T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM KOMPOZİT KÖPÜK MALZEMELERDE TAKVİYE ORANINA BAĞLI OLARAK DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

METECAN ÖZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi NİLHAN ÜRKMEZ TAŞKIN

EDİRNE-2018

Metecan ÖZEN'in hazırladığı "Alüminyum Kompozit Köpük Malzemelerde Takviye Oranına Bağlı Olarak Darbe Davranışının İncelenmesi" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri: İmza

Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKEZ TAŞKIN

Prof. Dr. Metin AYDOĞDU

Prof. Mehmet Emin YURCİ

Tez Savunma Tarihi: 25/05/2018

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Murat YURTCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

25/05/2018

Metecan ÖZEN



Yüksek Lisans Tezi

Alüminyum Kompozit Köpük Malzemelerde Takviye Oranına Bağlı Olarak Darbe Davranışının İncelenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Alüminyum köpükler sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek enerji absorbe etme potansiyeli, ses ve alev sönümleme özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin geliştirilerek daha ekonomik yöntemlerle üretilebilmesi ve daha fazla alanda kullanılabilir hale gelmesi için yapılan çalışmalarda artış görülmektedir. Otomotiv, uçak ve uzay sanayii gibi teknolojik alanlarda alüminyum köpük malzemelerin hem yapısal hem de fonksiyonel olarak geleneksel malzemelerin yerini alması, bu malzemelerin mekanik davranışlarının tam olarak anlaşılması ve kontrol edilmesine bağlıdır. Seramik parçacık takviyesi ile gözenek yapısının ve dağılımının iyileştirildiği, üretime yönelik çalışmalar literatürde mevcut olmasına rağmen alüminyum kompozit köpüklerin darbe davranışlarını inceleyen çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu çalışmada farklı oranlarda SiC parçacıkları ile takviye edilmiş kompozit alüminyum köpük malzemeler doğrudan çentik darbe testine tabi tutularak bu tür bir darbe karşısında enerji absorbe etme kabiliyeti gözlemlenmiştir.

Yıl : 2018

Sayfa Sayısı : 43

Anahtar Kelimeler : Alüminyum Köpük, Silisyum Karbür, Darbe Davranışı

Master's Thesis
Investigation of Impact Behavior of Aluminum Composite Foam Materials Dependent on Reinforcement Ratio
Trakya University Institute of Natural Sciences
Mechanical Engineering Department

ABSTRACT

Aluminum foams have begun to be used in many industrial areas due to their low density, high energy absorptive potential, sound and flame damping features. Increased work has been done to improve the mechanical and physical properties of these materials, to produce them with more economical methods and to make them more usable in the field. The technological areas such as automotive, aircraft and space industry depend on the fact that aluminum foam materials, both structurally and functionally, replace traditional materials, and that the mechanical behavior of these materials is fully understood and controlled. The number of studies examining impact behaviors of aluminum composite foams are very low, although studies on production, which are improved with pore structure and distribution by ceramic particle reinforcement, are present in the literature. In this study, SiC reinforced aluminum foam materials were subjected to direct notch impact test at different ratios to observe the ability to absorb energy in the face of such impact.

Year : 2018
Number of Pages : 43
Keywords : Aluminum Foam, Silicon Carbide, Impact Behavior

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım boyunca bana yol gösteren, bilgi ve tecrübelerini benden hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Nilhan Ürkmez TAŞKIN'a bu çalışma süresince hep destek verdiği ve yanımda olduğu için,

Değerli hocam Prof. Dr. Metin AYDOĞDU'ya tecrübeleri ile beni her zaman doğruya yönlendirdiği için,

Aileme, bu zamana kadar her konuda destek verip, beni bu günlere ulaştırdıkları için,

Sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iii

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi

ÇİZELGELER DİZİNİ vii

ŞEKİLLER DİZİNİ viii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

BÖLÜM 2

KOMPOZİT METAL KÖPÜK MALZEMELER 3

2.1. Kapalı Hücreli Metal Köpük Malzemeler 3

2.2. Kapalı Hücreli Metal Köpük Üretim Yöntemleri 4

2.2.1. Sıvı Fazda Metal Köpük Üretimi 5

2.2.1.1. Metal Ergiyiğe Gaz Enjeksiyonu 5

2.2.1.2. Köpük Yapıcı İlavesi 6

2.2.1.3. Metal-Gaz Ötektik Katılaştırma 8

2.2.2. Katı Fazda Metal Köpük Üretimi 9

2.2.2.1. Toz Sıkıştırma Yöntemi 9

2.2.2.2. Tikso Döküm 9

2.2.2.3. Köpük Yapıcı İçeren Kalıplar 11

2.2.2.4. Yanma Reaksiyonu 11

BÖLÜM 3

KOMPOZİT ALÜMİNYUM KÖPÜK MALZEMELERİN KULLANIM ALANLARI VE UYGULAMALARI 12

3.1. Kompozit Metal Köpüklerin Kullanım Alanları 12

3.1.1. Otomotiv Endüstrisi 12
3.1.1.1. Hafif Yapılar 12
3.1.1.2. Enerji Absorbe Eden Yapılar 13
3.1.1.3. Gürültüyü Absorbe Eden Yapılar 15
3.1.2. Gemi Endüstrisi 16
3.1.3. Uzay Havacılık Endüstrisi 16
3.1.4. İnşaat Sektörü 17
3.1.5. Spor Malzemeleri 17
3.2. Diğer Uygulama Alanları 18
3.2.1. Isı Değiştiriciler (Eşanjörler) 18
3.2.2. Su Arıtıcılar 18
3.2.3. Filtreler 18
3.2.4. Dekorasyon Ve Sanatsal Uygulamalar 19
3.2.5. Susturucular 19

