir (Banhart, 2001).

Isı değiştirgeçleri ve soğutma makineleri

Alüminyum ve bakır bazlı oldukça iletken köpükler ısı değiştirgeçleri olarak kullanılabilirler. Bu durumda açık hücre köpükler gerekmektedir. Sıvı ve gazların köpük boyunca akmasının sağlanmasıyla beraber, köpük ısıtılarak veya soğutularak gaz

ve sıvılara ısı verilebilir ya da ısıları giderilebilir. Açık poroziteden dolayı, basınç düşüşleri minimize edilebilir. Açık hücreli malzemeler için diğer bir uygulama alanı da terleme soğutmasıdır. Bazı malzemelerin geniş yüzey alanı, düşük akış direnci ve iyi ısı iletkenliği bu tarz amaçlar için uygundur (Evans v.d., 1999).

Katalizör yatakları

Katalizörlerin verimliliği kritik bir şekilde katalizör ve tepkiyen sıvı ya da gaz arasındaki yüksek yüzey alanına bağlıdır. Katalizör çok gözenekli bir yapıda üretilmeli, bu mümkün değilse gözenekli seramik sistem gibi bir sisteme uygulanmalıdır. Seramikler yüksek süneklik ve termal iletkenliğe sahip olmalarına rağmen hücreli metallere bu malzemelerin yerine kullanılabilir (Banhart, 2001).

Sıvıların depolanması ve transferi

Gözenekli toz metalürjik malzemelerin en eski uygulamalarından biri partiküller arasındaki boşluklarda yağ depolandığında kendini yağlayabilme durumudur ve yavaşça akışı sağlanarak kullanılmış yağ değiştirilir. Uygulama yağ ile sınırlı değildir. Su yavaşça salınarak otomatik rutubet kontrolünde kullanılabilir. Parfüm depolanabilir ve yavaşça buharlaşması sağlanabilir. Gözenekli lüleler su ya da yapıştırıcıları tutabilir ya da yüzeylere dağıtabilir. Sıvının transferi kılcal olarak tek başına lüledeki ilave basınç sayesinde sağlanabilir. Son olarak, oldukça açık hücreli metalik yapılar çok düşük sıcaklık gerektiren durumlarda sabit ve uniform sıcaklıklarda sıvı depolanması için kullanılabilir. Daha da fazlası; köpük, kısmi dolu tanklardaki istenmeyen hareketleri azaltabilir (Ashby v.d., 2000).

Akışkanların akış kontrolü

Gözenekli malzemeler sıvı ve gazların akış kontrolü için kullanılabilir. Metal köpükler rüzgâr tünellerinde akış düzleyiciler ve valflarda akış dağıtıcılar olarak kullanılmaktadır (Banhart, 2001).

Susturucular

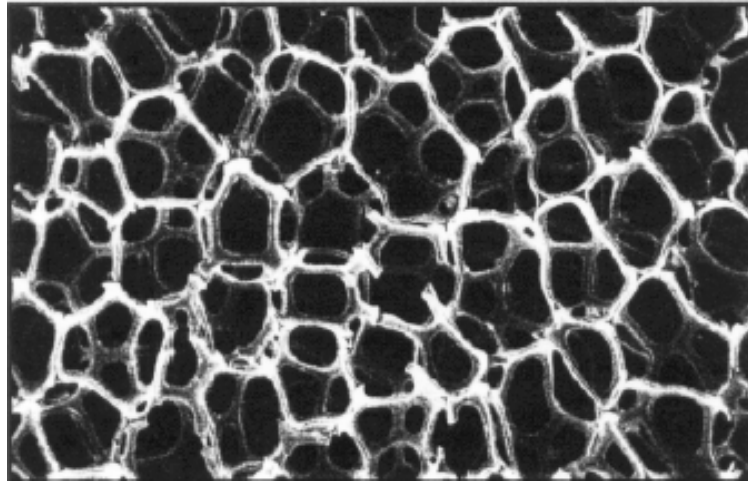
Ses, basınç çarpmaları ve mekanik titreşimleri sönümlenme parçaları genel endüstriyel uygulamalardır. Belirli açık porozite değerlerindeki malzemeler birleştirilerek seçilen bazı frekansların geçebildiği diğerlerinin geçemediği malzemeler üretilebilir. Kompresör ve pnömatik aletlerde oluşan ani basınç değişimleri gözenekli sinterlenmiş elemanlarla sönümlenebilir (Banhart, 2001).

Püskürtücüler

Bazı uygulamalarda gazın sıvı içine homojen bir şekilde ve sabit bir oranda sokulması gerekir. Böyle bir duruma örnek meşrubatların karbonatlanmasıdır. Bu işlem; sıcaklık ya da şok direnci, korozyon gibi kriterlerini sağlayan, yeterince küçük gaz kabarcıkları üretebilen gözenekli bir parça gerektirir. Gözenekli metaller gözenekli seramiklere karşı çok iyi bir çözüm olabilir (Banhart, 2001).

Pil elektrotları

Kurşun köpükler, kurşun asit pillerdeki aktif malzeme için yatak olarak kullanılabilirler ve geleneksel kurşun kafeslerin yerini alabilirler, böylece çok hafif elektrotlar üretilebilir (Banhart, 2001).



Şekil 1.9. NiCd ve NiMeH bataryalarında kullanılan pozitif elektrot nikel köpük.

Alev tutucular

Hücre duvarı malzemesi yüksek iletkenliğe sahip hücresel metaller, yanıcı gazların alev yayılmasını durdurmak için kullanılabilir. Bazı açık hücre köpük çeşitleri 550 m/s hızla ilerleyen alevleri yakalama yeteneğine sahiptir (Banhart, 2001).

Elektro kimyasal uygulamalar

Nikel köpükler elektro kimyasal reaktörlerde elektrot malzemesi olarak kullanılabilir. Filtre-pres elektrotlarında izole edilmiş metal plakalar yığını kullanılır. Tabakalar türbülans-destekleyen plastik gözenek (mesh) ve izolasyon zarıyla ayrılmıştır. Eğer bu gözenekler açık kanallı hücresel nikel tabakalarla değiştirilirse, türbülans desteği korunurken elektrot yüzeyi arttırılır. Bu şekilde reaktörler daha kompakt bir şekilde yapılabilirler (Banhart, 2001).

Su arıtma

Hücresel metalik malzemeler suyun içinde dağılan istenmeyen iyonların konsantrasyonunu azaltmak için kullanılabilir. Bu uygulamada, kirlenmiş su oldukça gözenekli yapıdaki hücresel metal boyunca akar. İyonlar hücresel yapının metal matrisiyle temas ederek redoks reaksiyonuna girerler (Banhart, 2001).

Akustik kontrol

Açık hücreli rijit bir malzemedan lens ya da prizma şekilli bir parça üretilebilirse ses dalgası kontrol aleti yapılabilir. Böylelikle ses dalgaları yönlendirilebilir (Banhart, 2001).

1.3.3. Dekorasyon ve sanat için hücrese malzemeler

Metal köpükler bilindiğinden beri, bu yeni malzemeler tasarımcıların ve sanatçıların hayal gücünü harekete geçirmiştir. Dekoratif ya da sanatsal uygulamaların temel amacı, geleneksel malzemelere göre farklı görsel ve dokunsal etkiler yaratmaktır. Altın gümüş bazlı köpükler kuyumculuk için eşsiz bir görsellik ve düşük ağırlıkta büyük bir hacim sağlayan yeni bir potansiyel malzemedir. Alüminyum köpükler göz alıcı mobilyalar, saatler, lambalar, vs. yapmak için kullanıldı. Eğer alüminyum köpük ile masalar ve sandalyeler üretilirse mekanik performans fevkalade arttırılır. Pahalı hoparlör sistemleri alüminyum köpükten yapılmıştır. Köpük sadece yüksek spesifik katılık ya da makul derecede mekanik sönümlenme sağlamakla kalmayıp geleneksel malzemelere göre daha çekici ve yüksek teknoloji görsellik sunar (Banhart, 2001).

2. METAL KÖPÜK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Metalik köpükleri üretmek için iki temel yöntem mevcuttur. Metalik eriyiklerin direk köpürtülmesi ve sıkıştırılmış tozların dolaylı yoldan köpürtülmesi, metal köpük fabrikasyonu için uygun maliyetli metotlardır. İki yöntemde de köpürtülmüş eriyiğin proses süresince stabil olması çok önemlidir (Evans v.d., 1999). Birincisi doğrudan köpürtme metodudur, burada dış bir kaynaktan gaz sürekli olarak özel olarak hazırlanmış ve içerisinde düzgün dağılmış, metal olmayan partiküller içeren, ergimiş metale köpük üretilmesi için enjekte edilir ve gaz salan bir kimyasal ajan eklenir. Dolaylı köpürtme metodu, düzgün dağılmış köpürtme ajanı ihtiva eden metal matristen oluşan katı bir prekürsör ile başlar.

Metal köpük yapımı için 9 farklı proses rotası geliştirilmiş, 5 tanesi ticari olarak uygulanmaktadır. Bunlar 4 genel sınıfa ayrılır:

- a- köpük, buhar fazından yapılır.
- b- köpük, sulu bir çözeltiden elektro depozite edilir.
- c- sıvı hal prosesine dayanır.
- d- köpük, katı halde üretilir.

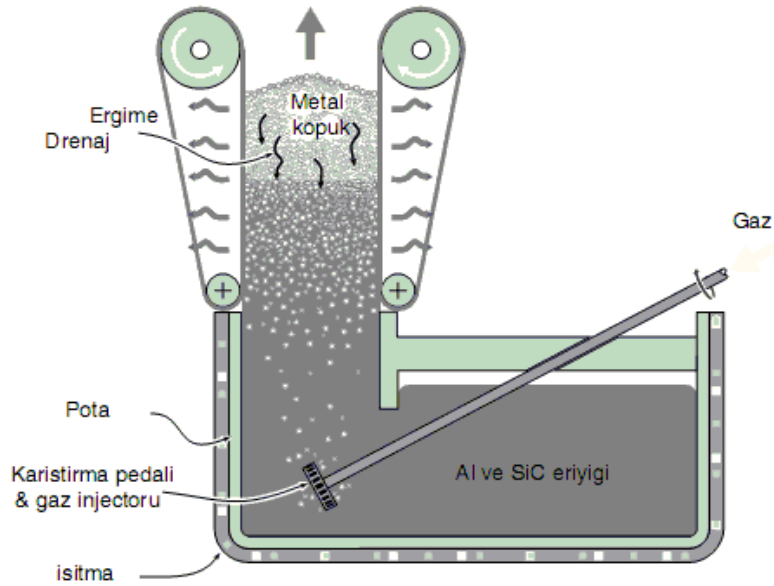
Her metot metallerin küçük bir alt kümesinde, sınırlı yelpazedeki rölatif yoğunluk ve hücre boyutlarında üretim için kullanılabilir. Açık ve kapalı hücreli köpükler üretilir. Ürünler kalite ve fiyat olarak çok farklılık gösterebilir. (Kilogramı \$7-\$12000)

Metal köpüğün özellikleri, yapıldığı metalin özelliklerine, rölatif yoğunluk ve hücre topolojisine (açık kapalı hücre, hücre boyutu) dayanır. Metal köpükler aşağıda listelenen 9 prosesten biriyle yapılır.

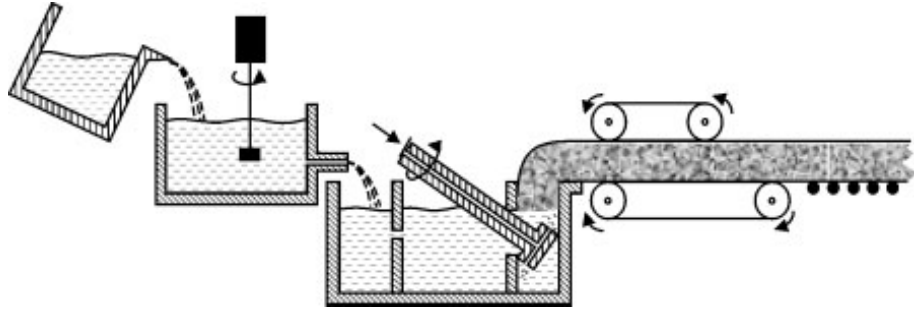
2.1. Metal Gaz Enjeksiyonu

Alüminyum oksit silisyum karbür gibi çözünmeyen ya da yavaş çözünen partiküller %10-%30 oranında eklenerek, alüminyum eriyiğın viskozitesi arttırılır. Kabarcık zarlarındaki drenaj engellenerek stabilizasyon sağlanır. Gaz enjeksiyon metodu en iyi alüminyum alaşımlarına uygulanır. Çünkü havaya ya da oksijen içeren gazlara maruz kaldıklarında fazla oksitlenmezler. Saf alüminyum ya da alaşımlarına 5-15% aralığında seramik partiküller eklenir. Bu partiküller alümina, zirkona, silisyum karbür, TiH_2 'dir. Sıvı alüminyumda kabarcık oluşturmak için karbondioksit, oksijen, inert gazlar, hatta su bile kullanılabilir. Bu prosesle oluşturulan kabarcıklar eriyiğın yüzeyine çıkarak katılaşmaya başlarlar. Köpüğün termal gradyanı, köpüğün ne kadar sıvı yarı katı halde kaldığını ve drenaj miktarını belirler.

1m genişliğinde 0.2 m kalınlığında 5-20 mm çaplarında kapalı hücre gözenekli levhalar, çeşitli tekniklerle üretilebilir. Norsk-Hydro ve Cymbat/Alcan köpükleri bu metotla yapılır. En düşük maliyetli yöntemdir ve 0.03 ten 0.1'e kadar rölatif yoğunlukta köpükler üretilebilir.



Şekil 2.1. Gaz Enjeksiyon Metodu İle Üretilen Alüminyum Köpüğün Şematik Gösterimi (CYMAT ve HYDRO Prosesleri)



Şekil 2.2. Alcan Prosesi. Düz Paneller Üretmek İçin Köpük Döküm Prosesi.

Cymbat/Alcan ve Norsk hydro prosesleri sürekli gaz enjeksiyon metodudur. 1980 sonları ve 1990'larda Alcan ve Norsk Hydro tarafından eşzamanlı fakat birbirinden bağımsız olarak geliştirilmiştir.

Bu döküm teknolojisiyle ayrıca dikdörtgen olmayan 2 boyutlu profiller ve 3 boyutlu şekiller üretmek mümkündür (Ashby v.d., 2000).

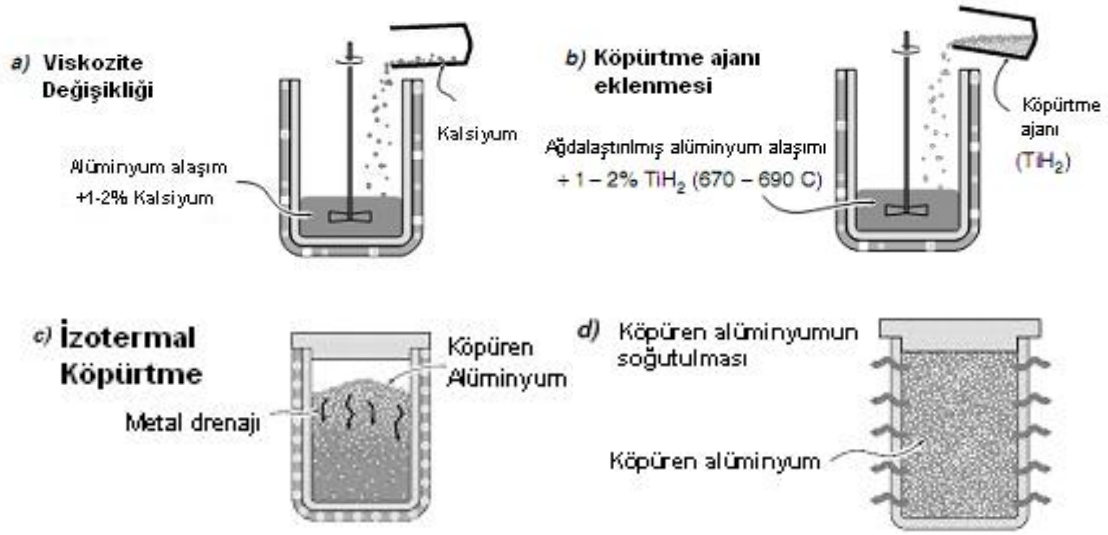


Şekil 2.3. Alcan prosesi ile Üretilmiş Paneller.

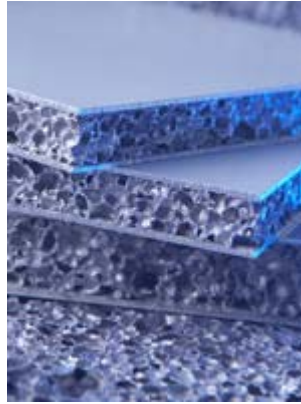
2.2. Gaz Bırakan Partiküllerin Eriyiğın İçinde Çözülmesi

Alüminyum eriyiğine TiH_2 partikülleri eklenerek, geniş hacimde hidrojen gazı hızlı bir şekilde üretilir, kapalı hücre köpük oluşturacak kabarcıklar oluşturulur, sağlanan köpük drenajı yeterince düşüktür, yüksek bir erime viskozitesi gerektirir. Bu yöntemle Shinko Wire Company, Alporas adında bir alüminyum köpük üretmiştir.

Bu proses alüminyumı ergiterek ve ergime sıcaklığı 670 ve 690 °C arasında stabilize edilerek başlar. 1-2% kalsiyum eklenerek viskozitesi artırılır, hızlıca oksitlenerek CaO ve $CaAl_2O_4$ partikülleri oluşturur.



Şekil 2.4. Eriyik İçinde Gaz Bırakan Partikül Çözünmesi İle Üretilen Alüminyum Köpüğün Proses Adımları (Alporas Prosesi)



Şekil 2.5. İki İnce Alüminyum EN AW 5754 [AlMg3] Tabakasından ve ALPORAS Alüminyum Köpük Dolgusundan Yapılmış Bir Sandviç [2].

Eriyik sürekli olarak karıştırılarak 1-2% ve 5-20 μ m çapında TiH₂ partikülleri eklenir. Partiküller eriyik içinde yayıldıklarında karıştırma durdurulur ve eriyiğin üzerinde köpük oluşumuna müsaade edilir. Proses kontrolü yüksek basıncı, sıcaklığı ve zamanı ayarlayarak sağlanır. TiH₂'yi ayrıştırmak genelde 10 dakika civarı sürer.

Pahalı kalsiyum ve TiH₂ kullanılmasından dolayı gaz enjeksiyon metodundan daha pahalıdır.

TiH₂ yüksek ergime noktalı alaşımlarda çok hızlı ayrışmasından dolayı bugün sadece alüminyum alaşımları kullanılmaktadır.

Karbonat ve nitrat gibi yüksek ayrışma sıcaklığına sahip alternatif köpük yapıcılarla yapılan araştırmalar, bu metodun demir, çelik ve nikel bazlı alaşımlarda kullanılma ihtimalini ortaya çıkarmıştır (Ashby v.d., 2000).