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR 20
4.1. Malzeme Seçimi 20
4.2. Numune Hazırlama 24
4.3. Yoğunluk Ölçümü 27
4.4. Çentik Darbe Deneyi 28

BÖLÜM 5

DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA 31

BÖLÜM 6

SONUÇLAR 37
KAYNAKLAR 39
ÖZGEÇMİŞ 43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al_2O_3	Alüminyum Oksit
SiC	Silisyum Karbür
TiH_2	Titanyum Hidrür
$CaCO_3$	Kalsiyum Karbonat
CO	Karbon Monoksit
rpm	Rounds Per Minute
kW	Kilovat
J	Joule
MPa	Mega Pascal
α	Düşme Açısı
β	Yükseliş Açısı
MAM	Marmara Araştırma Merkezi
ASTM	American Section of the International Association for Testing Materials

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Al 5083 Alaşımının Kimyasal Bileşimi.....20
Çizelge 4.2. Al 5083 Alaşımının Mekanik Özellikleri 21
Çizelge 4.3. Al 5754 Alaşımının Kimyasal Bileşimi.....21
Çizelge 4.4. Al 5754 Alaşımının Mekanik Özellikleri 21
Çizelge 4.5. Al 7075 Alaşımının Kimyasal Bileşimi.....22
Çizelge 4.6. Al 7075 Alaşımının Mekanik Özellikleri 22
Çizelge 5.1. Al 5083 Alaşımlı Numunelerin Özellikleri ve Deney Sonuçları.....31
Çizelge 5.2. Al 5754 Alaşımlı Numunelerin Özellikleri ve Deney Sonuçları.....33
Çizelge 5.3. Al 7075 Alaşımlı Numunelerin Özellikleri ve Deney Sonuçları.....35

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Açık ve Kapalı Hücreli Metal Köpük 3
Şekil 2.2. Gaz Enjeksiyonu ile Üretilen Alüminyum Köpüğün Şematik Gösterimi 5
Şekil 2.3. Köpük Yapıcı Kullanarak Ergiyikten Köpük Üretimi 7
Şekil 2.4. Metal-Gaz Ötektik Katılaştırma 8
Şekil 2.5. Tikso Döküm Prosesi 10
Şekil 3.1. Düşük Ağırlığa Sahip Alüminyum Sandviç Panel 13
Şekil 3.2. Alüminyum Sandviç Panelden Üretilmiş Kaldırma Kolu 13
Şekil 3.3. Çarpışma Kutularının Kullanımı 14
Şekil 3.4. Çarpışma Kutusu Örnekleri 14
Şekil 3.5. Otomobiller İçin Köpük Dolgulu Motor Montaj Kelepçesi Örnekleri 15
Şekil 3.6. Viyadük Altında Kullanılan Metal Köpük Yapı 15
Şekil 3.7. Alüminyum Köpük Sandviçlerden Üretilmiş Prototip Roket Başlığı 17
Şekil 3.8. Metal Köpükten Isı Değiştiricisi 18
Şekil 3.9. Alüminyum Köpükten Üretilen Susturucu Örnekleri 19
Şekil 4.1. Köpük Hazırlama Ünitesi 23
Şekil 4.2. Metkon Mircacut 200 Kesim Makinası 24
Şekil 4.3. Çentik Darbe Testi İçin Gerekli ASTM E23 Standardı 24
Şekil 4.4. Köpük Numunenin Test Standartlarına Göre Ölçülendirilmesi 25
Şekil 4.5. Köpük Numunenin Kesim İşlemi 25
Şekil 4.6. Ölçüsünde Hazırlanmış Numuneler 26
Şekil 4.7. Arşimet Prensibi İle Köpük Yoğunluğu Ölçümü 27
Şekil 4.8. Zwick Marka Darbe Test Cihazı 28
Şekil 4.9. Numunenin Cihaza Yerleşimi ve 7,5 Joule'lük Çekiç 29
Şekil 4.10. Kırılma Sonrasında Göstergede Oluşan Değişim 29
Şekil 5.1. Farklı Takviye Oranlarına Sahip Al 5083 Alaşımlı Köpüğün Darbe Tokluğu Grafiği 32
Şekil 5.2. Farklı Takviye Oranlarına Sahip Al 5754 Alaşımlı Köpüğün Darbe Tokluğu Grafiği 34

Şekil 5.3. Farklı Takviye Oranlarına Sahip Al 7075 Alaşımlı Köpüğün Darbe Tokluğu Grafiği 35
Şekil 5.4. Kompozit Metal Köpüklerin Kuvvet-Tokluk Diyagramındaki Yeri 36

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Metal köpük malzemeler, yüksek özgül dayanım, yüksek gaz geçirgenliği ve yüksek termal iletkenliğin bir arada olabildiği ileri teknoloji malzemeleridir. Yüksek oranda gözenekliliğe sahip metal köpük malzemeler bu özelliklerinden dolayı çeşitli mühendislik uygulamaları için yeni bir malzeme sınıfı olmuştur. Gözenekli metal yapılar için pek çok mevcut uygulamanın yanı sıra kimyasal süreçler için ısı değiştirgeci veya filtre olarak kullanılmaları ya da otomotiv uygulamalarında darbe enerji sönümleyicisi olarak kullanılmaları gibi yeni uygulama alanları da oluşmaktadır. Metal köpükleri bu derece değerli kılan en önemli özellikleri hafif yapıları, nispeten yüksek dayanımları ve kendine özgü lineer olmayan deformasyon davranışlarıdır. (Ashby vd., 2000 / Yu, Banhart, 1997) Metal köpük malzemeler sahip oldukları bu özelliklere göre ses ve ısı yalıtımında, hafif yapılarda veya enerji sönümleme gibi diğer alanlarda da kullanılabilmektedir. Metal köpük malzemeler, polimer köpük ve ağaçların kullanılamadığı özel ortam ve sıcaklıklar gerektiren mühendislik uygulamaları için olağanüstü avantajlar sunar. (Song, Nutt, 2007)

1948 yılında Benjamin Sosnick ergittiği alüminyumu, civa ile köpürtmeye çalışmıştır. İlk olarak kapalı bir kaba koyduğu alüminyum ve civayı yüksek basınç değerlerinde ergiterek karıştırmış, sonra basıncı ortadan kaldırarak civanın buharlaşması ile birlikte köpük üretimi gerçekleştirmiştir. 1950'li yıllarda yapılan çalışmalarda alüminyum ergiyiğin içine bazı takviye malzemeleri ekleyerek sıvı fazdaki alüminyum metalinin mekanik özelliklerinde değişimler olduğu ve ayrıca daha kolay bir şekilde gözenek oluştuğu gözlemlenmiştir. (O'Neill, 2004) Bu yıllarda William Elliott yaptığı çalışmalar ile alüminyum metalini köpürtme yöntemi geliştirmiştir. O zamanlarda kullanılan gaz enjeksiyonu ile köpük üretimi ve bir karıştırıcı yardımıyla ergiyiğe gaz salarak köpük üretme yöntemleri günümüzde de hala kullanılmaktadır. (Özer, 2005) 1960'lı yıllarda

mekanik özellikleri anlamında yüksek kaliteye sahip metal köpük malzemeler üretilmiştir. O dönemdeki enerji kaynakları, günümüzde olduğu kadar önemsenmeyip, sınırsız gözüyle bakıldığından bu tarz bir malzemeye olan ilgi azalmaya başlamış ve 1970'li yıllardan sonra metal köpük üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar git gide azalmıştır. (Babscan, Banhart, 2006)

1980-1990 yıllarında tekrardan metal köpük ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. 1950'lerde geliştirilen toz metalurjisi ile köpük üretme yöntemi bu yıllarda yeniden gündeme gelmiş ve yöntem üzerinde çeşitli geliştirmeler yapılmıştır. Günümüzde ise tüm bu yöntemler ile birlikte farklı köpük üretim yöntemleri de geliştirilmeye devam etmektedir. (Banhart, Weaire, 2002)

Günümüzde artık alüminyum köpük üreten firma sayısı ile birlikte kompozit metal köpüklerin kullanım alanlarında da artış olmaktadır. Ayrıca metal köpüklerin mekanik özelliklerini geliştirmek ve köpüğün üretim sürecini daha güvenilir hale getirmek için yapılan çalışmalar hızla artmaktadır.

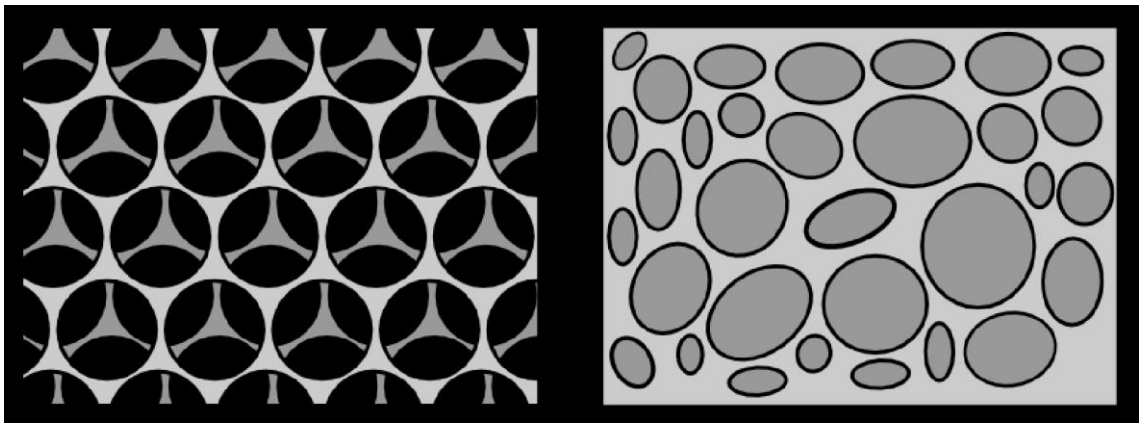
Kompozit alüminyum köpükler, alüminyum köpüklere nazaran çok daha homojen hücre dağılımına ve dayanımı yüksek hücre duvarlarına sahip olup, artan takviye oranlarıyla mekanik dayanım özellikleri değişmektedir. Bu çalışmada alüminyum köpük malzemelerin darbe davranışlarının araştırılması amacıyla üç farklı alaşımdan üretilen ve farklı oranlarda SiC takviyesi ile farklı yoğunluğa sahip kompozit alüminyum köpük malzemeler darbe testine maruz bırakılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

BÖLÜM 2

KOMPOZİT METAL KÖPÜK MALZEMELER

2.1. Kapalı Hücreli Metal Köpük Malzemeler

Hücresel yapılı malzemeler, içinde gaz barındıran ve katı veya sıvı bir malzeme ile etrafı sarılmış, gözenekleri arasında bağlantı olan ya da birbirlerinden yalıtılmış olan yapılardır. Açık hücreli köpüklerde gözenekler arasındaki boşluklar bağlantılı iken kapalı hücreli köpüklerde gözenekler arasında bir bağlantı bulunmamaktadır. Şekil 2.1'de açık ve kapalı hücreli metal köpükler gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Açık ve Kapalı Hücreli Metal Köpük (Demirhan, 2010)

Metalik köpükler, metal malzemeye sıvı veya yarı katı halde iken bazı işlemler uygulanması ile meydana gelir. Kimyasal olarak doğal köpüklere benzememelerine rağmen dış görünüşleri ve çeşitli özelliklerinden dolayı "metalik köpük" diye adlandırılırlar (Çinici, 2004).