2.3. Yarı Katı İçinde Gaz Bırakan Partikül Çözülmesi

Köpük yapıcılar metale katı halde karıştırılarak ve toz takviye edilerek katılabilir. Yaygın olarak kullanılan TiH₂ 465 °C'de çözünmeye başlar ve bu sıcaklık saf alüminyumun (660 °C) ve alaşımlarının ergime sıcaklığından düşüktür. Böylece köpük yapıcının toz metalürji prosesleri kullanılarak katı alüminyum içinde yayılması ve sıcaklığın yeterli bir şekilde arttırılarak, eriyiğin bir bölümünde ya da tamamında gaz çözündürülerek, kabarcık büyümesi sağlanabilir.

Özellikle Bremen'deki IFAM, Avusturya Randshofen'deki LKR ve Avusturya Marktl'deki Neuman-Alu bu yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Köpük yapıcı partiküller, toz alüminyum alaşım ile birleştirilir. Bileşenler tam olarak karıştırıldıktan sonra, tozun soğuk ekstrüzyonu yoluyla çubuk ya da levhalar oluşturulur, prekürsör materyali elde edilir.

Prekursör küçük parçalara dilimlenerek kapalı kalıba konur ve alaşımın katılık sıcaklığının biraz üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısıtılır. TiH_2 ayrışarak yüksek iç basınçlı boşluklar oluşturur. Bunlar yarı-katı akışla genişler, alüminyum kabarıp ve kalıbı dolduran köpüğü oluşturur. Proses 0.08 gibi düşük rölatif yoğunluklu ve kalıbın şeklindeki köpük oluşumuyla sonuçlanır. Köpük kapalı hücrelidir, çaplar 1-5 mm arasında değişir.

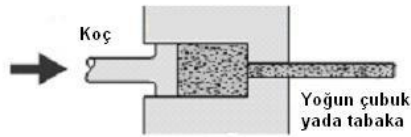
a) Malzeme Seçimi



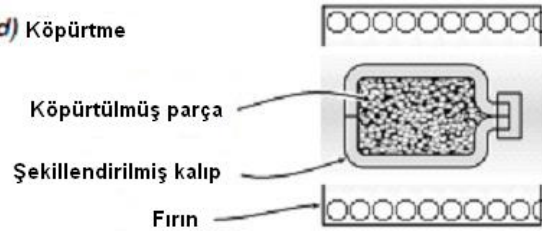
c) Şekillendirilmiş kalıp



b) Sağlamlaştırma & Haddelene



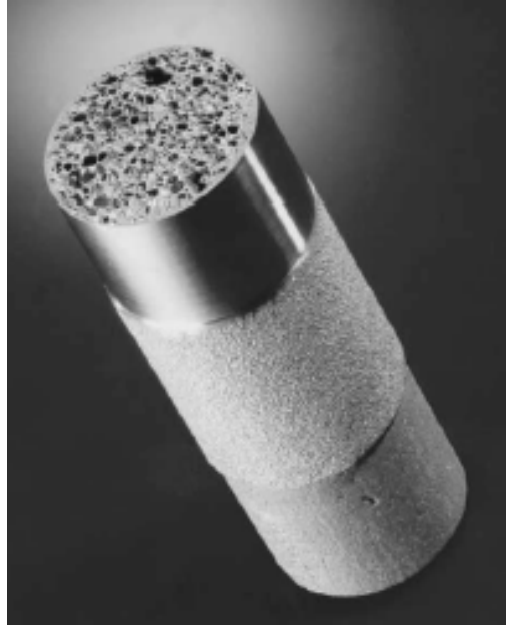
d) Köpürtme



Şekil 2.8. Yarı-Katı Halde Gaz Bırakan Partiküller Vasıtasıyla Üretilen Metal Köpüklerin Toz Metalurjisi Adımları (Fraunhofer ve Alulight Prosesleri)



Şekil 2.6. Alüminyum Köpük Panel. Alman yedek parça firması Wilhelm Karmann ve Berlin'deki Fraunhofer Enstitüsü'nün geliştirdiği alüminyum köpük sandviç parçalardan biri. İki alüminyum tabaka arasında köpüklenmiş alüminyum göbekten oluşan düz bir sandviç panel. Bu teknolojiye herhangi bir katkı kullanmaksızın daha karmaşık şekiller de üretmek mümkündür.

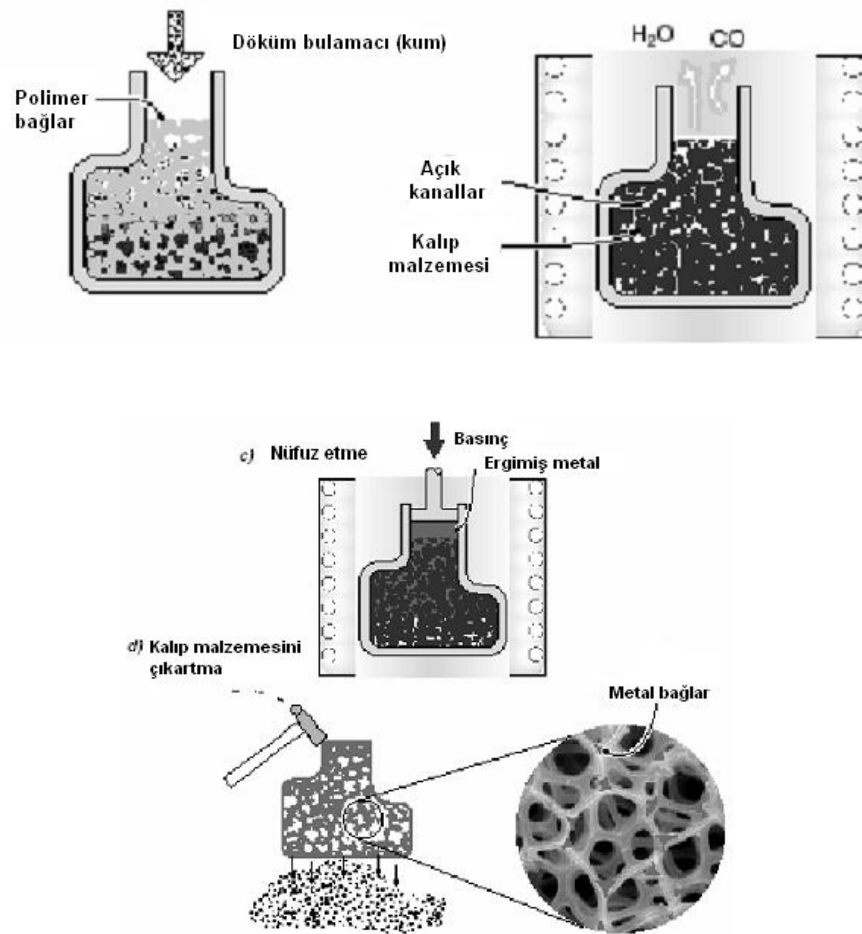


Şekil 2.7. Alüminyum kaplanmış alüminyum köpük

IFAM yapısal kullanımda potansiyel oluşturabilecek yeni bir proses geliştirmiştir. Bu yaklaşımla sandviç yapıları üretilmiştir. Şu an ticari olarak sadece alüminyum kullanılmaktadır. Farklı köpük yapıları kullanılarak diğer köpük alaşımları geliştirilmektedir (Ashby v.d., 2000).

2.4. Polimer Ya da Balmumu Prekursörünü Master Olarak Kullanarak Yapılan Döküm

Birçok malzemedan, çok iyi üniformluk derecesinde ve geniş hücre boyut aralıklarında, düşük rölatif yoğunluğa sahip açık hücre polimer köpükler üretilebilir. Bunlar yatırım amaçlı döküm kalıpları için master olarak kullanılabilir ve birçok metal ve alaşımları ile döküm yapılabilir. ERG DUACEL köpüklerin bu yolla yapıldıkları düşünülmektedir.



Şekil 2.9. Açık Hücre Köpükler Üretmek İçin Kullanılan Hassas Döküm Metodu (DUOCEL Prosesi)

Sıvı metal yerine toz metal bulamaçları da kullanılabilir. Bunlar sonradan sinterlenir. 0.05 gibi düşük rölatif yoğunluğa ve gözenek boyutları 1-5mm aralığında açık hücre köpükler üretilebilir.

Bu proses hemen her metalden döküm yoluyla köpük üretmek için kullanılabilir. Bu prosesin bir başka çeşidinde, prekürsör yapısı, enjeksiyon yoluyla kalıplanmış polimer ya da balmumu kafeslerinden elde edilir. Kafes yapı döküm bulamacıyla kaplanır ve yakılır, geriye kalıbın negatif kopyası kalır.

Metal, geleneksel döküm teknikleri kullanılarak ve basınçlı döküm yöntemleriyle kalıplanır (Ashby v.d., 2000).

2.5. Hücresel Preformlar Üzerine Metal Kaplanması

Açık hücre polimer köpükler, üzerlerine metal çöktürülmesi ile master olarak kullanılabilirler. INCO Prosesinde nikel, nikel karbonilin $Ni(CO_4)$ ayrıştırılarak bırakılır.

Gaz $100^{\circ}C$ civarında nikel ve karbon monoksit ayrışarak, reaktörün içindeki bütün ısıtılmış yüzeyi kaplar. Sadece polimer köpüğü ısıtmak için kızıl ötesi ya da RF ısıtması kullanılabilir.

Onlarca mikrometre metal çöktürüldükten sonra metal kaplanmış polimer köpük CVD reaktöründen çıkarılarak havada ısıtılarak yakılır. Bu oyuk kırıli hücresel metal yapıyla sonuçlanır.

Kirişleri yoğunlaştırmak için sonradan sinterleme adımı kullanılır. Nikel karbonil oldukça toksiktir ve nikel köpükler üretilmeden önce oldukça yüksek maliyetli çevresel kontroller gerektirir. Birleşmiş milletler ve bazı diğer ülkeler kullanımını yasaklamış ve bazı ülkeler de nikel karbonil gazıyla yapılan endüstriyel prosesleri oldukça pahalı bir hale getirmişlerdir.

Gözenek boyutları oldukça geniş bir yelpazede değişir. 100-300 μm çapında açık hücre köpükler elde edilebilir.

Bu metot nikel ya da titanyum gibi saf elementlerle sınırlandırılmıştır, çünkü alaşımların kimyasal buhar çökmesi (CVD) ya da elektro çökmesi zordur.

Günümüzün en düşük rölatif yoğunluklu (0.02-0.05) köpükleri bu metotla elde edilebilir (Ashby v.d., 2000).

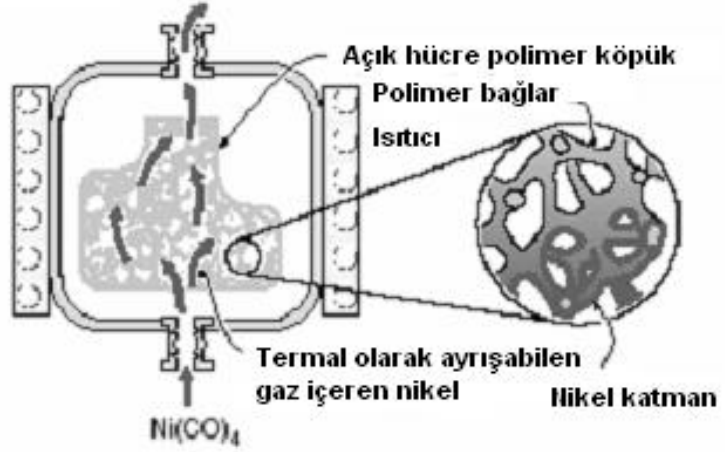
2.6. Hapsedilmiş Gaz Genişlemesi

Argon gibi inert gazların metaller içinde çözünülebilirlikleri oldukça düşüktür. Yüksek basınçta inert gaz ihtiva eden küçük gözenekli yapıya sahip malzemeler üretmek için toz metalürjisi teknikleri geliştirilmiştir.

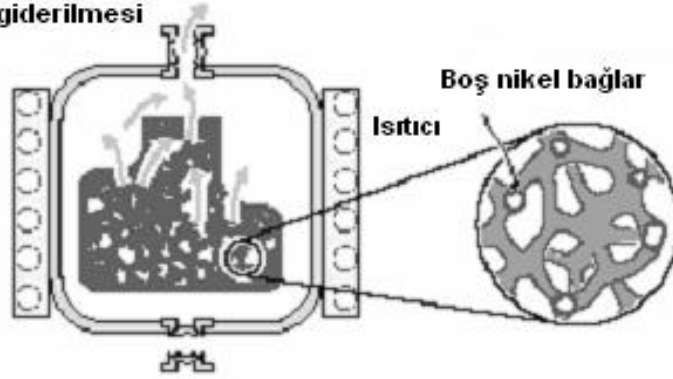
Bu malzemeler sonradan ısıtıldıklarında gözenek basıncı artar ve çevreleyen metalin sürünmesiyle gözenekler genişler.

Bu proses Boeing tarafından %50 gözenekli yapıya sahip, düşük yoğunluklu gözenekli Ti-6Al-4V sandviç paneller üretmek için kullanılmıştır (Ashby v.d., 2000).

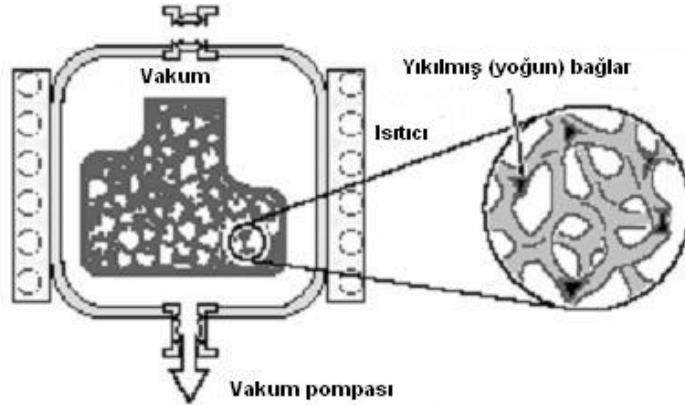
a) Nikelin buhar tortulanması



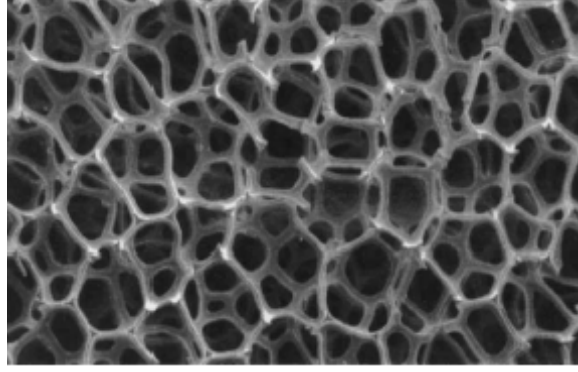
b) Polimerin giderilmesi



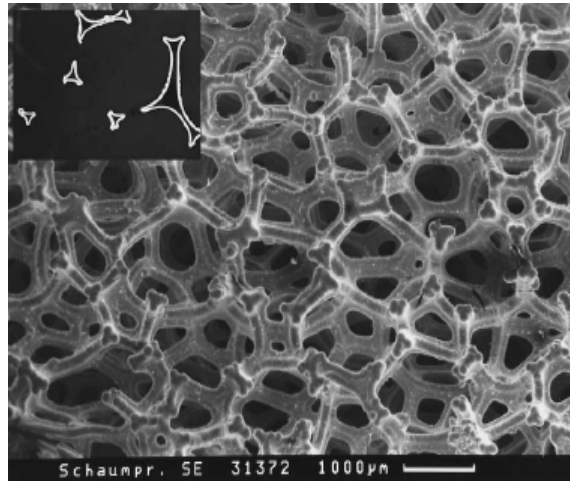
c) Kattlaştırma
(Bağ yoğunlaştırma)



Şekil 2.10. CVD Prosesi ile Üretilen Açık Hücre Nikel Köpüklerin Şematik Gösterimi (INCO Prosesi)



Şekil 2.11. Nikel karbonil prosesiyle üretilen Incofoam numunesi



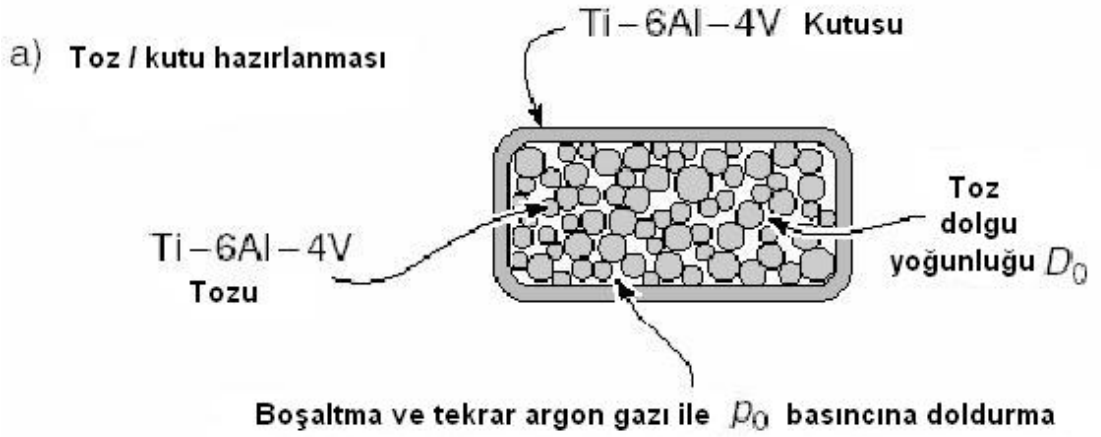
Şekil 2.12. Elektro Çökme ile Üretilen Nikel Köpük.

2.7. Boş Küre Yapılar

Bu metotla gözenekli nikel alaşımları ve 0.06 rölatif yoğunluklu Ti-6Al-4V üretilir.

Gözenek kontrollü toz püskürtme tekniklerinin geliştirilmesi, bu metotla düşük yoğunluklu alaşımların ekonomik olarak fabrikasyonlarını sağlayabilir.

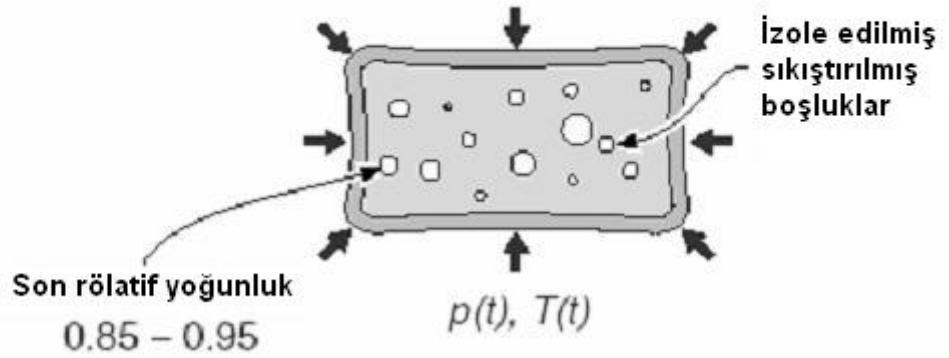
Alternatif bir metotta, TiH_2 gibi ayrışabilen prekürsörlerin bulamacından, organik bağlayıcı ve çözücülerle birlikte, boş küreler elde edilebilir.



Şekil 2.13. Toz / Kutu Hazırlanması

Bu proseste toz aynı alaşımdan yapılmış bir teneke kutuya konur. Tenekenin içindeki tüm oksijen tahliye edilir ve 3-5 atmosfer (0.3-0.5Mpa) basıncında argonla doldurulur.

b) HIP Sertleşmesi
(900°C, 100 – 200 MPa, 2 Saat)

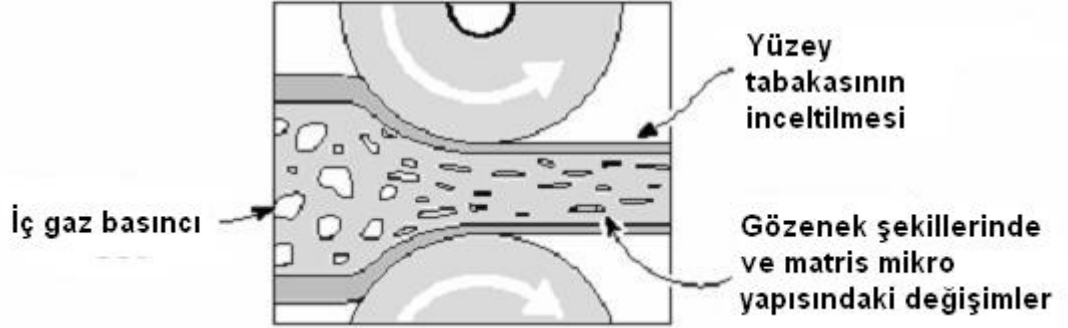


Şekil 2.14. Sıcak İzostatik Pres (HIP) Sertleşmesi

Teneke kapatılır ve Sıcak İzostatik Preslenerek (0.9-0.98) rölatif yoğunluğa ulaşılır, gözenek basıncında artışa neden olur. Bu Ti-6Al-4V'nin oda sıcaklığında genişlemesi için çok düşüktür. Takviye edilmiş numunedeki gözenek sayısı nispeten düşüktür.

c) Sıcak haddeleme

(yaklaşık 930°C , havada 6 - 40 geçiş)

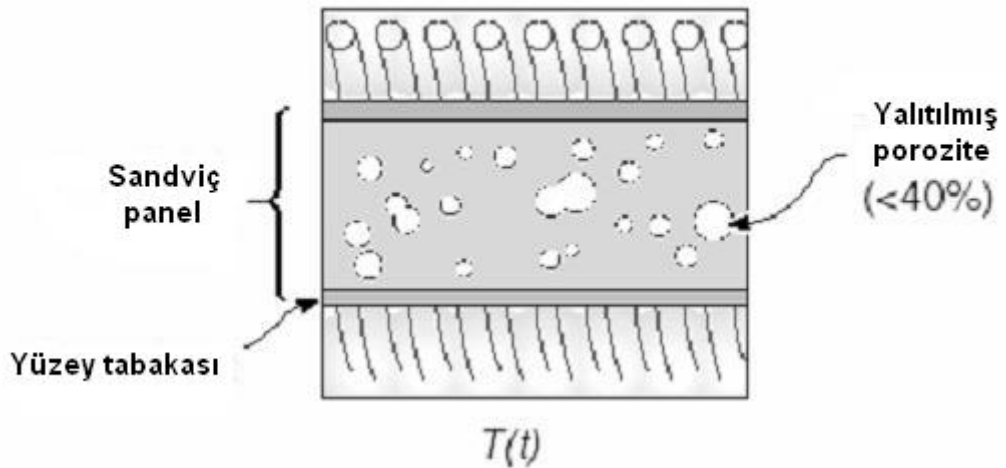


Şekil 2.15. Sıcak Haddeleme

Yapıyı rafine etmek ve küçük gözeneklerin daha düzgün dağılımını sağlamak için haddeleme adımı eklenmiştir. Titanyum alaşımlarında $900-940^{\circ}\text{C}$ de haddeleme, boşlukların haddeleme yönünde düzleşme ve uzamasıyla sonuçlanır.

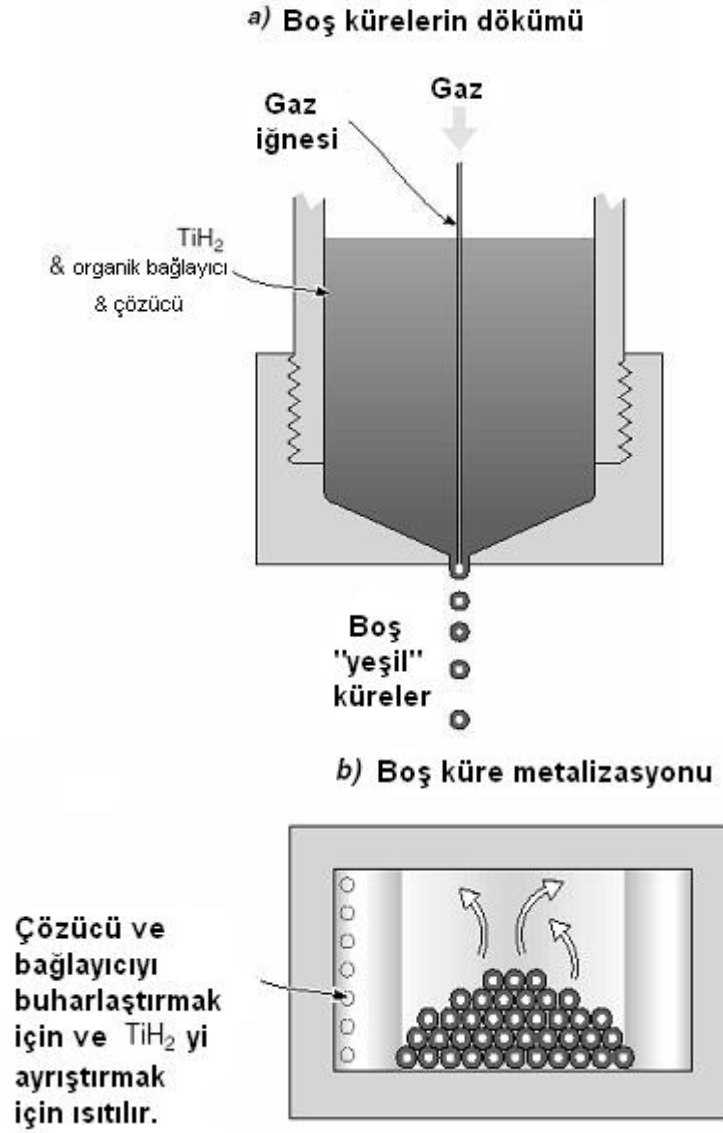
d) Genleşme ısıtma işlemi

(900°C , 4 – 48 saat)



Şekil 2.16. Prosesin son adımı, 20-30 saat boyunca 900°C 'ye ısıtarak genleştirmektir.

Bu proses, 0.5 boşluk oranı ve $100-300\mu\text{m}$ boyutunda gözenekli, titanyum alaşım sandviç yapı oluşumuyla sonuçlanır. İnert gaz maliyeti düşüktür. Titanyumun Sıcak İzostatik Preslenmesi ve sıcak haddelenmesi pahalı olabilir (Ashby v.d., 2000).



Şekil 2.17. Açık Hücre Nikel Köpükler Üretmek İçin CVD Prosesini Şematik Gösterimi (INCO Prosesi)

Georgia Tech'de geliştirilen bu yaklaşım birçok materyale uygulanabilir ve hidrürlerle sınırlı değildir.

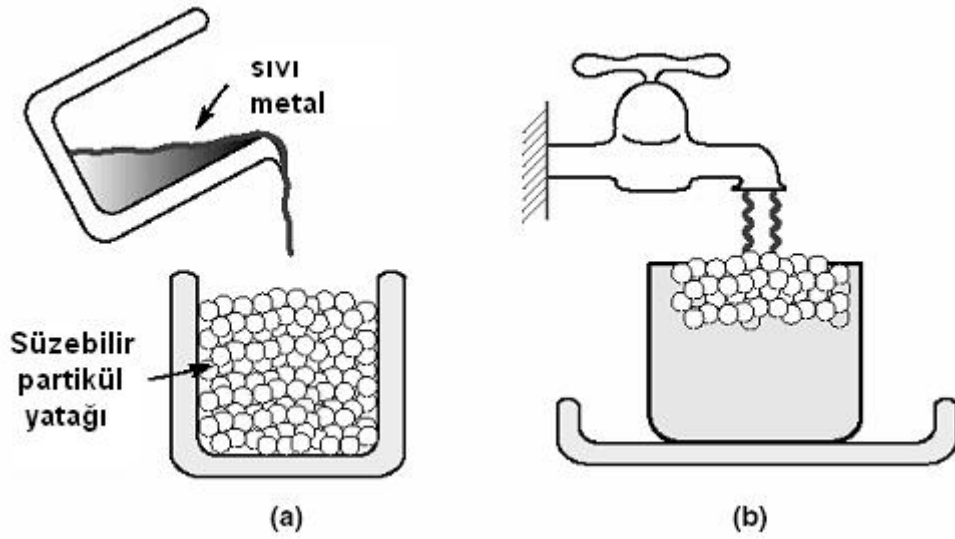
Örneğin $F_2O_3 + Cr_2O_3$ indirgenerek paslanmaz çelik üretilebilir.

IFAM Bremen'de geliştirilen başka bir metotla polistiren küreler metal bulamacıyla kaplanarak ve sinterlenerek, yüksek düzgünlükte boş metal küreler elde edilebilir.

0.05 gibi düşük rölatif yoğunluklar mümkündür. Gözenek boyutu 100 μ m den milimetrelere kadar olabilir (Ashby v.d., 2000).

2.8. Bir Tanesi Eriyebilen İki Malzemenin Yeniden Sıkıştırılarak Dökülmesi

İki toz, ikisi de hacimsel olarak %25'in altında olmamak suretiyle karıştırılır ve sıkıştırılır. Takviyeden sonra bir toz (örneğin tuz) uygun bir çözücüde filtrelendir.



Şekil 2.18. a) Sıvı Bir Metal (Alüminyum Ya da Bir alüminyum Alaşımı) Tarafından Nüfuz Edilen Eriyebilir Partiküllerin (Tuz gibi)Yatağı b) Partiküller Uygun Bir Çözücüde (Su gibi) Çözünerek Açık Hücre Köpük Oluştururlar

Alüminyum alaşımların toz karışımları bazlı köpükler, sodyum klorür ile geniş kesitlerde ve düzgün bir yapıda yapılabilir.

Pratikte bu metotla 0.3-0.5 rölatif yoğunlukta malzemeler üretilebilir. Hücre boyutunu, toz partikül boyutu belirler ve 10 μ m ile 10mm arasında değişir.

Alternatif fakat buna çok benzer bir proseste, filtrelenebilir materyal partiküllerine, basınç altında sıvı metal emdirilir ve soğumaya bırakılır. Partiküllerin yeniden filtrelenmesi, çok iyi düzgünlükte gözenekli metal yapı ortaya çıkarır (Ashby v.d., 2000).

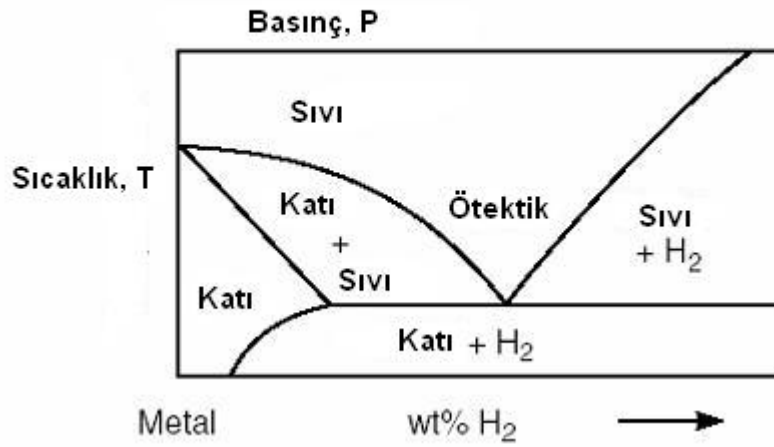
2.9. Gaz-Metal Ötektik Katılaştırma

Birçok metal alaşımı, ikili hidrojen faz diyagramlarında ötektik olduğunu ortaya koyar. Bunlar; Al-,Be-,Ce-,Cu-,Fe-,Mg-,Mn-, ve Ni- alaşımlarını kapsar.

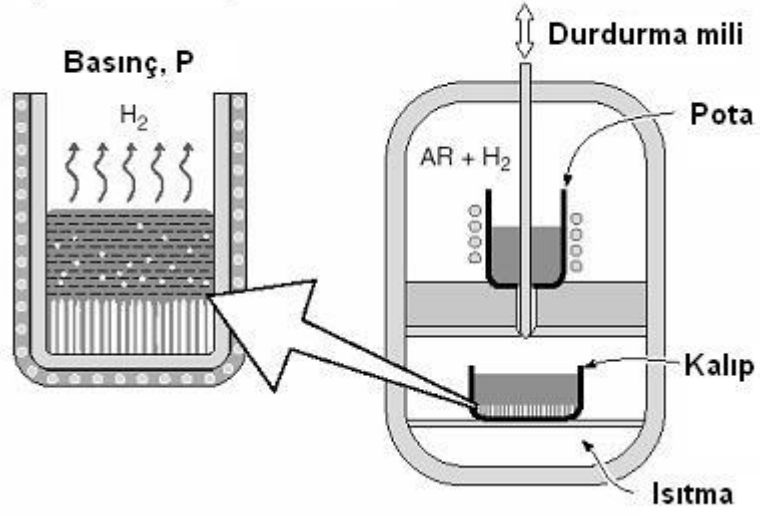
Bu alaşımlar ergitilir ve basınç altında hidrojenle doyurulur, yönlendirilmiş katılaştırmadan sonra basınç düşürülür. Katılaştırma sırasında, katı metal ve hidrojen ötektik gaz reaksiyonu ile eşzamanlı olarak oluşur; hidrojen dolu gözenekleri olan gözenekli bir yapı oluşturur.

Bu materyaller GASAR olarak bilinir. %30 gözenek hacminde objeler elde edilir. Gözenek yapısının kontrol ve optimizasyonu zordur. Bu yöntemle üretilen malzemeler pahalıdır (Ashby v.d., 2000).

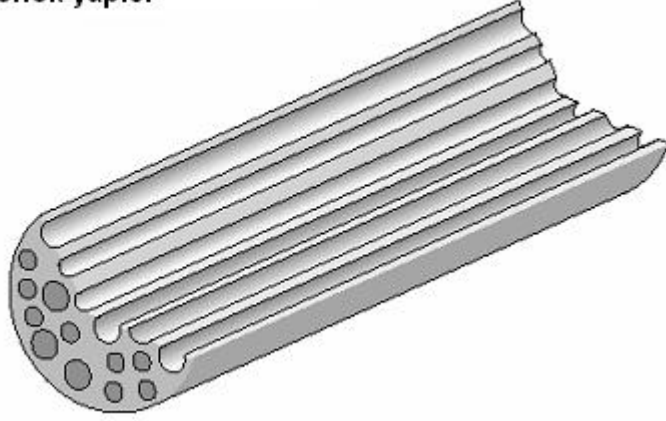
a) Metal - hidrojen ikili faz diyagramı



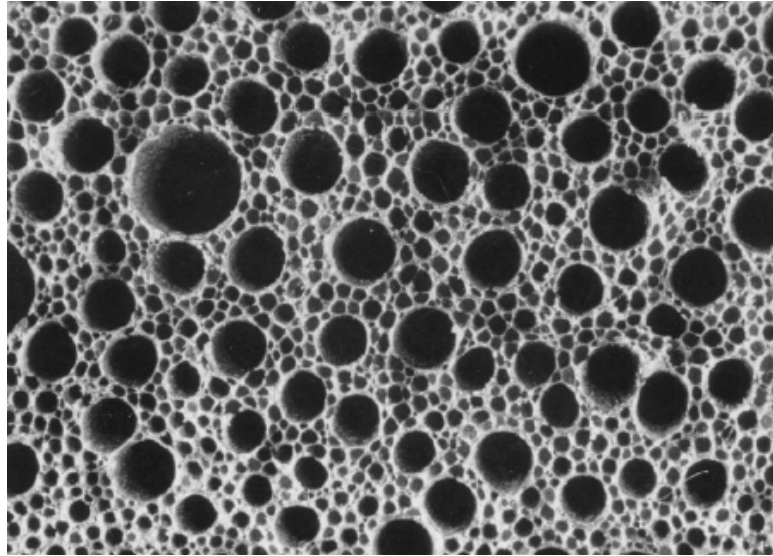
b) Yönlü katılaştırma



c) Son gözenek yapısı



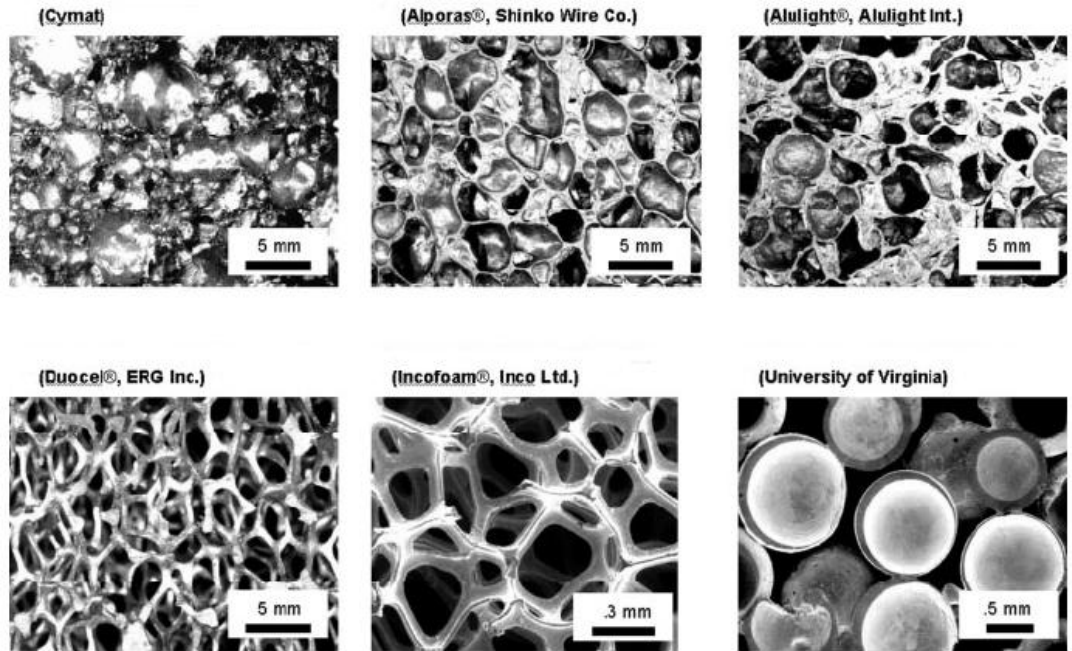
Şekil 2.19. GASAR'ların Üretimi İçin Gaz Metal Ötektik Katılaşması



Şekil 2.20. GASAR'ın gözenek yapısı

Tablo 2.1. Ticari Metalik Köpük Malzemelerin Bazı Özellikleri.