Gaz baloncukları olarak bilinen köpüklerin geometrik yapıları sıvının katılaştırılması ile korunur. Literatürde metalik köpük terimi aslında katı köpüğü temsil etmektedir ve hücresel katı olarak bilinmektedir. Hücresel katıların sıvı fazda üretilmesi zorunlu olmamakla birlikte, farklı üretim yöntemleri ile değişik köpük özellikleri elde edilebilir (Demirhan, 2010).

Metalik köpüklerin hücresel yapısında yaklaşık olarak % 70 – 90 arasında gözenek hacmi bulunmaktadır. Köpürtme sırasında genellikle malzeme özellikleri etkilenmez. Ancak, takviye malzemesi ile yapılan köpürtme işlemi sonucunda köpüğün özelliklerinde önemli değişimler görülebilmektedir.

Metalik köpüğün özellikleri önemli ölçüde gözenekliliğine bağlıdır yani köpük yoğunluğu değiştirilerek, istenilen özelliklerde bir malzeme oluşturulabilir. Bu malzemenin bazı önemli özellikleri şunlardır;

- Yanmaya karşı dayanıklıdır, çabuk tutuşma oluşmaz ve zehirli gaz açığa çıkarmaz.
- Geri dönüşümlü bir malzeme olduklarından çevre dostudur.
- Büyük çarpışmalarda enerji absorbe etme özelliğine sahiptir.
- Ses ve titreşim sönümleme ile ısı ve elektromanyetik iletkenliği engelleme konularında verimli bir yapıya sahiptir (Simancik, 2001).

2.2. Kapalı Hücreli Metal Köpük Üretim Yöntemleri

Kapalı hücreli metal köpükler üretimleri esnasında eş zamanlı olarak katı, sıvı ve gaz fazlarında bulunabilirler. Kapalı hücreli metal köpükler için günümüzde çeşitli üretim yöntemleri mevcuttur. Malzemelerin hücresel yapısını geliştirmek ve aynı zamanda üretim yöntemlerini daha güvenilir ve tekrarlanabilir yapmak için, sıvı metallerin köpük kararlılığı sağlanmalı, mekanik özellikleri anlaşılabilir olmalı ve kontrol edilebilmelidir.

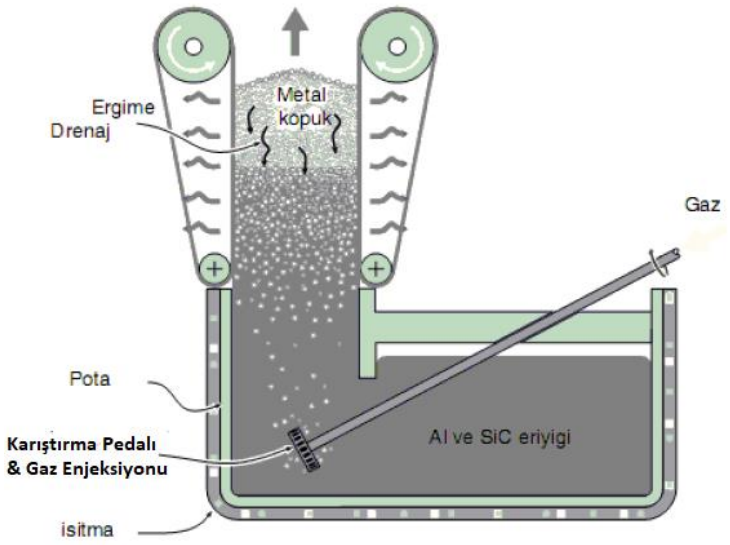
Metal köpük üretiminde katı hal ve sıvı hal olmak üzere iki ana yöntem kullanılmaktadır. Toz metalürjisi yöntemi, katı hal köpürtme yöntemi oldukça iyi bir yöntemdir. Sıvı halde köpürtme yöntemleri ile karşılaştırıldığında bu yöntemin daha güvenilir olduğu görülmektedir ancak takviye malzemesinden dolayı maliyeti arttırmaktadır (Song, Nutt, 2007).

Sıvı fazdan metal köpük üretimi için, metal ergiyiğe gaz enjekte etme, ergiyik metale gaz salan köpük yapıcı malzeme ekleme ve sıvı içinde çözünmüş olan gazdan köpük elde etme olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmaktadır (Babscan, Banhart, Leitlmeier, 2003).

2.2.1. Sıvı Fazda Metal Köpük Üretimi

2.2.1.1. Metal Ergiyiğe Gaz Enjeksiyonu

Alüminyum eriyiğin viskozitesini arttırmak için az ve yavaş çözünen alüminyum oksit veya silisyum karbür gibi partiküller %10-%30 oranında ergiyiğe eklenir. Metal ergiyiğe gaz enjeksiyon yöntemi alüminyum alaşımlarına en iyi şekilde uygulanmaktadır. Çünkü alüminyum alaşımları hava veya oksijen içeren çeşitli gazlara maruz kaldıklarında fazla oksitlenmezler. Saf alüminyum ya da alaşımlarına %5-%15 aralığında alümina, zirkona, silisyum karbür ve TiH_2 gibi çeşitli partiküller eklenir. Sıvı alüminyumda kabarcık oluşturmak için karbondioksit, oksijen, hatta su bile kullanılabilir (Ashby vd., 2000 / Babscan vd., 2003).