Özellikler	Cymat	Alulight	Alporas	ERG	Inco
Malzeme	Al - SiC	Al	Al	Al	Ni
İzafi yoğunluk, ρ / ρ_0	0.02 - 0.2	0.1 - 0.35	0.08 - 0.1	0.05 - 0.1	0.03 - 0.04
Yapı	Kapalı Hücre	Kapalı Hücre	Kapalı Hücre	Açık Hücre	Açık Hücre
Young Modülü $E [MPa]$	0.02 - 2.0	1.7 - 12	0.4 - 1.0	0.06 - 0.3	0.4 - 1
Poisson Oranı, ν	0.31 - 0.34	0.31 - 0.35	0.31 - 0.36	0.31 - 0.37	0.31 - 0.38
Basma Mukavemeti $\sigma_c [MPa]$	0.04 - 7.0	1.9 - 14.0	1.3 - 1.7	0.9 - 3.0	0.6 - 1.1
Çekme Mukavemeti $\sigma_t [MPa]$	0.05 - 8.5	2.2 - 30	1.6 - 1.9	1.9 - 3.5	1.0 - 2.4
Kırılma Tokluğu $K_{IC} [MPa.m^{1/2}]$	0.03 - 0.5	0.3 - 1.6	0.1 - 0.9	0.1 - 0.2	0.6 - 1.0
Isıl İletkenliği $q [W / m.K]$	0.3 - 10	3.0 - 35	3.5 - 4.5	6.0 - 11	0.2 - 0.3



Şekil 2.21. Farklı Üretim Yöntemleriyle Üretilen Hüresel Metallerin Topoloji Örnekleri (Haydn , 2002)

3. HÜCRESEL METALLERİN KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

Hücresel metaller birçok yöntemle karakterize edilir. Amaç hücresel metal hakkında mekanik ve fiziksel veri karakteristikleri elde etmektir. Köpüğün tersinmez bir şekilde deforme olmasıyla alakalı olarak, tahribatsız ve tahribatlı olmak üzere iki genel muayene metodu mevcuttur (Banhart, 2001).

3.1. Tahribatsız Muayene

3.1.1. Yoğunluk ölçümleri

Gözenekli bir malzemenin yoğunluğu malzemeyi tartarak ve belirli bir yoğunluğa sahip sıvı içerisindeki yüzebilirliği Arşimet prensibi ile ölçülerek belirlenebilir. Eğer karakterize edilecek numunenin dış yüzeyi kapalı değil ise, sıvı nüfuz etmesini engellemek için dış yüzey, polimer film tabaka ile kaplanmalıdır (Banhart, 2001).

3.1.2. Boya nüfuz ettirme ölçümleri

Kapalı hücre köpüklerin yüzeyinde kırıklar ya da çatlaklar oluşabilir. Nüfuz ettirme teknikleri bu tarz kusurları bulmak için idealdir (Bray, 1997). Sıvı kimyasal incelenecek köpüğe uygulanır. Kimyasal delikler ve çatlaklar tarafından emilir. Yüzey temizlendikten sonra, kimyasal maddenin tutulduğu yerlerde renk değiştiren renklendirici ilaç uygulanır. Böylece kusur oluşan bölgeler görsel olarak incelenebilir (Degischer v.d,1999).

3.1.3. X-Işın radyoskopi ve radyografisi

Hücresel metaller basit X-ışını soğurma teknikleri ile incelenebilir. 4-10mm kalınlıktaki köpüklerin gelişimi gerçek zamanlı olarak senkrotron radyoskopisi ile incelenebilir (Banhart, 2001).

3.1.4. X-Işını ölçümlü tomografi

X-Işını Ölçümlü Tomografi ile 3 boyutlu yoğunluk dağılımları incelenebilir. Genellikle kaynak ve detektörü numune etrafında döndürerek, numunelerin X-Işını suretleri çok yönlü olarak alınabilir. Objenin herhangi bir yerinde ışınların zayıflaması ile elde edilen suretler vasıtasıyla lokal yoğunluklar matematiksel olarak belirlenmeye çalışılır (Banhart, 2001).

3.1.5. Girdap akım algılama

Köpükler; çoklu frekans elektriksel empedans ölçümleri yapılarak, rölatif yoğunluk ve hücre boyutlarıyla karakterize edilir. Girdap akımları sadece bazı geometrik faktörlere ve frekansa bağlı değildir, köpük özelliklerine de bağlıdır. Gözenekliliğin çıkış sinyalinde belirgin bir etkisi olduğu gösterilebilir. Bu metot, uygun kalibrasyondan sonra numunenin lokal yoğunluk ve diğer gözenek özelliklerinin ölçümü için kullanılabilir (Banhart, 2001).

3.1.6. Akustik ölçümler

Gözenekli ortamların ses emme özellikleri genellikle çabuk ve kesin ölçüm sağlayan bir empedans tüpünde yapılır (Banhart, 2001).

3.1.7. Titreşimsel analiz

Malzemelerin Young modülü ve kayıp faktörü titreşimsel analizle belirlenebilir. En basit teknik, uzun dikdörtgensel dairesel kesitli ya da ince dörtgensel tabaka olarak üretilen malzemenin titreşime zorlanmasıdır (Banhart, 2001).

3.1.8. Gözeneklilik ve geçirgenlik

Açık hücre metalik malzemelerin iç yapılarıyla ilgili, spesifik yüzey alanı, hücre boyut dağılımı ve kanal boyut dağılımı gibi parametrelerin hesaplanması önemlidir.

Bunun için cıva gözenekliliği, gaz emme teknikleri, geçirgenlik gibi bir takım teknikler kullanılmaktadır (Banhart, 2001).

3.1.9. Elektriksel ve ısı iletim ölçümleri

Alüminyum Köpükler için ortalama 2mm çapında gözenekler, 200 mm² kesitli ve 200 mm uzunlukta dikdörtgensel numuneler kullanılır. Ölçümler köpüğe kenetlenmiş bakır plaklarla yapılır (Banhart, 2001).

3.1.10. Diğer metotlar

X-ışını ve nötron küçük açı yayma, dalga yayma spektrometresi, ultra ses sureti gibi yöntemlerle hücrel metaller karakterize edilebilir (Banhart, 2001).

3.2. Tahribatlı Muayene

3.2.1. Optik suret analizi

Hücrel metallerin hücre morfolojisi ve mikro yapıları çeşitli büyütmelemlerle optik gözlemlerle analiz edilebilir. Gerçek analiz tahribatsız olmakla birlikte numune hazırlanması için genellikle kesme, gömme parlatma gibi işlemler gerektiği için pratikte tahribatlı muayene yöntemidir (Banhart, 2001).

3.2.2. Mekanik testler

Hücrel metallerin herhangi bir yapısal uygulaması için mekanik testlerin yapılması ilk koşuldur. Çeşitli mekanik testler şu şekilde sınıflandırılabilir:

Uygulana gerilim çeşidi: Tek eksenli, çift eksenli, çok eksenli, hidrostatik.

Yükleme modu: Sıkıştırma, gerilme, kesme, eğilme, burulma

Yükün zamana bağlılığı: Sabit, yavaşça artan, dinamik, dairesel

3.2.3. Korozyon testi

HücreseI metaller için mevcut korozyon test standardı yoktur. Genellikle otomotiv parçaları ile ilgili test standartları oluşturulmaktadır (Banhart, 2001).

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Simančık ve arkadaşlarının 2001 yılındaki çalışmasında, ortam atmosferinin köpürtme süresince alüminyum köpüğün yüzey oksidasyonunu azalttığı, bu suretle elde edilebilir maksimum porozite ve gözenek boyutunun etkilendiği belirlenmiştir. Etkiler, dört alüminyum alaşımıyla, oksitlenme, koruma ve alındığı atmosfer kullanılarak, değişik ısıtma oranları ve basınçlarda incelenmiştir. Oksijen eğilimli alüminyum alaşımlarının (genellikle magnezyum içeren alaşımlar) oksidasyondan korunmadıkları durumlarda ısıtma oranlarına oldukça duyarlı oldukları gözlenmiştir. Yüzey oksidasyonunun, nihai poroziteyi oldukça azalttığı ve hatta köpürebilir prekürsörün genişlemesine engel olduğu, Rölatif köpürme basıncını arttırmanın ve/veya köpürtme oranını arttırmanın bu etkiyi ortadan kaldırdığı belirtilmiştir..

Kennedy'nin 2002 yılındaki çalışmasında, TiH_2 tozlarına ısıl işlem uygulanmış ve köpürebilen prekürsörler elde etmek için saf Al tozuyla beraber sıkıştırılmıştır. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi, hidrojenin normalde $495^{\circ}C$ 'de salındığını göstermiştir ve havada ısıl işlem uygulanmasının, hidrojen oluşumunu daha yüksek sıcaklıklara ertelediği görülmüştür. Isıl işlem yine de saf alüminyum prekürsör erimeden gaz salınmasını engelleyememiştir.

Feng'in 2003 yılındaki çalışmasında, toz metalürji teknikleri uygulanarak kapalı hücre alüminyum köpükler üretilmiştir. Metal tozları ve köpürtme ajanı (TiH_2 tozu) karıştırılmıştır. Köpüğün özelliklerini etkileyen, hücre çapı, sınır kalınlığı, sınır uzunluğu gibi geometrik parametreler incelenmiş ve hücre çapının, köpüğün elektrik iletkenliğinde ihmal edilebilir bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Babcsan ve arkadaşlarının 2003 yılındaki çalışmasında, alüminyum eriyiği olan LKR-Avusturya'nın köpürtülmesi incelenmiştir. Köpürtme, köpüğü sıvı halde tutmak için, adyabatik şartlardaki bir fırında yapılmıştır. Köpükler 1, 10 ve 100 dakikalık izotermal bekleme sürelerinden sonra fırından çıkarılarak havada ve suda soğutulmuştur. Son gözenekli yapı şu parametrelere dayanır: Partikül (düzen, şekil ve boyut, % hacim), gaz (düzen ve saflık), partikül-yüzey etkileşimleri, matris alaşım düzeni ve köpürme sıcaklığı.

Elbir ve arkadaşlarının 2003 yılındaki çalışmasında, hacimsel olarak 8.6% SiC partikül takviyeli, TiH₂ ihtiva eden alüminyum kompozitin köpürme davranışı önceden ısıtılmış bir fırında ergime sıcaklığının (750⁰C) üzerinde ısıtılarak araştırılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için sıkıştırılmış alüminyum tozları aynı şekilde hazırlanmış ve köpürtülmüştür. SiC partikül katılmasının lineer genişlemeyi arttırdığı, sıvı metal drenaj miktarını azalttığı gözlemlenmiştir. Kompozit köpük numuneleri ayrıca daha yüksek sıkıştırma gerilimleri göstermiş, fakat alüminyum köpüklere kıyasla daha kırılğan bir davranış sergilemişlerdir.

Deqing ve arkadaşlarının 2003 yılındaki çalışmasında, alüminyum alaşım eriyiği hava ile köpürtme prosesi, SiC ve Al₂O₃ partiküllerinin alüminyum köpüğün hücre boyutları ve duvar kalınlığı üzerine etkisini incelemeye yönlendirmiştir. Seramik partiküllerin boyut ve konsantrasyonunun etkileri çeşitli köpürtme sıcaklıkları ve hava akış oranlarında incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, sabit köpürtme sıcaklıklarında, SiC ve Al₂O₃ partikül boyut ve konsantrasyonunun artmasıyla hücre boyutu ve duvar kalınlığı artmakta ve artan köpürtme sıcaklıklarında hücre duvar kalınlığı azalmaktadır. Artan köpürtme sıcaklıklarında ve gaz akış oranları hücre boyutunu arttırmakta ve hücre duvar kalınlığını azaltmaktadır. Daha geniş partikül boyutu, daha geniş hücre boyutuna ve daha kalın duvarlara neden olmaktadır.

Rabiei ve arkadaşlarının 2005 yılındaki çalışmasında, yeni bir kapalı hücre metal köpük doğal döküm teknikleri kullanılarak geliştirilmiştir. Köpük, rasgele yoğunluk aranjmanıya oluşturulmuş boş çelik kürelerden oluşur, küreler arasındaki boşluk alüminyum dökülmesiyle doldurulur. Malzemenin ölçülen yoğunluğu 2,4 g/cm³'tür, rölatif yoğunluk 41,5%'tur. Bu çalışmada geliştirilen kompozit köpük, üstün basma dayanımı ve enerji soğurma kapasitesine sahiptir. Yeni malzeme uzay, otomotiv ve biomedikal endüstrilerinde gelecek vaat eden uygulama alanlarına sahiptir.

Matijasevic'in 2006 yılındaki çalışmasında, sıcaklık uyumsuzluğunu minimize etmek için; alaşım tekrar alaşımlandırılarak ergime sıcaklığı düşürülebilir ya da köpük yapıcının ayrışma eşiği termal ön işlemlerle yükseltilebilir. Eğer TiH₂ havada önceden ısıtılırsa, partiküllerin yüzeyinde bir oksit tabakası oluşturulur. Bu tabaka partiküllerden gaz salınmasını geciktirir, böylece ideal bir şekilde alaşımını ergime sıcaklığına

ulaşıldıktan sonra, köpürtme sırasında hidrojen salınmış olur. Diğer taraftan ön işlemler hidrojen kayıplarına yol açarak, köpürtme gücünü azaltır. Burada görev yeterince kalın oksit tabakasını, minimum hidrojen kaybıyla sağlamaktır. Gaz gelişimini geliştirme mekanizması tam olarak bilinmemekle birlikte, parametreler genel olarak deneysel yollarla bulunur.

Vendra ve arkadaşlarının 2007 yılındaki çalışmasında, gelişmiş gözenekli malzemeler sınıfına ait bir metal kompozit köpük malzeme, ilk olarak Kuzey Karolayna Eyalet Üniversitesi'nde doğal döküm tekniği kullanılarak üretildi. Bu malzeme, çelik boş küreler ve katı alüminyum matris alaşımından oluşmaktadır. Malzemenin statik sıkıştırma altındaki enerji emme davranışı detaylı olarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar metal kompozit köpüğün daha yüksek bir yoğunluğa göre sertlik oranına sahip olduğunu göstermiştir, ayrıca ticari olarak üretilen diğer köpüklere göre daha fazla enerji emme yeteneğine sahiptir. Yüksek dayanım ve gerilme oranlarının sonucu olarak, kompozit metal köpük numunelerindeki enerji emme artışı 100% alüminyum köpüklere göre 30 kata kadar ve 100% çelik köpüklere göre 2 kata kadar gözlemlenmiştir.

Esmaelzadeh ve arkadaşlarının 2007 yılındaki çalışmasında, AlSi7-3 vol.%SiC metal köpüğün, köpürme davranışı ve basma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Saf Al, Si, SiC ve TiH₂ tozları karıştırılmış, sıcak sıkıştırılmış ve 750, 780, 810°C'de köpürtülmüştür. Görülmüştür ki, ince SiC partiküllerinin eklenmesi (ortalama 3µm çapında) ergiyik genişlemesini arttırmış ve AlSi7 köpüğünün stabilitesini arttırmıştır. Hücre yapısında daha az drenaj olduğu gözlemlenmiştir. Aynı esnada, basma yükü altında, makro yapıda geniş düzensiz hücreler ve mekanik özelliklerde az bir miktar bozulma gözlemlenmiştir.

Neville ve arkadaşlarının 2008 yılındaki çalışmasında, farklı metal kompozit köpük kombinasyonlarına dayanılarak yeni bir malzeme üretilmiştir. İlk numuneler üç farklı boyuttaki küre boşluklar ve iki farklı malzeme ile başarıyla üretildi. Birçok mevcut köpükten farklı olarak, burada sunulan materyal, sıkıştırma altında düzgün ve üniform bir şekilde deforme oldu. Kürelerin mekanik ve mikro yapısal özellikleri, geometrileri ve matris malzemesiyle bağlarının, kompozit köpüğün dayanım ve plastik deformasyonu için kontrol edilmesi gereken temel faktörler olduğu kanısına varıldı.

Mekanik testler gösterdi ki; kompozit çelik köpüklerimiz, literatürde bildirilen diğer köpüklere göre daha iyi enerji emme kapasitesi ve yoğunluğa göre dayanım oranı sergilemiştir. İleriki çalışmalarda bu köpüklerin periyodik yükler altındaki mekanik özellikleri ve hasar modellemesi üzerinde çalışılacaktır.

Dudka ve arkadaşlarının 2008 yılındaki çalışmasında, oksitleyen ve oksitlemeyen gaz atmosferleri altında alüminyumun köpürmesi incelendi. Köpükler Al99.95 ve TiH₂ tozlarını karıştırarak ve basınç uygulayarak elde edildi. Tozlardaki, prekürsörlerdeki ve köpüklerdeki mevcut oksitlerin yapısı ve dağılımı incelendi. Oksitlerin karmaşık bir hiyerarşi yapısı gözlemlendi. Oksitler, gaz/metal ara yüzünde belirgin bir segregasyon olmaksızın, hücre duvarı yığınlarında bulunmaktadır. Havanın mevcudiyeti, dış yüzeyin oksidasyonu nedeniyle köpürmeyi geciktirir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında AlMg3 alaşımı değişik oranlarda SiC parçacıklarıyla takviye edilerek, kompozit köpük üretilmiş, ikinci aşamada üretim parametrelerinin üretilen kompozit köpük malzemeler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

5.1. Kompozit Köpük Üretimi

5.1.1. Malzeme seçimi

AA5754 alüminyum alaşımı ısıl işleme sertleştirilebilme özelliği olmayan, dayanımı yüksek bir alaşım olup, özellikle deniz suyuna karşı mükemmel korozyon dayanımı, çok iyi kaynak edilebilirliği ve iyi şekil verilebilme özelliği olan bir alaşımdır. (Spencer vd. 2002). Bu sebeple AA5754 alaşımı matris malzemesi olarak seçilmiştir. AA5754 alaşımının fiziksel özellikleri Çizelge 5.1' de, kimyasal bileşimi Çizelge 5.2'de verilmektedir.

Tablo.5.1.EN AW 5754 Alüminyum Alaşımın Kimyasal Kompozisyon Limitleri [3]

Ağırlık %	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti
Min.	-	-	-	2,6	-	-	-	-
Max.	0,4	0,4	0,1	3,6	0,5	0,3	0,2	0,15

Tablo.5.2. EN AW 5754 Alüminyum Alaşım Mekanik Özellikleri[3]

İşlem	Çekme Dayanımı, R m MPa	Akma Dayanımı, R p0,2 MPa	Uzama Dayanımı %	Kesme Modülü MPa	Elastisite GPa
O, H111	215	-	25	140	68

Metal köpük üretiminde köpürtücü madde olarak TiH_2 seçilmiş farklı boyutlarda satın alınarak ısıtılmalı ve ısıtılmı olarak kullanılmalarının, köpük malzemede hücre yapısına etkileri incelenmiştir. Köpürtücü olarak kullanılacak TiH_2 tozlarının fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları tablo 5.3.'de verilmiştir.