Şekil 2.2. Gaz Enjeksiyonu ile Üretilen Alüminyum Köpüğün Şematik Gösterimi (Çağlar, 2009)

Şekil 2.2.'de de görüldüğü gibi hava enjekte edilmesi ile kabarcıklar ergiyik yüzeyine doğru yükselir, hücre duvarlarının ara yüzeylerindeki katı seramik parçacıklarının varlığı ise sıvı köpük oluşumunu stabilize eder. Dengelenmiş sıvı köpük mekanik olarak ergiyik yüzeyine taşınır ve soğutularak katı köpük oluşumu sağlanır. Alüminyum köpük üretimi için geliştirilen teknolojilerle, köpüğün mekanik ve fiziksel özelliklerinin hücre duvar malzemesi ve köpük içindeki hacimsel katı oranının yanı sıra hücre geometrisinden de büyük oranda etkilenmesi yapılan araştırmalar ile tespit edilmiştir. Hava enjeksiyonu ile alüminyum köpük üretiminde, köpürtme odası boyutları ve şekli, katı parçacıkların büyüklüğü ve hacimsel oranı, köpürme sıcaklığı, hava enjeksiyon hızı, pervane hızı ve dizaynı gibi çeşitli değişkenler ile hücre boyutları ve duvar kalınlıkları kontrol edilir (Deqing, Xiangjun, Weiwei, Ziyuan, 2006).

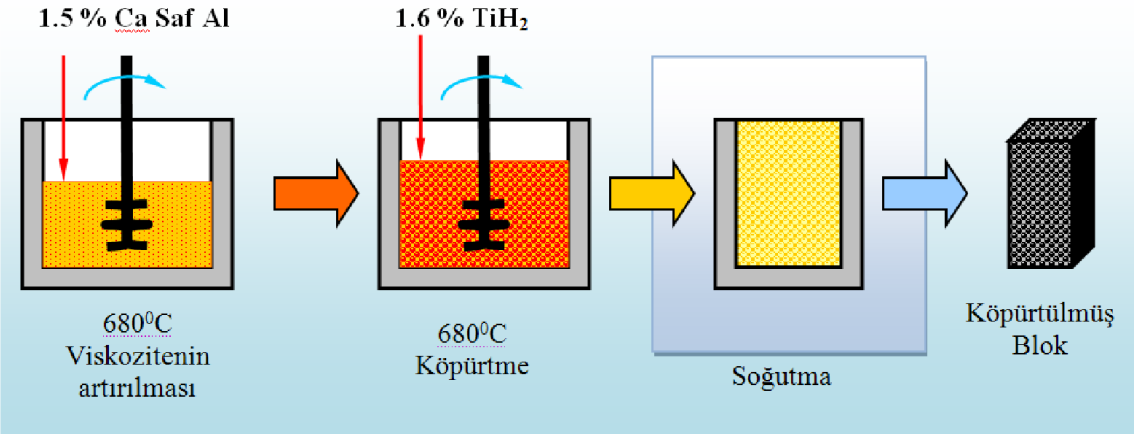
Köpürtülen malzemede istenilen şekli sağlayabilmek için köpürtme işleminin bitmesi beklenmelidir. İçeriğinde bulunan seramik parçacıklar yüzünden köpüklerin işlenmesinde çeşitli sorunlar ortaya çıkabilir. Bu yöntemin en büyük avantajı düşük yoğunluklu köpüklerin sürekli olarak üretilebilmesidir. (Banhart, 2005)

2.2.1.2. Köpük Yapıcı İlavesi

Sıvı fazda metal köpürtme işlemi için kullanılan yöntemlerden bir diğeri de ergiyiğe köpük yapıcı eklemektir. Köpük yapıcılar belirli bir sıcaklıkta, bileşiminde bulunan gazı difüzyon vasıtası dışarı salar (Banhart, 2005).

Şekil 2.3.'te görüldüğü gibi üretimin ilk kısmında 680 ^{0}C sıcaklıktaki ergiyiğe % 1.5 oranında kalsiyum ilave edilir. Oksit oluşana kadar ergiyik birkaç dakika karıştırılır. Daha sonra köpük yapıcı işlevi görerek çevreye hidrojen gazı salınımı yapacak olan %1.6 oranındaki TiH_2 ergiyiğe eklenir. Ergiyik yavaşça genleşmeye başlar ve köpürme işlemi 15 dakika sonra tamamlanmış olur. Son olarak soğutma işlemi ile birlikte köpük kalıptan çıkarılır.

Köpük yapıcı olarak $CaCO_3$ kullanılır ise gözenek boyutları daha küçük olur ancak TiH_2 kullanarak üretilen köpüğün yoğunluğuna benzer sonuç verir (Babscan vd., 2003).



Şekil 2.3. Köpük Yapıcı Kullanarak Ergiyikten Köpük Üretimi (Banhart, 2001)

Bu tarz yöntemlerde ergiyik alüminyum alaşımında en iyi şekilde köpük oluşturabilmek için genellikle %10-30 oranlarında seramik parçacıklar eklenir. Bu ergiyiğe gaz püskürtme yapılarak homojen dağılıma yakın köpük üretimi gerçekleştirilebilmesine rağmen sert parçacıkların bulunması köpüğü işlemede veya geri dönüşümde çeşitli problemler ile karşılaşılabilir (Haesche, Weise, Garcia, Banhart, 2008).