Tablo.5.3. Köpürtücü olarak kullanılacak TiH_2 tozlarının fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları

	TiH_2	TiH_2	TiH_2	TiH_2
	TIH-003B	TIH-0420	TIH-1020	Merck-112384
Fiziksel Özellikler				
Görünüm	Gri Toz	Gri Toz	Gri Toz	Gri Toz
Parçacık Boyutu D_{50}	~3 μm	~20 μm	-100/+200 Mesh	<44 μm
Parçacık Boyutu D_{95}	~6 μm	~40 μm		
Parçacık Boyutu D_{10}	-	<420 Mesh		
Moleküler Ağırlık(g/mol)	49,53-49,9	49,53-49,9	49,53-49,9	49,53-49,9
Yoğunluk	3,9 g/cm ³	3,9 g/cm ³	3,9 g/cm ³	3,9 g/cm ³
Gerçek Yoğunluk	3,8 g/cm ³	3,8 g/cm ³	3,8 g/cm ³	3,8 g/cm ³
Kimyasal Kompozisyon (wt%)				
Safılık	~99	>99,75	>99,85	~99
H	< 3,86	>3,85	>3,85	>3,85
O	~1	~0,2	~0,1	~0,1
N	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cl	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06
Si	0,002	0,002	0,002	0,002
Fe	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
Mg	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Cr	<0,012	<0,012	<0,012	<0,012
Ni	<0,014	<0,014	<0,014	<0,014
Zr	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006

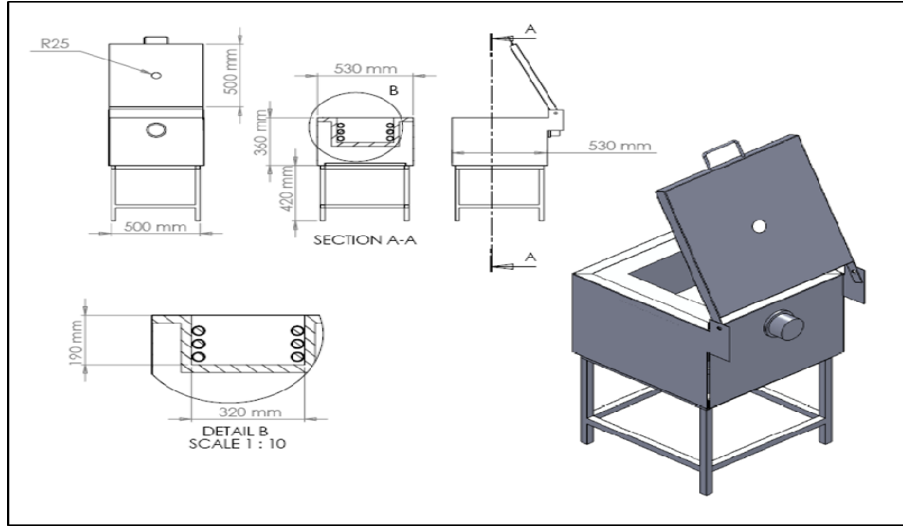
5.1.1.1. TiH_2 tozlarının ısıtılması

Literatürde hidrojen difüzyonunun geciktirilmesi amacı ile TiH_2 tozlarına ısıtılmalı işlem uygulanması önerilmiş ve en iyi işlem sıcaklığı olarak 480°C'de 3 saat bekletilmesi önerilmiştir (Behrendt v.d., 2006). Satın alınan farklı tane boyutlarına sahip TiH_2 tozlarının belirlenen miktarlarına literatürde önerilen ısıtılmalı işlemler uygulanmış ve ısıtılmalı işlemin oluşan hücre özelliklerine etkisi incelenmiştir.

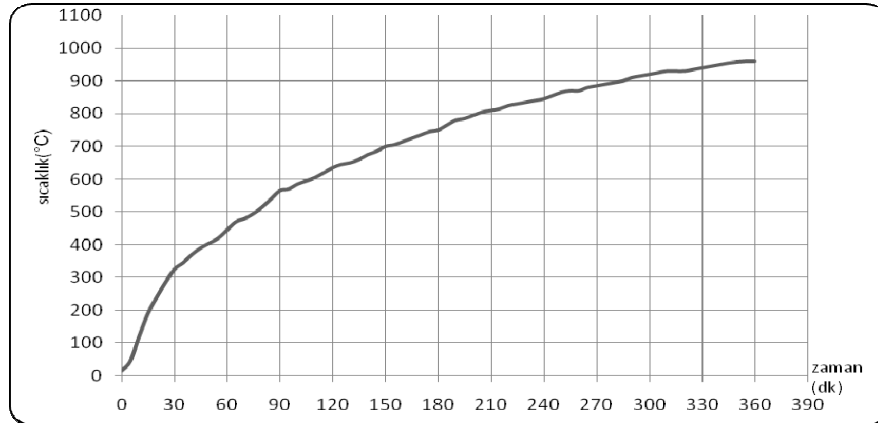
5.1.2 Deney Düzenegi

5.1.2.1. Kompozit köpük hazırlama ünitesi

Ergitme fırını imalatı için mali raporda belirtilen malzemeler dışında gerekli olan profil, kaynak elektrotları, cıvata somun v.s malzemeler T.Ü. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Atölyesinden temin edilmiştir. Şekil 5.1.'de imalat resmi verilen Max 1000 °C sıcaklıkta ısıtma kapasitesine sahip ergitme fırını ve ek düzenegi imal edilerek fırın karakteristik sıcaklık eğrisi çıkarılmıştır. Fırın sıcaklığının zaman ile artış karakteristiği Şekil 5.2. 'de verilmiştir.

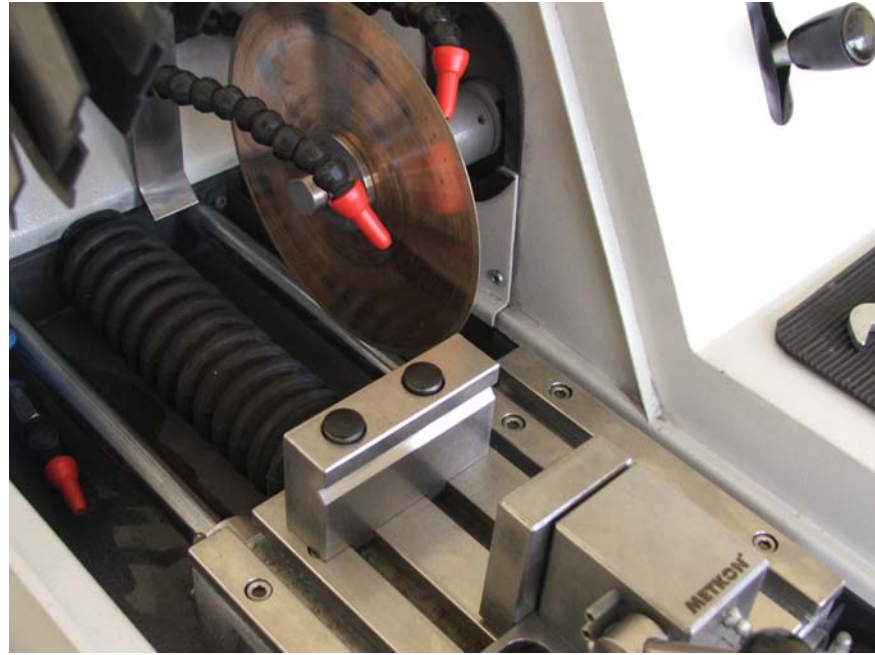


Şekil 5.1. Ergitme fırını imalat resmi



Şekil 5.2. Ergitme fırını sıcaklık-zaman karakteristik eğrisi

Metal Köpük üretim sürecinde yapılan denemelerde köpük içyapısını görmek, köpük yapıyı ve hücre duvarlarını bozmadan test numunesi hazırlamak için alınan hassas kesme cihazı köpük duvar yapısına zarar vermeden çok iyi bir yüzey kalitesi ile işlem yapmaktadır. Ayrıca kompozit malzeme ve kompozit köpük kesme işlemleri de yapılabilen cihazın görüntüleri Şekil 5.3.'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Numune kesme cihazı

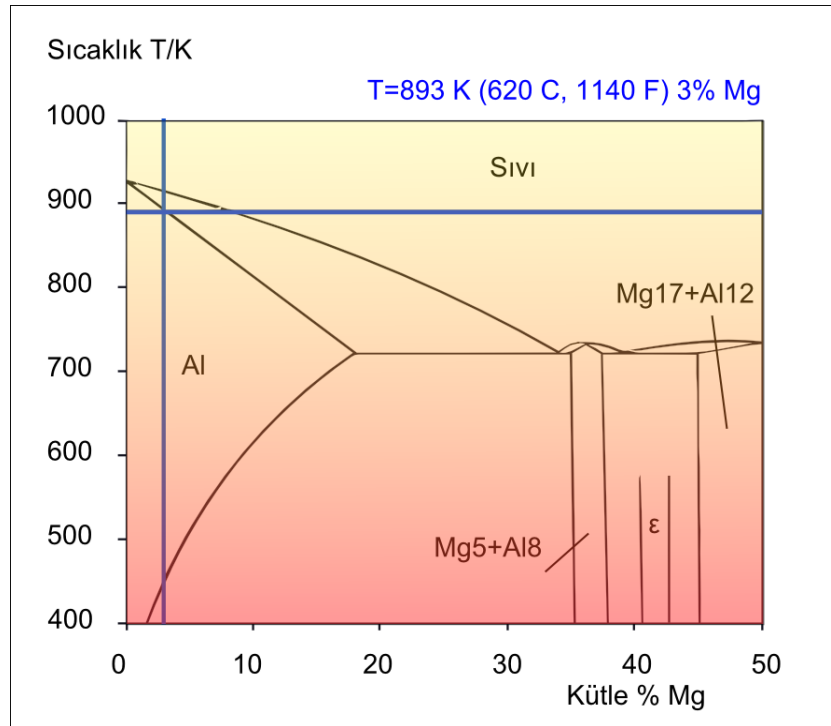
5.1.2.2. Döküm Kalıpları

Köpük malzeme üretimi için kalıp malzemesi olarak Grafit, çelik ve gaz beton malzemedan kalıplar yapılmıştır. Bu malzemeler kullanılarak, köpürtme işlemleri gerçekleştirilmiş ve malzemenin köpük yapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

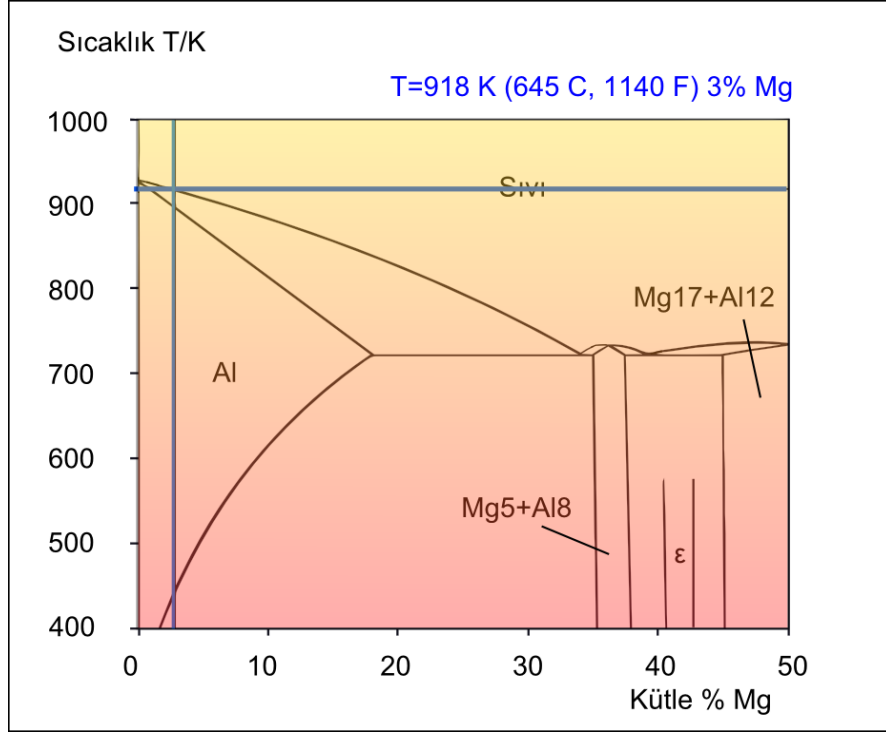
5.1.3. Yarı-katı karıştırma yöntemiyle metal köpük üretimi

5.1.3.1. Alüminyum alaşımlarının yarı-katı sıcaklık aralıklarının belirlenmesi

Alüminyum alaşımlarının yarı-katı sıcaklık aralıkları deneyler yapılarak tespit edilmiştir. Yarı katı sıcaklık aralıklarının tespiti ergitme fırını içinde yapılmış ve malzemenin hal değişimi izlenmiştir (Şekil 5.6.). Tespit edilen sıcaklık aralıklarının aşağıda verilen faz diyagramları ve literatürden elde edilen sıcaklık aralıkları ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5.4. 5754 alaşımının faz diyagramında yarı-katı işlem için minimum sıcaklık değeri [1]



Şekil 5.5. 5754 alaşımının faz diyagramında yarı-katı işlem için maksimum sıcaklık değeri [1]



Şekil 5.6. Yarı katı sıcaklık aralıklarının tespiti için Al alaşımlarının ergitilmesi

Köpük yapıcı tozların reaksiyon hızlarının ve sıcaklıklarının belirlenebilmesi için 5754 Al alaşımı farklı boyutlardaki tozlarla köpürtülmüş ve köpürme süresi ve sıcaklıkları izlenmiştir.

5.1.3.2. Kompozit metal köpük üretimi ve üretim parametrelerinin incelenmesi

Kompozit metal köpük üretimi üç farklı aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşamada köpük hazırlama ünitesi içinde bulunan potaya bir miktar AlMg3 konularak, az miktarda sıvı alaşım elde edilmiştir. İkinci aşamada alüminyum alaşımı belirli sürelerde potaya atılarak, malzeme yarı-katı sıcaklık aralığında tutulmuştur. Son aşamada, yarı-katı haldeki AlMg3 alaşımı içine farklı oranlarda TiH₂ katılarak yarı-katı halde köpük oluşumu sağlanmıştır. Bu işlemler, farklı sıcaklıklar, TiH₂ türleri ve oranları, SiC oranları ve farklı bekletme süreleri için ayrı ayrı tatbik edilmiştir.

Ayrıca AlMg3 alaşımı kullanılarak sırası ile aşağıdaki işlemler de yapılmıştır:

- 1- Köpürtme işleminde kullanılabilecek en uygun kalıp malzemesinin tespiti için ısı iletim katsayısı farklı üç malzemedan köpürtme kalıpları imal edilmiş, yarı katı haldeki Al ve TiH₂ karışımı kalıplara konulup sabit sıcaklıkta farklı sürelerde fırın içersinde bekletilmiştir.
- 2- Gaz beton malzemedan yapılan kalıplara konan yarı katı Al-TiH₂ karışımı farklı sıcaklıklarda işlem yapılarak köpük üretimi için en uygun sıcaklık aralıkları tespit edilmiştir.
- 3- Uygun kalıp malzemesi ve sıcaklık aralıkları tespit edildikten sonra köpürtme işlemleri farklı süreler için tatbik edilerek köpük oluşum aşamaları tespit edilmiştir.
- 4- Üretilen alüminyum köpüklerde hücre stabilitesini sağlayabilmek için SiCp tozlarından farklı oranlarda katılmış Al-TiH₂ karışımının vizkozitesi arttırılmış ve takviye oranının hücre büyüklüğüne etkisi ve hücrelerin yapı içersinde dağılımı gözlenmiştir.

5.2. Karakterizasyon

5.2.1. Özgül ağırlıkların tespit edilmesi

Alüminyum kompozit köpük malzemelerin deneysel olarak özgül ağırlık ve ölçümleri Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Her bir numune türünden 3'er adet numune hazırlanmıştır. Numuneler su almamaları için streç film ile sarılmıştır. Hacim hesaplaması için, numunelerin havadaki ağırlıklarından, sudaki ağırlıkları çıkarılarak hacimleri bulunduktan sonra özgül ağırlıkları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Matris malzemesi AA5754 alaşımının gerçek yoğunluğu ile Arşimet prensibine göre deneysel olarak tespit edilen yoğunluğu kıyaslanarak, malzeme içerisinde oluşan gözenek miktarı tespit edilmiştir. Yine aynı şekilde kompozit köpük malzemelerde de matris içerisine ağırlıkça farklı oranlarda ilave edilen SiC parçacık miktarına göre teorik özgül ağırlıkları tespit edilerek, deneysel özgül ağırlıkları arasındaki fark bulunmuş ve numuneler içerisindeki gözenek oranlarının tespiti yapılmıştır.

5.2.2. Mikro yapı inceleme

Kompozit köpük malzemelerde metalografik incelemeler için numune hazırlamak oldukça zor bir işlemdir. Yumuşak olan matris fazı ile beraber farklı sertlikteki takviyelerin birlikte parlatılma zorunluluğundan kaynaklanan bir güçlük söz konusudur. Ayrıca malzeme içindeki gözenekler, parlatma işlemini zorlaştırmaktadır. Takviye ile matris fazını aynı düzleme getirmek, takviye taneciklerini yerinden oynatmadan veya sökmeden bu işlemi gerçekleştirmek oldukça fazla tecrübe ve dikkat gerektirmektedir. Seçilen numuneler sırasıyla 280, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000 ve 4000 Mesh SiC zımparasından geçirildikten sonra yine sırası ile uygun keçeler kullanılarak 6 μ m, 3 μ m, 1 μ m diamond paste ile parlatılmış, son olarak da koloidal silika ile parlatılarak mikro yapı incelemeleri için hazırlanmıştır.