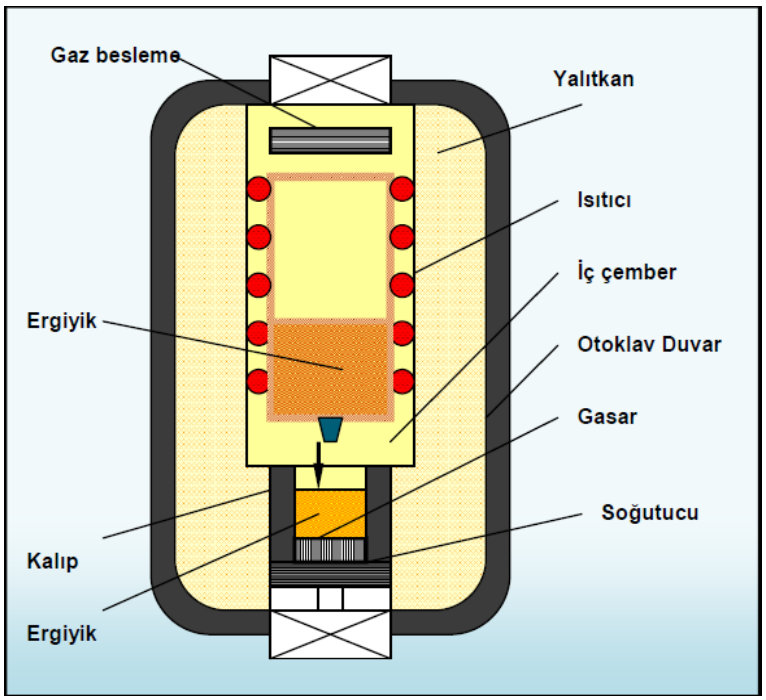
Viskozitesi arttırılmış alüminyum ergiyiğe köpük yapıcılar eklenerek de alüminyum köpük üretilebilir. Bu tarz durumlarda ergiyiğe kalsiyum eklenerek viskozite kontrol altına alınabilir. Bu yöntemde saf alüminyum 700°C 'ye kadar ısıtılarak ergitilir ve saf kalsiyum ergiyiğe eklenip karıştırılarak viskoz hale gelmesi sağlanır. Viskozite kritik değere geldiğinde karışıma köpük yapıcılar ilave edilir. Ergiyik hızlı bir şekilde karıştırılarak tozların homojen karışımı sağlanır. Köpük yapıcıların içindeki gaz ayrışana kadar karışım fırın içinde tutulur ve ayrışma ile birlikte gözenekli yapı oluşmaya başlar. Köpürme işlemi tamamlandıktan sonra ergiyik fırından çıkartılır ve katılaşması için soğutulur (Song, Zhu, Ma, He, 2001).

Köpürme sürecinin ilk kademesi gaz emülsiyondur. Bu süreçte ergiyikteki gözeneklerin hacmi ve boyutları küçük olur. Yaş kademede ergiyik içindeki gözenekler başlangıca göre daha büyüktür ve köpük boyutları büyüktür. Hücreler küresel bir yapıdadır ve rastgele dizilirler. Kuru kademe süresinde köpük hücresel bir yapıya sahiptir ancak zamanla zayıflar. Köpük yapıcıların bozunması, gözeneklerin parçalanması veya sıcaklık değerlerinin değişmesi gibi küçük gibi görünen değişiklikler hücresel yapı üzerinde

büyük sonuçlar verebilir hatta yapının tamamen çökmesine sebep olabilir. Köpük yapıcılardaki gaz ise bu çökmeyi önlemektedir. Kuru periyot alüminyum köpüğün son yapısı için çok önemlidir. Kuru kademede gözenek oluşumu iyi bir şekilde sağlanırsa ve köpüğün çökmesini önlemek için köpük yapıcıların soğuma tamamlanmadan bitmesi engellenirse alüminyum köpük üretimi için istenen homojen yapı sağlanabilmiş olur (Song vd., 2001).

2.2.1.3. Metal-Gaz Ötektik Katılaştırma

Katı fazdaki metalden gaz ayrışması prensibine dayanan bu metot 21. yüzyılın başlarında geliştirilmiştir. Şekil 2.4.'te olduğu gibi ilk olarak ergiyik yüksek basınçta hidrojen veya azot gibi gazlar ile yüklenir. Sıcaklık seviyesi metalin ergime noktasından daha düşük bir seviyeye indiğinden gaz yoğunlaşmış olur. İstenilen şartlar sağlandığı takdirde gaz baloncukları metalin içine hapsolur. Gözeneklerin yapısı; gazın kimyasal bileşimi, ergiyiğe uygulanan yüksek basınç, ısı yönü ile oranı ve ergiyiğin kimyasal bileşimine bağlıdır. Gözenek çapı 10µm ile 10mm, gözenek boyu 100µm ile 300mm ve gözeneklilik % 5 ila 75 arasında değişim gösterebilmektedir (Babscan vd., 2003).



Şekil 2.4. Metal-Gaz Ötektik Katılaştırma (Banhart, 2001)

2.2.2. Katı Fazda Metal Köpük Üretimi

2.2.2.1. Toz Sıkıştırma Yöntemi

Katı fazda metal köpük üretim yöntemlerinden biri olan toz metalürjisi yönteminde metal tozlar ile köpük yapıcı tozlar karıştırıldıktan sonra sıcak presleme, ekstrüzyon veya toz haddeleme ile sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Bu şekilde köpürmeye hazır, yarı bitmiş bir ürün oluşur. Bu ürün, ergime noktasının üstüne ısıtılarak genleştirilir. Isıtma sırasında metal yarı sıvı, viskoz bir hale gelir ve köpük yapıcılar ayrışır. Çevreye salınan gaz gözenekli bir yapı oluşumuna neden olur (Duarte, Banhart, 2000).

Metal tozları ve köpük yapıcılar tozların karıştırılması ile üretim süreci başlar, ardından karışım sıkıştırılarak yarı bitmiş bir ürün meydana gelir. Köpük yapıcılar ile metalin karışımı, hiçbir boşluk kalmadan sağlandığı sürece farklı yöntemler uygulanabilir (Banhart, 2005).