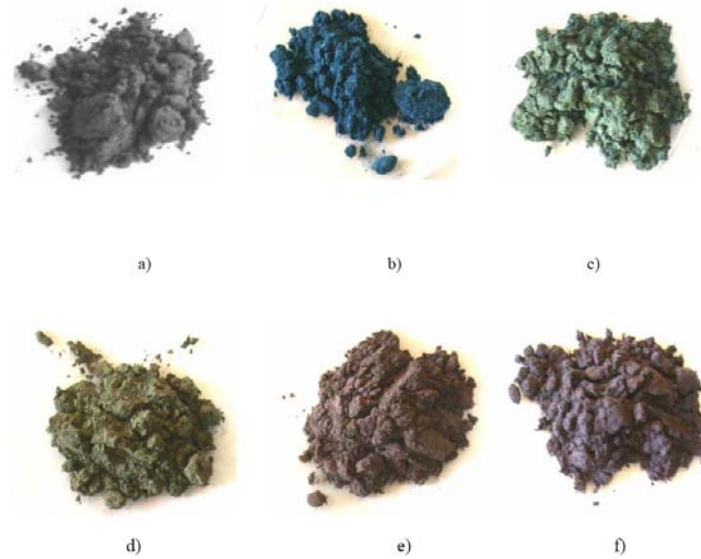
Hazırlanan numunelerde gözenekli yapıda homojen dağılım sağlanıp sağlanmadığı ve takviye malzemesinin hücre duvarlarında homojen dağılıp dağılmadığını, malzeme içinde oluşan farklı yapıdaki bileşikler tespit etmek amacı ile

optik laboratuvar mikroskobu ve yarı kantitatif elementel analiz sistemine sahip, JOEL-FEG-SEM / INCA/ EDS tarama elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

6.1. TiH₂ Tozlarının Isıl İşlemi

Literatürde hidrojen difüzyonunun geciktirilmesi amacı ile TiH₂ tozlarına ısıl işlem uygulanması önerilmiş ve en iyi işlem sıcaklığı olarak 480°C'de 3 saat bekletilmesi önerilmiştir (Behrendt v.d., 2006). Satın alınan farklı tane boyutlarına sahip TiH₂ tozlarının belirlenen miktarlarına oksitlendirme işlemi uygulanmış ve Şekil 6.2.'de gösterilen sonuçlar elde edilmiştir. TiH₂ tozları ısıl işlem süresine ve sıcaklığa bağlı olarak üzerinde oluşan oksit tabakası kalınlığına göre farklı renklere dönüşmektedir. Elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 6.1. TiH₂ tozlarının ısıl işlem süresine ve sıcaklığa bağlı olarak renk değişimi a) Isıl işlemsiz b) 480°C' de 180dk. c) 500°C' de 180dk. d) 520°C' de 90dk e) 520°C' de 180 dk f) 520°C' de 360 dk [1]

Isıl işlem görmüş TiH₂ tozlarının renk değişimleri Şekil 6.2.'de, fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları Tablo 5.3.'de verilmiştir. 480 °C de 180 dakika bekletilen tozlar farklı tane büyüklüklerine göre de farklı renkler almıştır. Ayrıca ısıl işlem süresince tozların ağırlıklarının %5 ile %10 arasında artış gösterdiği saptanmıştır. İncelenen literatür çalışmalarında toz ağırlıklarındaki artış oranının yaklaşık %7 olarak verildiği dolayısıyla elde edilen deney sonuçlarının bulunan artış değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür (Behrendt v.d., 2006).



Şekil 6.2. Isıl işlem görmüş TiH_2 tozlarının renk değişimi

6.2. Kalıp Malzemesi Belirlenmesi İçin Deneme Sonuçları

Kullanılan kalıp malzemesinin türüne göre köpük malzemenin hücre yapısı ve dağılımında farklılıklar gözlenmiştir. İşlem için çelik, grafit ve gaz beton olmak üzere üç farklı ısı iletim katsayısına sahip malzeme kullanılmıştır.

Çelik kalıplarda ısı transferi hızlı gerçekleştiği için köpürme hızlı olmakta ancak yarı katı sıcaklık aralığında yeterli süre kalamadığı için karışım hızla sıvı hale geçmektedir. Köpürme işlemi sıvı metal içinde gerçekleştiğinden dolayı yeterli viskoziteye sahip olmayan sıvı metal, oluşan gaz kabarcıklarını tutamamakta ve kalıbın özellikle metale temas ettiği bölgelerinde drenaj oluşmakta veya yapı içinde kalması gereken gaz sıvı metalden ayrılmaktadır. (Şekil 6.3.)

Ayrıca sıvı içinde köpürme gerçekleştiği için hücre stabilitesi sağlanamamakta ve zayıf hücre duvarlarına sahip homojen olmayan köpük yapı oluşmaktadır. Grafit kalıplarda da benzer sonuçlar görülmüş olup köpürtme işlemleri için ısı transfer katsayısı düşük gaz beton malzemedeki yapılmış kalıplar ile daha uygun sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 6.4.).



Şekil 6.3. Grafit kalıpta oluşturulan Alüminyum köpük malzeme ve kesiti



Şekil 6.4. Gaz beton kalıpta oluşturulan alüminyum köpük malzeme ve kesiti

6.3. Özgül Ağırlıklar ve Gözenek Oranları

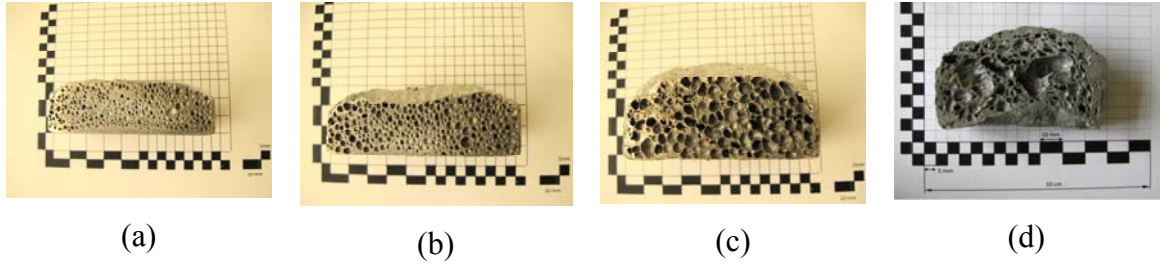
Tablo 6.1. Özgül ağırlıklar ve rölatif yoğunluklar (deneyler T800 °C yazan haricinde 750 °C’de yapılmıştır. “Ti”nin yanındaki rakam %TiH₂ takviyesini, “S”nin yanındaki rakam %SiC takviyesini, “işl” tozun ısıtılma işleminden geçirildiğini belirtmektedir).

Deney Adı	Yoğunluk (gr/cm ³)	Röl. Yoğ.	Deney Adı	Yoğunluk (gr/cm ³)	Röl. Yoğ.
Ti1S20-işl 8dk	0,588	0,220	Ti1S20-işl-0420-12dk	0,379	0,141
Ti1S20-işl 10dk	0,399	0,149	Ti1S10-003B-8dk	0,618	0,231
Ti1S20-işl 12dk	0,388	0,145	Ti1S10-003B-10dk	0,652	0,244
Ti1S0-işl 8dk	0,497	0,186	Ti1S10-003B-12dk	0,550	0,205
Ti1S0-işl 10dk	0,497	0,186	Ti1S10-işl-003B-8dk	0,769	0,288
Ti1S0-işl 12dk	0,410	0,153	Ti1S10-işl-003B-10dk	0,662	0,247
Ti1S0 10dk	0,389	0,145	Ti1S10-işl-003B-12dk	0,683	0,255
Ti1S20 8dk	0,324	0,121	Ti1S20-003B-8dk	0,613	0,229
Ti1S20 10dk	0,380	0,142	Ti1S20-003B-10dk	0,773	0,289
Ti1S20 12dk	0,311	0,116	Ti1S20-003B-12dk	0,960	0,359
Ti1S10-işl 8dk	0,704	0,263	Ti1S10-1020-8dk	0,648	0,242
Ti1S10-işl 10dk	0,683	0,255	Ti1S10-1020-10dk	0,521	0,195
Ti1S10-işl 12dk	0,482	0,180	Ti1S10-1020-12dk	0,499	0,186
Ti1S10 8dk	0,473	0,177	Ti1S20-1020-8dk	0,334	0,125
Ti1S10 10dk	0,380	0,142	Ti1S20-1020-10dk	0,371	0,138
Ti1S10 12dk	0,413	0,154	Ti1S20-1020-12dk	0,450	0,168
T800°C Ti1S20 8Dk	0,900	0,337	Ti1S10-işl-1020-8dk	0,493	0,184
T800°C Ti1S20 10dk	0,665	0,249	Ti1S10-işl-1020-10dk	0,260	0,097
T800°C Ti1S20 12dk	0,616	0,230	Ti1S10-işl-1020-12dk	0,290	0,108
Ti1S10-işl-0420-8dk	0,564	0,211	Ti1S20-işl-1020-8dk	0,408	0,152
Ti1S10-işl-0420-10dk	0,365	0,136	Ti1S20-işl-1020-10dk	0,772	0,289
Ti1S10-işl-0420-12dk	0,418	0,156	Ti1S20-işl-1020-12dk	0,575	0,215
Ti1S10-0420-8dk	0,300	0,112	Ti0,5S20 8dk	0,424	0,158
Ti1S10-0420-10dk	0,249	0,093	Ti0,5S20 10dk	0,301	0,112
Ti1S10-0420-12dk	0,346	0,129	Ti0,5S20 12dk	0,378	0,141
Ti1S20-0420-8dk	0,482	0,180	Ti2S20 8dk	0,456	0,170
Ti1S20-0420-10dk	0,590	0,220	Ti2S20 10dk	0,355	0,132
Ti1S20-0420-12dk	0,550	0,205	Ti2S20 12dk	0,368	0,137
Ti1S20-işl-0420-8dk	0,480	0,179	Ti0,5S5	0,572	0,214
Ti1S20-işl-0420-10dk	0,643	0,240	Ti0,5S10	0,689	0,258

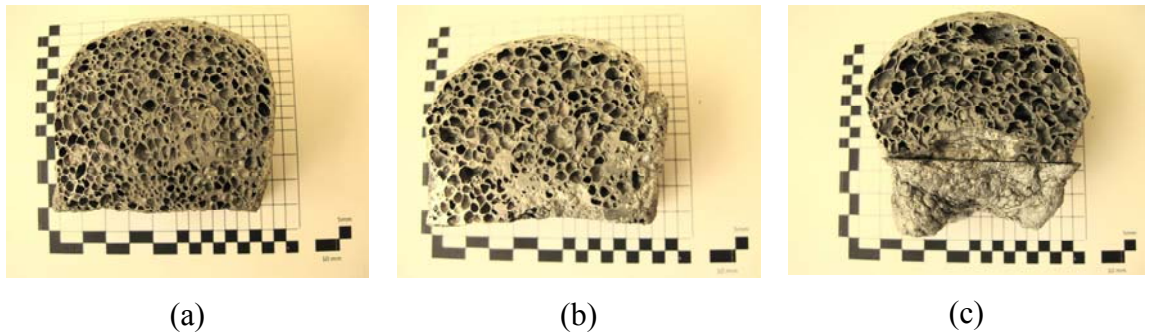
6.4. Proses Değişkenlerinin Belirlenmesi

6.4.1. Zamanın Yoğunluk Değişimine ve Köpük Oluşumuna Etkisi

Metal köpük üretme düzeneğinde koruyucu gaz altında yapılan karıştırma ve köpürtme işlemlerinde gözenek oluşumu şekil 6.5.'te görüldüğü gibi zamana bağlı olarak farklı aşamalardan geçmektedir. Birinci aşamada yarı katı AlMg3 alaşımı içersine katılan TiH₂ gaz salma sıcaklığına gelir ve (~450 °C) malzeme içersinde gaz salınımı başlar (Şekil 6.5.a.). İkinci aşamada gaz salınımı hızlanır ve artan basınçla gözenekler büyür(Şekil 6.5.b.). Üçüncü aşamada gözenek iç basıncı zayıf hücre duvarlarını zorlayarak gözenekler birleşerek büyür(Şekil 6.5.c.). Eğer hücre duvarları yeterli dayanıma sahip olursa, hücreler TiH₂'nin bünyesinde barındırdığı tüm H₂ gazını salana kadar birleşmeden büyümeye devam eder. Daha sonra sabit sıcaklıkta beklemeye devam edilirse, atmosfer basıncının etkisiyle, köpük malzeme üstünde çökmeler görülmeye başlar(Şekil 6.5.d.).

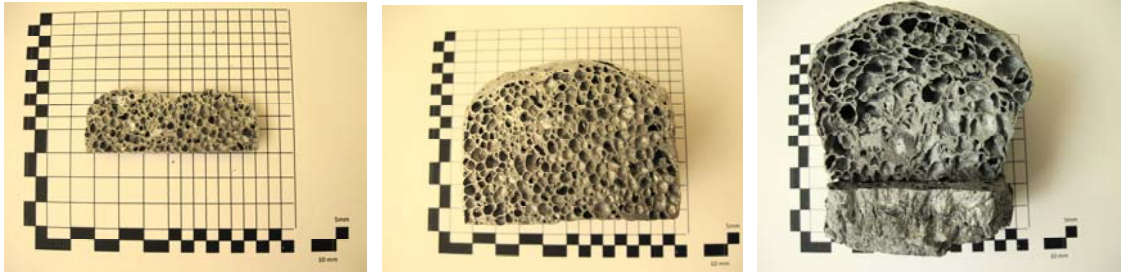


Şekil 6.5. zamanın yoğunluk değişimine ve köpük oluşumuna etkisi

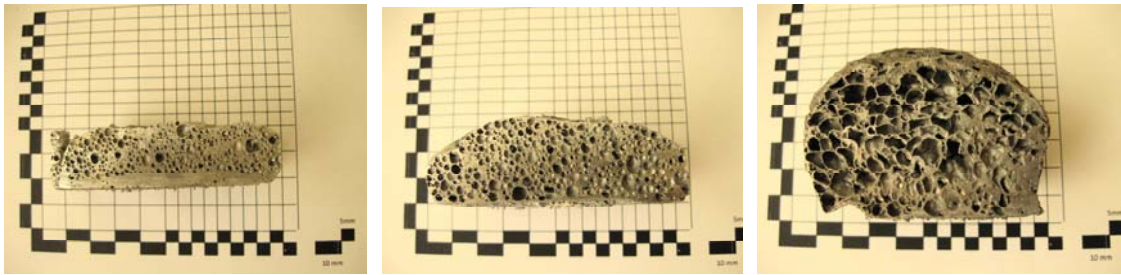


Şekil 6.6. 750°C'de, 1% TiH₂ ve 20% SiC takviyeli, a) 8dk, b) 10 dk. ve c) 12, dk. bekletilmiş köpük numuneler, $\rho_1 = 0,624$, $\rho_2 = 0,420$, $\rho_3 = 0,311$

Şekil 6.6.'da 750 °C sıcaklıkta %20 SiC takviyeli AlMg3 alaşımına, 1% oranında TiH₂ katılmış ve sırasıyla 8,10 ve 12 dakika bekletilmiştir. Sonuç olarak 8. dakikada homojen TiH₂ ve SiC dağılımı gerçekleştiğinden, gözenek yapısı yaklaşık olarak eş büyüklüklerde oluşmuş ve homojen olarak yapı içerisine dağılmıştır. 10. dakikada gözenekler büyümeye başlamış ve 12. dakikada aşırı büyümüş ve birleşmiş gözenekler oluşmuştur. Sabit sıcaklıkta tutma süresi arttıkça, hücre duvarları incelmış ve artan iç gaz basıncına yenilerek hücreler birbirleriyle birleşmiştir. Köpük malzeme lineer genişterek, başlangıç hacminin yaklaşık 5 katına ulaşmıştır. Aynı zamanda yoğunluklar da belirgin bir şekilde azalmıştır. Şekil 6.6.'da 1. numunenin yoğunluğu 0,624 g/sm³, 2. numunenin yoğunluğu 0,420 g/sm³, 3. numunenin yoğunluğu 0,311 g/sm³ olarak ölçülmüştür.



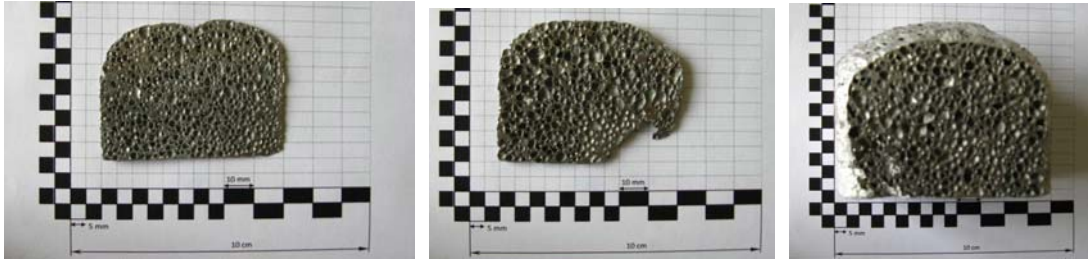
Şekil 6.7. 750°C'de, 1% TiH₂ ve 20% SiC takviyeli , 8dk, 10 dk., 12, dk. bekletilmiş numuneler (ısıtılmış), $\rho_1=0,588$, $\rho_2=0,399$, $\rho_3=0,288$



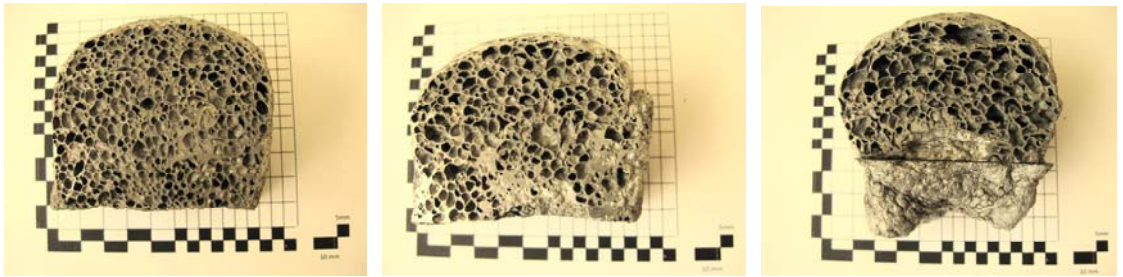
Şekil 6.8. . 750°C'de, 1% TiH₂ ve 10% SiC takviyeli, 8dk, 10 dk., 12, dk. bekletilmiş numuneler (ısıtılmış), $\rho_1=0,704$, $\rho_2=0,683$, $\rho_3=0,482$

Şekil 6.6., Şekil 6.7. ve Şekil 6.8.'de görüldüğü gibi köpürtme zamanının artmasıyla birlikte yoğunluk azalmaktadır. Belirli bir süreyi aşan köpük numunelerde köpük yapısının bozulmaya başladığı ve düzensiz bir hal aldığı gözlemlenmiştir.

6.4.2. TiH₂ Miktarının Yoğunluk Değişimine ve Köpük Oluşumuna Etkisi



Şekil 6.9. 750 °C'de, 0,5% TiH₂ ve 20% SiC takviyeli , 8dk, 10 dk., 12, dk. Bekletilmiş numuneler, $\rho_1= 0,424$, $\rho_2= 0,378$, $\rho_3= 0,315$



Şekil 6.10. 750 °C'de, 1% TiH₂ ve 20% SiC takviyeli , 8dk, 10 dk., 12 dk. bekletilmiş numuneler, $\rho_1= 0,324$, $\rho_2= 0,320$, $\rho_3= 0,311$



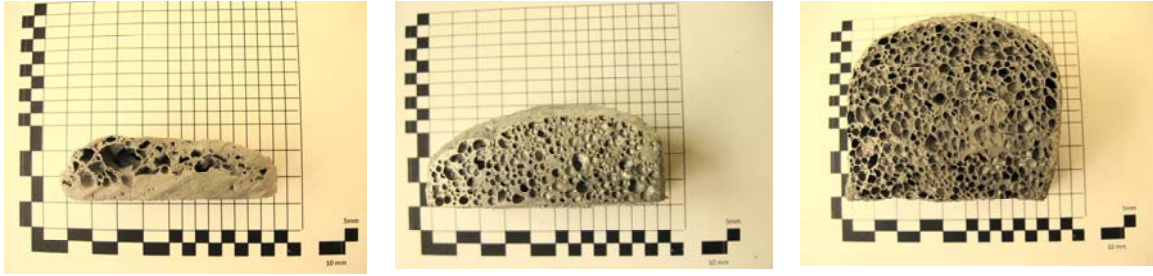
Şekil 6.11. 750 °C'de, 1,5% TiH₂ ve 20% SiC takviyeli , 8dk, 10 dk., 12 dk.bekletilmiş numuneler



Şekil 6.12. 750 °C'de, 2% TiH₂ ve 20% SiC takviyeli , 8dk, 10 dk., 12 dk.bekletilmiş numuneler, $\rho_1= 0,456$, $\rho_2= 0,395$, $\rho_3= 0,368$

Şekil6.9., Şekil6.10., Şekil6.11. ve Şekil6.12.'de TiH_2 miktarlarının artması ile zamana bağlı olarak köpük yapının değişimi gösterilmiştir. Şekil 6.9.'de 0,5% TiH_2 ilavesi ile homojen hücre yapısı gözlenirken TiH_2 oranlarının artması ile daha kısa sürelerde belirli hücre büyüklüklerine ulaşıldığı ve daha yüksek iç basınçlar olduğundan daha fazla hücre birleşmeleri olduğu ve köpük malzemenin daha kısa sürede düzensiz gözenek yapısı oluşturduğu gözlemlenmiştir.

6.4.3. SiC Miktarının Yoğunluğa ve Köpük Yapısına Etkisi



(a)

(b)

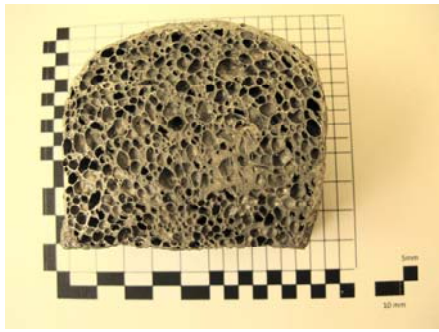
(c)

Şekil 6.13. Takviyesiz, ve 10% SiC ve 20% SiC Takviyeli Numuneler

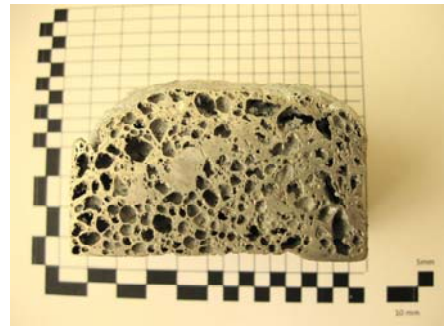
Metal köpük üretiminde genellikle SiC katılarak, köpük stabilitesi sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmada yarı-katı karıştırma ve yarı-katıdan köpük oluşturma yöntemi uygulanmış ve SiC takviyesinin hücre dağılımına etkileri incelenmiştir. Şekil 6.8.a.'da SiC takviye katılmamış AlMg3 alaşımı köpürtülmeye çalışılmıştır. İçine 1% oranında TiH_2 katılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi oluşan gaz kabarcıkları hücre duvarları tarafından engellenemediği için, hızla birbirleriyle birleşmiş, büyümüş ve çökmüştür. Aynı zamanda malzemenin altı kısmında drenaj oluşmuştur. Şekil 6.8.b.'de aynı oranda TiH_2 katılmasına rağmen 10% SiC takviyesi nedeni ile homojen bir gözenek dağılımı gözlenmiştir ve drenaj oluşmamıştır. Ancak lineer genişleme en fazla 2 ya da 3 katına kadar gerçekleşmiştir. Şekil 6.8.c.'de yine 1% TiH_2 ile köpürtülmüş AlMg3 alaşımı görülmekte, içinde 20% oranında SiC içerdiğinden dolayı, daha fazla bir lineer genişleme, homojen gözenek dağılımı ve daha düşük rölatif yoğunluk saptanmıştır. SiC takviyesi ile lineer genişlemenin arttığı ve drenaj oluşumunun önlenildiği gözlenmiştir.

6.4.4. Döküm Sıcaklığının Köpük Oluşumuna Etkisi

Metal köpük amacıyla yapılan ön çalışmalarda, köpük malzemenin gözenekliliğinin kontrol edilebilmesi için sabit sıcaklıkta işlem yapılması gerektiği görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda yapılan denemelerde köpürme işleminin malzemenin yarı-katı sıcaklık aralığında başladığı gözlenmiştir. Her alaşımın yarı-katı sıcaklık aralıkları farklı olduğundan AlMg3 için yarı-katı sıcaklık aralığı tespit edilmiş ve bu sıcaklıktan itibaren 50 °C aralıklarla köpürtme çalışmaları yapılmıştır. AlMg3 için yarı-katı hal 640-660 °C arasında gerçekleşmektedir. 700 °C'de yapılan denemede katılan takviye, TiH₂ ve karıştırma nedeni ile hızlı ısı kaybı meydana gelmiş ve dengesiz ısı dağılımı nedeni ile köpük oluşumu gerçekleşmemiştir. 750 °C'de yapılan denemede başarıya ulaşılmış, homojen bir hücre yapısı elde edilmiştir. 800 °C'de yapılan denemede malzeme hızla sıvı hale geldiği için hücre duvarlarının dayanımı düşmüş, gözenekler birbiriyle birleşmiş, malzemenin farklı bölgelerinde drenaj oluşmuştur. Daha yüksek sıcaklıklardaki denemelerde oluşan gaz kabarcıkları sıvı içerisinden sıyrılıp çıkarak köpük yapı oluşturmamıştır. Şekil 6.14.'de 750 °C ve 800 °C de üretilmiş 1%TiH₂ ve 20% SiC takviyeli numuneler görülmektedir. Şekil 6.14.a.'da oldukça düzenli ve hemen hemen eş büyüklükte gözenek yapısı oluşurken şekil 6.14.b.'de oldukça düzensiz köpük yapısı görülmektedir. Ayrıca lineer genleşmenin de daha az olduğu görülmektedir.



(a)

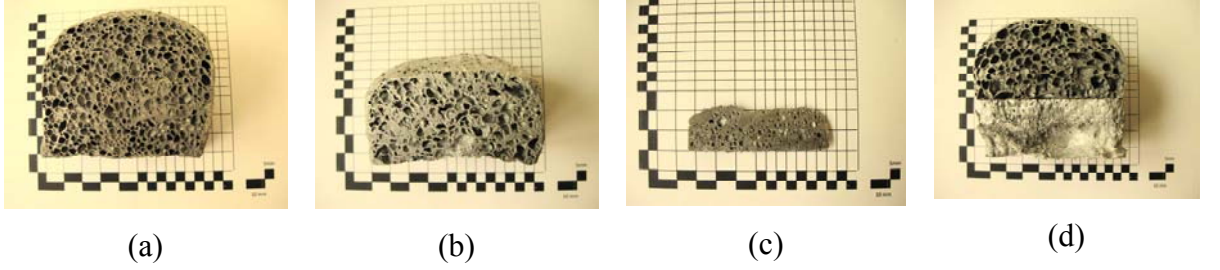


(b)

Şekil 6.14. 750°C ve 800°C de üretilmiş 1%TiH₂ ve 20% SiC takviyeli numuneler

6.4.5. Farklı Boyuttaki TiH₂ Tozlarının Etkisi

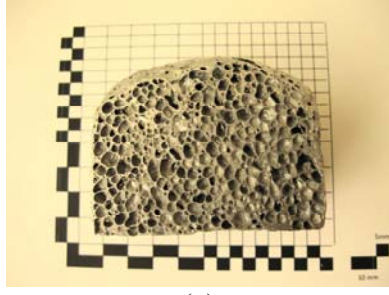
TiH₂ boyutlarının köpük oluşumuna etkisini incelemek amacıyla 4 farklı boyutta TiH₂ satın alınmış ve her birinden 1% oranında katılarak AlMg3 alaşımından köpük oluşturma denemeleri yapılmıştır. Çok küçük boyuttaki tozlar hemen alev alarak daha malzeme içerisine karışmadan gaz salınımı gerçekleştiğinden köpük oluşturmada başarıya ulaşılamamıştır. 100 µm büyüklüğündeki tozlarla köpük oluşumu başarılı ancak fazla miktarda ve düzensiz gaz salınımı nedeni ile kontrolsüz büyüyen hücrelere sahip düzensiz yapıdaki köpük malzeme elde edilmiştir. En iyi sonuç 44 µm boyutlarındaki TiH₂ ile elde edilmiştir. Şekil 6.15.a'da 44 µm TiH₂ kullanılarak üretilen alüminyum köpük malzeme görülmektedir. Oldukça düzgün eş hücrelere sahip ve lineer genişliği fazla bir yapı elde edilmiştir.



Şekil 6.15. 44µm,30 µm,4 µm ve 100 µm TiH₂Tozlarıyla Üretilen Köpükler

6.4.6. TiH₂ Tozlarına Isıl İşlem Yapılmasının Köpük Oluşumuna Etkisi

Yarı-katı karıştırma ve yarı-katı köpürtme yönteminde, diğer yöntemlerde ihtiyaç duyulan toz ısıl işlemine ihtiyaç duyulmamıştır. Toz ısıl işleminin yapılmaması maliyeti düşürmüş ve üretim sürecini kısaltmıştır. Bu çok önemli bir kazançtır. Ayrıca toz ısıl işlemi ile gaz salınım sıcaklığı geciktirilmesine rağmen, köpürtme gücü azalmaktadır. Uygulanan yöntemde toz ısıl işlemine gerek kalmamasına rağmen mevcut tozlara ısıl işlem uygulanarak, aradaki farklar gözlenmiştir.

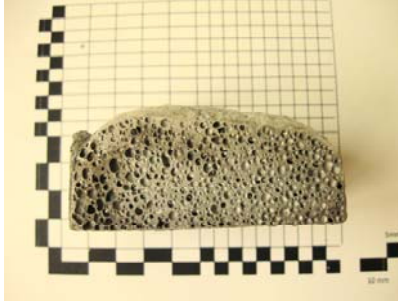


(a)



(b)

Şekil 6.16. 750 °C'de, 44µm boyutunda 1% TiH₂ ve 20% SiC takviyeli, (a) ısıt işlem görmüş, (b) ısıt işlem görmemiş numuneler



(a)

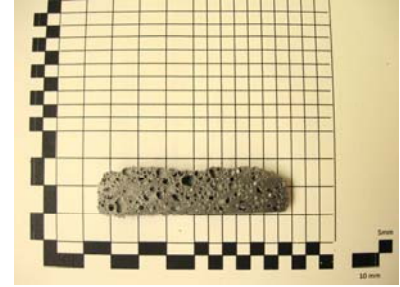


(b)

Şekil 6.17. 750 °C'de, 30µm boyutunda 1% TiH₂ ve 20% SiC takviyeli, (a) ısıt işlem görmüş, (b) ısıt işlem görmemiş numuneler

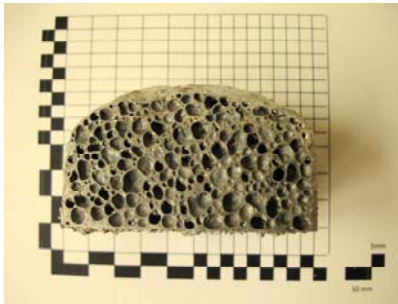


(a)

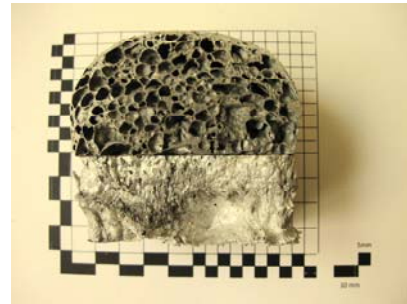


(b)

Şekil 6.18. 750 °C'de, 4µm boyutunda 1% TiH₂ ve 20% SiC takviyeli, (a) ısıt işlem görmüş, (b) ısıt işlem görmemiş numuneler



(a)

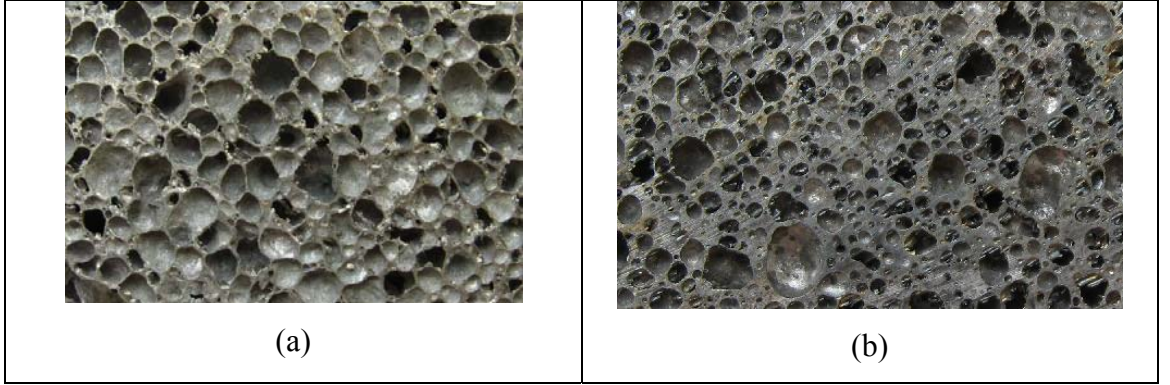


(b)

Şekil 6.19. 750 °C'de, 100µm boyutunda 1% TiH₂ ve 20% SiC takviyeli, (a) ısıt işlem görmüş, (b) ısıt işlem görmemiş numuneler

6.4.7. SiC Boyutunun Etkisi

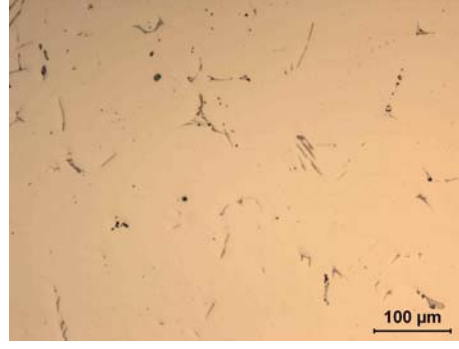
Yapılan çalışmada, 500 mesh ve 1200 mesh olmak üzere iki farklı boyutta SiC takviye kullanılmıştır. SiC takviye hücre stabilitesini arttırmak ve drenaj oluşumunu engellemek amacıyla yapılmıştır. 500 mesh boyutundaki takviyelerle homojen dağılıma sahip hücreler elde edilmiş drenaj oluşmamıştır. 1200 mesh takviye çok küçük boyutta olduğunda karıştırma esnasında güçlüklerle karşılaşmış, karıştırılabilen miktarı homojen gözenek oluşturmuş ancak 500 mesh takviyeli numuneye nazaran daha küçük boyutta hücreler oluşmuştur. Ancak karıştırma sırasında malzeme içerisinde çok miktarda topaklanmalar ve malzeme hataları meydana gelmiştir.



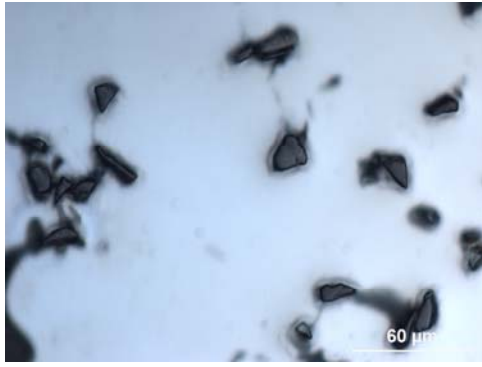
Şekil 6.20. (a) 500 mesh ve (b) 1200 mesh boyutlarında SiC takviye edilerek üretilen numuneler.

6.5. Mikro Yapı İncelemeleri

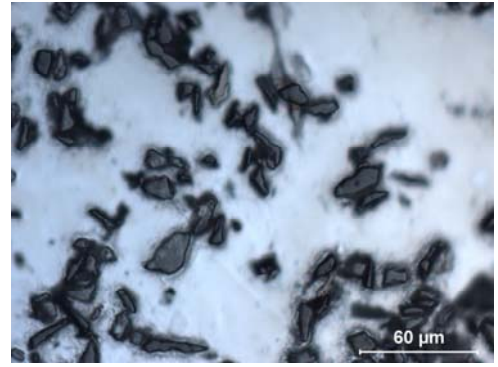
Alüminyum köpük malzemelerin mikroyapı fotoğrafları şekil 6.21.- şekil 6.23. arasında verilmiştir. Şekil 6.21. takviye edilmemiş alüminyum köpüğün hücre çeperini göstermektedir. Bu bölgede AlMg3 alaşımının düzenli bir şekilde katıldığı, poroz bulunmadığı görülmüştür. Şekil 6.22.'de 10% ve 20% SiC ile takviye edilmiş mikro yapılar gözükmemektedir. Bu görüntüler hücre çeperinden alınmış olup takviyenin homojen olarak dağıldığı gözlenmiştir.