Eş eksenli veya izostatik basma, çubuk ekstrüzyon veya toz haddeleme, toz sıkıştırma yöntemlerine örnektir. Sıkıştırma işleminin gerçekleşmesinin ardından malzeme ergitilir ve köpük yapıcıların bozunması sağlanır. Gaz salınımı ile gözenekli bir yapı meydana gelir. Tam genleşmenin tamamlanması için gereken zaman, sıcaklığa ve prekursör boyutlarına bağlıdır. Alüminyum ve alaşımları, çinko, kalay, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı alaşımlar köpürtücü ajan ve diğer parametrelerin uygun seçilmesi ile köpürtülebilir (Babscan vd., 2003).

Toz metalürjisi ile köpük üretiminde karışıma metal olmayan parçacıklar eklemek sıkıştırmayı kötü etkilemez ve ayrıca da stabilizasyonu arttırır (Haesche vd., 2008).

2.2.2.2. Tikso Döküm

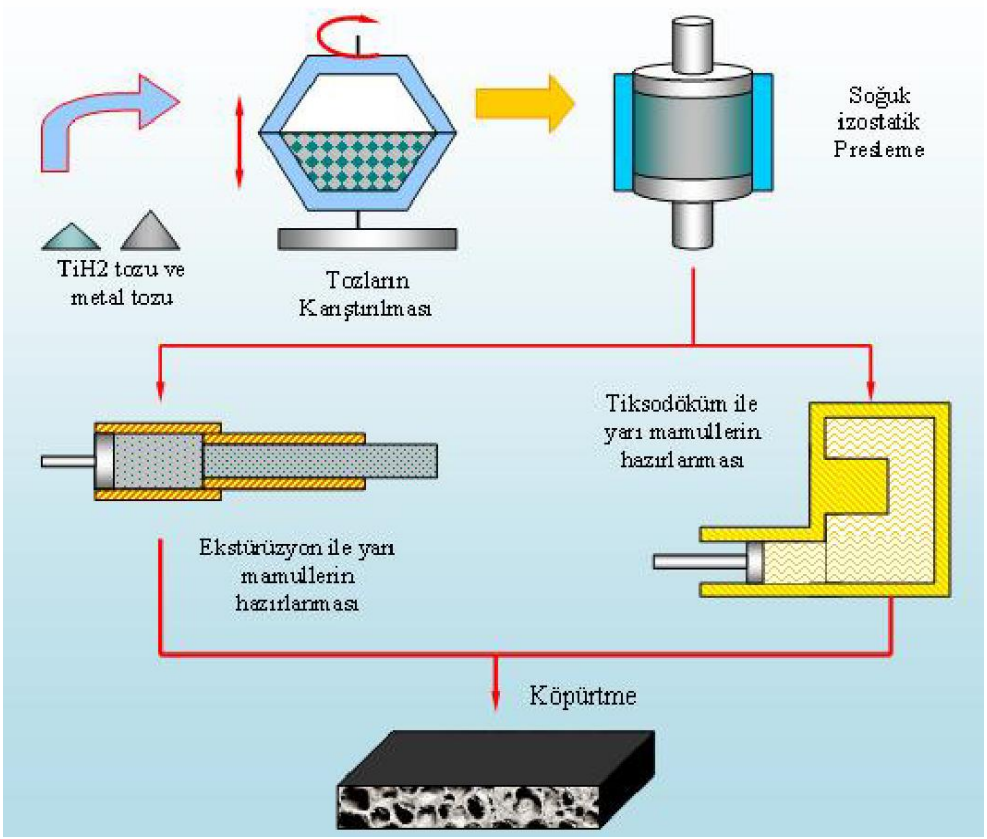
Toz metalürjisi ile yapılan metal toz karışımını sıkıştırma işlemi yerine, tikso döküm ile de sıkıştırma yapılabilir. Bu toz karışım için yapılması gereken öncelikle soğuk izostatik presleme ile yoğunlaştırılmış kütükler oluşturulmasıdır. Oluşturulan kütükler alaşımın yarı katı halde olduğu sıcaklık değerlerine ısıtılır ve kalıplara dökümü yapılır. Meydana gelen malzeme tekrardan ergitilir ve köpürtülür. Bu yöntemin, toz sıkıştırma metotlarına

göre farkı ve avantajı döküm sırasında izotropik bir hücresel yapı elde edilmesi ile birlikte üniform bir gözenek yapısı oluşturmasıdır (Babscan vd., 2003).

Tikso döküm yönteminin aşamaları şu şekildedir;

- Toz halindeki metaller, SiC, TiH_2 ve Al gibi köpük yapıcılar ile karıştırılır
- Elde edilen karışımdan soğuk izostatik sıkıştırma ile silindirik kütükler oluşturulur
- Kütükler karışımın yarı katı halde olduğu sıcaklığa ısıtılır
- Yüksek basınçlı kalıplarda tikso döküm işlemi yapılır
- Köpürtme işlemi gerçekleştirilir
- Malzeme kalıptan çıkarılır ve temizlenir (Weise, Stanzick, Banhart, 2003).

Prekursör köpürtme ile malzeme üretimi, toz metalürjisi ve ergiyik köpürtme yöntemlerinin özelliklerini içerir. Geleneksel toz metalürjisi yöntemi tozların karışımı ile başlar ancak üretim sürecinde yarı katı bir hale dönüşür. Köpük stabilizasyonunu en basit şekle indirgemek için seramik parçacık ilavesi yapılabilir (Haesche vd., 2008).



Şekil 2.5. Tikso Döküm Prosesi (Weise vd., 2003)

Tikso döküm yöntemiyle hücresel yapılı malzemeler köpürtülürken SiC veya Al_2O_3 gibi takviye malzemeleri ekleyerek köpürme daha başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Takviye malzemeleri karışıma eklendiğinde bu malzemeler hücre duvarlarına tutunurlar ve duvarların dayanımının sağlamlaşmasına yardımcı olurlar (Haesche, 2008).