Şekil 6.21. AlMg3 / takviyesiz alüminyum köpüğün hücre çeperi mikro yapı fotoğrafı



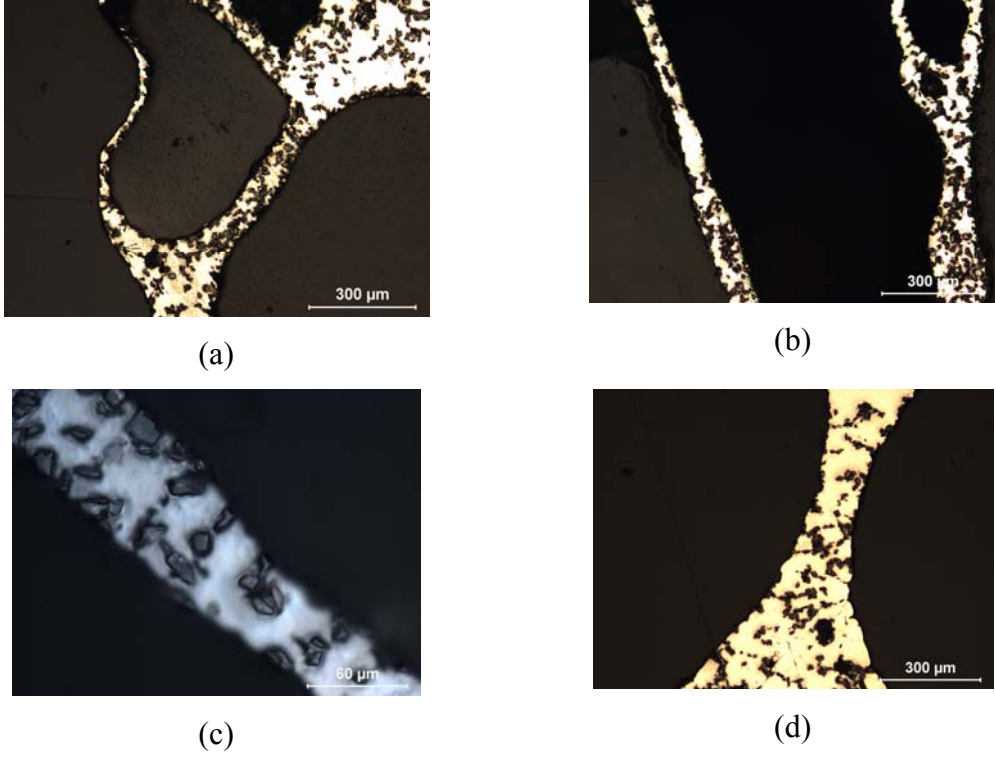
(a)



(b)

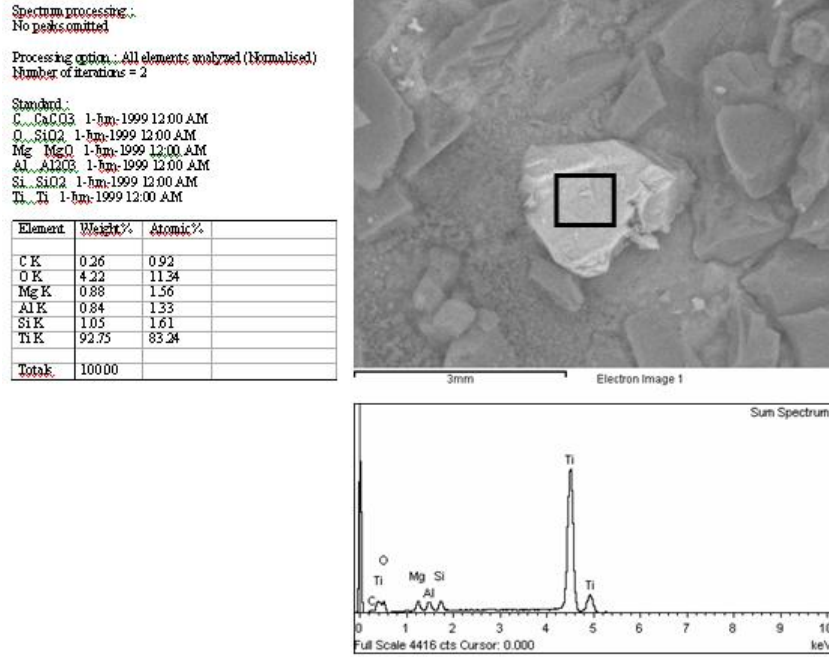
Şekil 6.22. (a) AlMg3 /SiC_p 10% ve (b) AlMg3 /SiC_p 20% takviyeli alüminyum köpüklerin hücre çeperi mikro yapı fotoğrafları

Şekil 6.23.'de mikro yapılar hücrelerin birleşme bölgelerinden alınmıştır. 6.23.a. ve 6.23.b.'de takviyenin hücre duvarlarında biriktiği ve gözeneklerin birleşmesine engel olduğu gözlenmiştir. 6.23.c. ve 6.23.d.'de iki hücre arasındaki duvara yerleşmiş SiC takviyenin dağılımını göstermektedir.

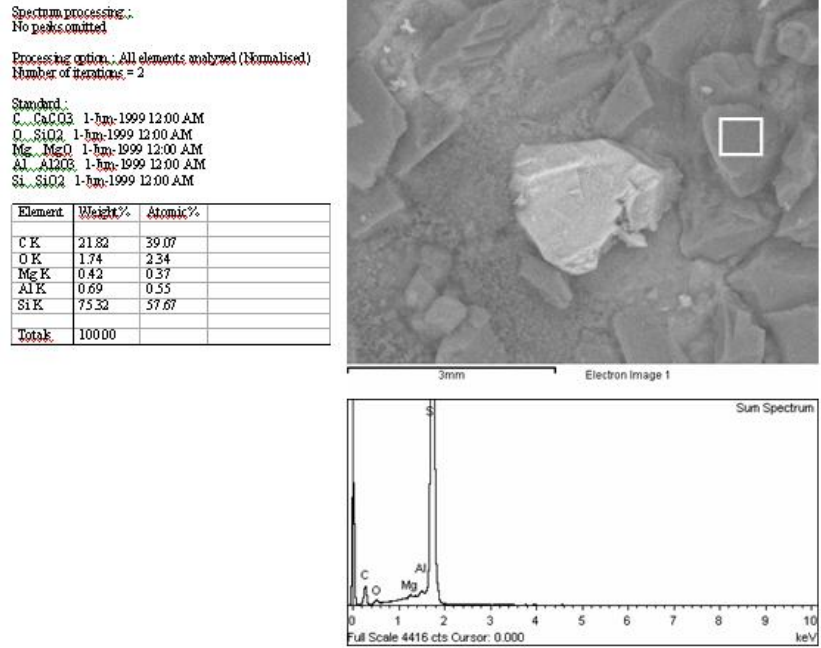


Şekil 6.23. AlMg3 / 20% SiC_p alüminyum kompozit köpüğün hücre duvarı mikro yapı fotoğrafları

Şekil 6.25.'de TiH_2 bileşiğinin bünyesindeki H_2 gazını saldıktan sonra hücre içinde SiC taneleri arasında kalan Titanyum parçacığı görülmektedir.



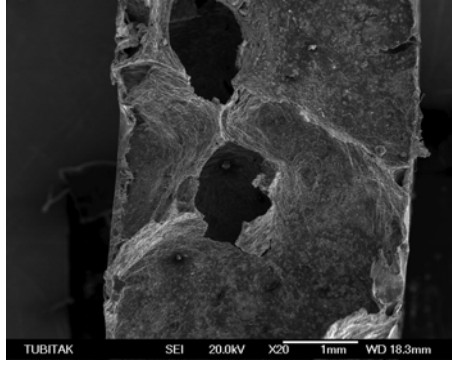
(a)



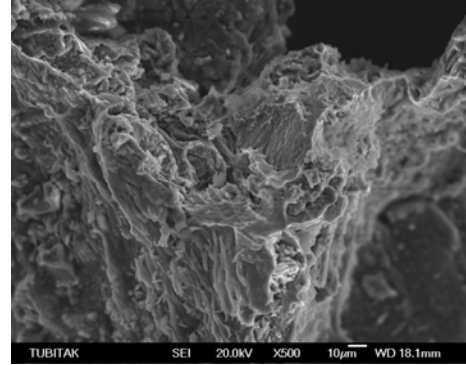
(b)

Şekil 6.25. 20% SiC takviyeli alüminyum kompozit köpüğün hücre çerperinde yer alan (a) titanyum taneciğinin (b)SiC taneciklerinin EDS analizi

Şekil 6.26.'de takviye katılmamış alüminyum köpüğün kırık yüzeyden alınan hücre duvarı görüntüleri verilmiştir. 6.26.a.'da iki hücre arasındaki duvar 6.26.b.'de üç hücre arasındaki birleşim bölgesi görülmektedir. Takviyesiz köpüklerde hücre duvarları içinde kontrolsüz büyümüş gözeneklere rastlanmaktadır.



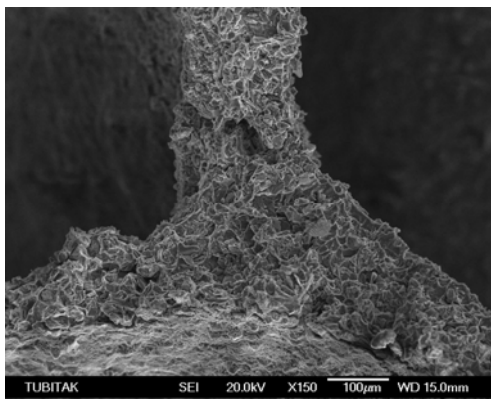
(a)



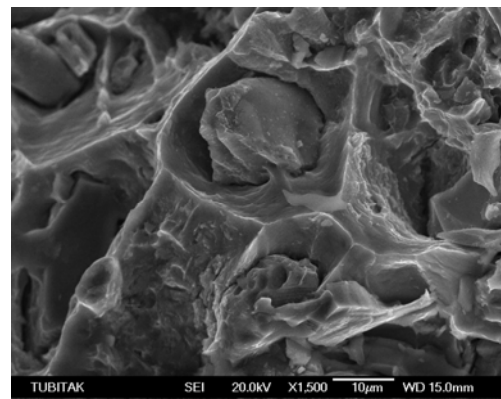
(b)

Şekil 6.26. Takviyesiz alüminyum köpüğün SEM fotoğrafları

Şekil 6.27.'de 20% SiC ile takviye edilmiş Alüminyum kompozit köpüğün kırık yüzeyinden alınan SEM fotoğrafları görülmektedir. 6.27.a'da üç hücre arasındaki birleşme bölgesinden SiC tanelerinin birikerek hücre duvarını güçlendirdiği ve hücrelerin birleşerek büyümesine engel olduğu görülmektedir. 6.27.b'de alüminyum yapı içerisindeki SiC taneleri görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.27. 20% takviyeli alüminyum köpüğün SEM fotoğrafları

Sonuçlar

Bu çalışmada AlMg3 alüminyum alaşımı SiC_p tozları ve TiH₂ kullanılarak kompozit metal köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Proses parametrelerinin değişiminin, metal köpüğün hücre yapısı ve dağılımına etkileri araştırılmış elde edilen sonuçlar özetlenmiştir:

- 1- Yarı-katı sıcaklık aralığında AlMg3 alaşımına TiH₂ eklenerek metal köpük üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Lineer genişleme yaklaşık 5 kat olarak gerçekleşmiş ve malzeme hacimsel olarak 85-90% arasında AlMg3 alaşımına, yarı-katı sıcaklık aralığında farklı oranlarda SiC_p homojen olarak karıştırılabilmektedir.
- 2- Takviye ve köpürtücü TiH₂ tozlarının alüminyum içine karıştırılma problemi yarı-katı sıcaklık aralığında sağlanan viskoz yapı sayesinde aşılmıştır. Gözenek yapısı ve boyutları incelendiğinde, takviyenin ve köpürtücü TiH₂'nin köpük yapı içinde düzdün dağılımının sağlandığı görülmüştür.
- 3- Takviye oranındaki artışla birlikte yoğunluğun azaldığı, metal köpüğün lineer genişleme miktarının arttığı, gözenek boyutlarının küçüldüğü ve düzgün dağılım sergilediği görülmüştür.
- 4- SiC takviyesiyle SiC tanelerinin gözenekler etrafında toplanarak gözeneklerin aşırı büyümesine ve birleşmesine izin vermediği, hücre duvarını güçlendirdiği, metal köpük içerisinde drenaj oluşumu engellediği gözlenmiştir. SiC parçacık boyutu küçüldükçe daha küçük hücreli köpük yapı oluşmaktadır.
- 5- AlMg3 alaşımı için yarı-katı sıcaklığın 640-660 °C olduğu belirlenmiştir. 750 °C fırın sıcaklığında optimum gözenek boyutu ve dağılımına ulaşmakta ve bu sıcaklığın üzerindeki köpürtme işlemlerinde köpük stabilitesinin bozulduğu ve drenaj oluştuğu görülmüştür.

- 6- Köpük oluşumunun zamana bağlı olarak geliştiği, köpürtme sürelerinin artmasıyla yoğunluğun azaldığı belli bir süreyi aşan uygulamalarda köpük yapısının bozulmaya başladığı ve düzensiz bir hal aldığı gözlemlenmiştir.
- 7- TiH_2 'nin miktarının artmasının stabiliteye olumlu bir etkisi olmamış, hatta düzensiz gözenek yapısı oluşturmuştur. En uygun miktar 0,5% olarak gözlemlenmiştir. Farklı boyutlardaki TiH_2 tozlarıyla denemeler yapılmış, en stabil oluşum 44 μ m ile gözlemlenmiştir.
- 8- TiH_2 tozlarına ısı işlem uygulamak avantaj sağlamamış aksine köpürtme gücünü azaltmıştır.

KAYNAKLAR

Zhenlun Song, Steven R. Nutt, 2007, “Rheology of Foaming Aluminum Melts”, Materials Science and Engineering, A 458 108–115.

H.-P. Degischer, B. Krisz, 2002, “Handbook of Cellular Materials” .

M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, 2000, “Metal Foams A Design Guide”, Copyright by Butterworth-Heinemann.

F. Behrendt, J. Banhart, H. Schubert, 2006, “Characterisation and Optimisation of Blowing Agent For Making Improved Metal Foams”.

John Banhart, Denis Weaire, 2002, “On The Road Again: Metal Foams Find Favor”, Physics Today.

John Banhart, 2001, “Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams”, Progress in Materials Science, 46 559–632.

Haydn N. G. Wadley, 2002, “Cellular Metals Manufacturing, Advanced Engineering Materials” 4, No. 10.

N. Babskan, J. Banhart, D. Leitlmeier, 2002, “Metal Foams-Manufacture and Physics of Foaming”.

Evans AE, Hutchinson JW, AshbyMF., 1999, Prog Mater Sci;43:171.

Kretz R, Hombergmeier E, Eipper K., 1999, “Metal foams and porous metal structures”. In: Banhart J, AshbyMF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press-Verlag,. p. 23.

Seeliger H-W., 1997., "Metal foams." In: Banhart J, Eifert H, editors. Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams, Stanton, USA, 7–8 October. Bremen: MIT Press–Verlag, p. 79.

Seeliger H-W., 1999., "Metal foams and porous metal structures." In: Banhart J, AshbyMF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, p. 29.

Niebylski LM, Fanning RJ., 1972., "Society of Automotive Engineers", SAE Transactions. New York, USA, Paper 720490.

Siebels JE., 1999., "Metal foams and porous metal structures." In: Banhart J, AshbyMF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, p. 13.

Banhart J, Baumeister J., 1998, J Mat Sci;33:1431.

Endler F, Lahner S, Hoffmann, 1997., "M. Metallscha"ume." In: Banhart J, editor. Proc. Symp. Metallscha "ume, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, p. 117 [in German].

Siebels JE., 1999., "Metal foams and porous metal structures." In: Banhart J, AshbyMF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, p. 13.

Shinko Wire Co., 1998., Japan. Product information "Alporas".

BrayDE, StanleyRK., 1997., "Non-destructive evaluation." Boca Raton, USA: CRC Pres.

Banhart J, Baumeister J, Weber, 1996, M. Mat Sci Eng;A205:221.

Degischer HP, Kottar A., 1999., “Metal Foams and Porous Metal Structures.” In: Banhart J, AshbyMF, Fleck NA, editors. Int. Conf., Bremen, Germany, 14–16 June. Bremen: MIT Press–Verlag, p. 213.

Banhart J, Schmoll C, Neumann U In: Faria L, 1998., “editor. Proc. Conf. Materials in Oceanic Environment”, (Euromat '98), vol. 1, p. 55.

Frischmann W., 1995., European Patent Application EP 0,666,129.

Evans AE, Hutchinson JW, AshbyMF., 1999, Prog Mater Sci;43:171.

Giamei AF., 1997., “Metal foams.” In: Banhart J., Eifert H., editors. Proc. Fraunhofer USA Symposium on Metal Foams, Stanton, USA, 7–8 October. Bremen: MIT Press–Verlag, p. 63.

Schwartz DS, Shih DS, Lederich RJ, Martin RL, Deuser DA., 1998., “Porous and cellular materials for structural applications.” In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, WadleyHNG, editors. MRS Symp. Proc., vol. 521, p. 225.

Nilhan Ürkmez, 2004, “AlMg₃/SiCp kompozitlerinin üretimi ve mekanik özelliklerdeki değişimlerin incelenmesi”, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Sirong Yu, Yanru Luo, Jiaan Liu, 2007, “Effects of strain rate and SiC particle on the compressive property of SiCp/AlSi9Mg composite foams”, Elsevier, Ministry of Education, and College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China.

Lakshmi J. Vendra, Afsaneh Rabiei, 2007, “A Study on Aluminum-Steel Composite Metal Foam Processed by Casting”, Materials Science and Engineering A 465 59-67, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, North Carolina State University.

N. Babcsan, D. Leitmeier and H. P. Degischer, 2003, "Foamability of Particle Reinforced Aluminum Melt", *Mat.-wiss. U. Werkstofftech.* 34, 22-29.

S.Esmaeelzadeh, A. Simchi, 2008, "Foamability and Compressive Properties of AlSi7-3 vol.% SiCD-0.5 wt.% TiH₂ Powder Compact", *Materials Letters* 62 1561-1564 , Department of Material and Engineering, Sharif University of Technologies, Iran.

A. Rabiei, A.T. O'Neill, 2005, "A Study on Processing a Composite Metal Foam via Casting", *Materials Science and Engineering A* 404 159-164, Department of Mechanical & Aerospace Engineering, North Carolina State University.

S. Elbir, S.Yılmaz, K. Toksuy, M. Güden, 2003, "SiC-Particulate Aluminum Composite Foams Produced by Powder Compacts: Foaming and Compression Behavior", *Journal of Materials Science* 38 4745-4755, Izmir Institute of Technology, Turkey.

B.P. Neville, A. Rabiei, 2008, "Composite Metal Foams Processed Through Powder Metallurgy", *Materials and Design* 29 388-396 , of Mechanical And Aerospace Engineering, North Carolina State University.

Wang Deqing, Shi Ziyuan, 2003, "Effect of Ceramic Particles on Cell Size and Wall Thickness of Aluminum Foam", *Materials Science and Engineering A361* 45-49, Dalian Railway Institute, Dalian, Liaoning 116028, PR China.

F. Simančík, K. Behulová and L. Borš, 2001, "Effect of ambient atmosphere on the foam expansion", *International Conference MetFoam*, Institute of Materials and Machine Mechanics, SAS, Bratislava, Slovak Republic.

Alexander Dudka, Francisco Garcia-Moreno, Nelia Wanderka, John Banhart, 2008, "Structure and Distribution of Oxides in Aluminium Foam", *Acta Materialia* 56 3990-4001.

A.R. Kennedy, 2002, “The Effect of TiH₂ Heat Treatment on Gas Release and Foaming in Al–TiH₂ Preforms”, *Scripta Materialia* 47 763–767.

Yi Feng, Haiwu Zheng, Zhenganh Zu, Fanggioi Zu, 2003, “The Microstructure and Electrical Conductivity of Aluminum Alloy Foams”, Elsevier, *Materials Chemistry and Physics*, Volume 78, Issue 1, 3 February, Pages 196-201

B. Matijasevic-Lux, J. Banhart, S. Fiechter, O. Gorke, N. Wanderka, 2006, Modification of titanium hydride for improved aluminium foam manufacture, *Acta Materialia* 54 (2006) 1887–1900

[1] <http://aluminium.matter.org.uk>

[2] <http://www.gleich.de>

[3] http://www.referansmetal.com/urun_kalip.htm