Tikso döküm yöntemi ile hücresel yapılı malzemelerden metal köpük üretimi, karmaşık yapılı parçalar üretilmesine olanak tanır ve ayrıca izotropik yapı elde edilmesini sağlar. Bu yöntemi en iyi şekilde kullanabilmek için malzemelerin ve karışımın ergime sıcaklıkları ile döküm sırasındaki işlemlerin iyi bilinmesi gereklidir (Weise vd., 2003).

2.2.2.3. Köpük Yapıcı İçeren Kalıplar

Metal tozlar kullanmadan köpürebilen alüminyum hücresel yapılı malzeme hazırlamak mümkündür. TiH_2 parçacıkları ergimiş metale ekledikten sonra soğumaya bırakılır. Karışım gerçekleştirilirken beklenenden önce ortama hidrojen açığa çıkmaması için katılaşma hızlı olmamalıdır. Ayrıca köpük yapıcıların erkenden gaz salması engellenmelidir (Babscan vd., 2003).

TiH_2 tozlarının ergiyiğe yavaş karıştırma ile eklenmesi ve sonrasında yapılan soğutma işlemi ile hidrit parçacıkların etrafında oksit tabakası oluşması sağlanır. İyi bir köpük elde edebilmek için belirli oranda SiC takviyesi yapılabilir (Babscan vd., 2003).

2.2.2.4. Yanma Reaksiyonu

Bir Al-Ni alaşımlı köpük, titanyum veya titanyum karbürün Al ve Ni ile karıştırılması sonucu üretilebilir. Karışım ve ardından yapılan sıkıştırma işleminden sonra malzeme alüminyumun erime sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtıldığında ortama ısı veren reaksiyon oluşur. Yüzeyde meydana gelen oksit-hidrit karışımı, malzemenin köpürmesini sağlayacak gaz meydana getirir ve %85'in üzerinde gözenekliliğe sahip bir köpük elde edilir (Babscan vd., 2003).

BÖLÜM 3

KOMPOZİT ALÜMİNYUM KÖPÜK MALZEMELERİN KULLANIM ALANLARI VE UYGULAMALARI

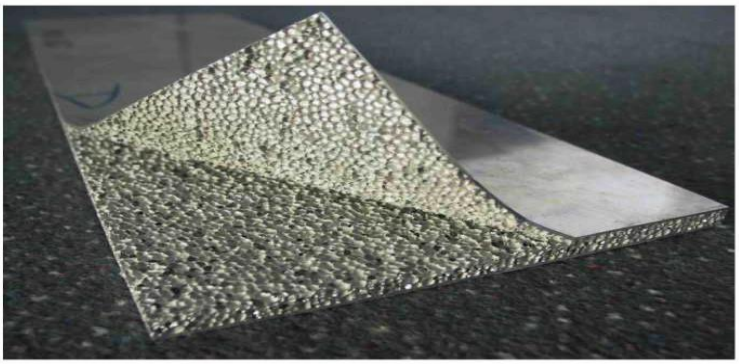
3.1. Kompozit Metal Köpüklerin Kullanım Alanları

Sahip olduğu birçok özellikten dolayı metal köpükler günümüzde farklı sektörlerde, çeşitli alanlarda kullanılmakta olup, bu kullanım alanlarının sayısı da gün geçtikçe artmaktadır.

3.1.1. Otomotiv Endüstrisi

3.1.1.1. Hafif Yapılar

Araçlarda hız ve performans konularında yapılabilecek en önemli iyileştirmelerden biri düşük ağırlığa sahip malzemeler kullanmaktır. Alüminyum köpük ve sandviç köpük panellerden üretilen hafif katı yapılar araç ağırlığını azaltır ve tokluğu arttırır. Tokluk ve ağırlık, motor blokları, bagaj kapakları, açılır tavan gibi yapılarda temel bir sorundur. Bu sandviç köpük paneller mevcut arabalardaki orijinal çelik panellere göre yaklaşık 10 kat daha sağlam ve %25 oranında daha hafiftir. (Çağlar, 2009) Şekil 3.1'te alüminyum sandviç yapı, şekil 3.2'de ise sandviç yapının kullanım alanlarından biri görülmektedir.



Şekil 3.1. Düşük Ağırlığa Sahip Alüminyum Sandviç Panel (Banhart, Weaire, 2002)

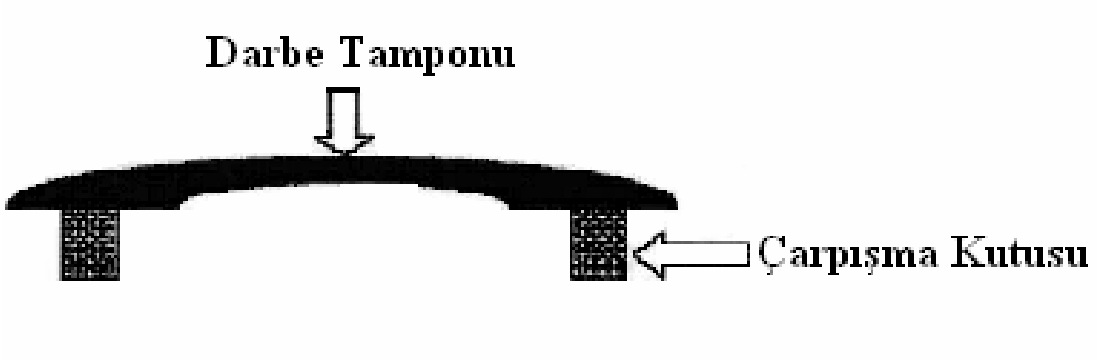


Şekil 3.2. Alüminyum Sandviç Panelden Üretilmiş Kaldırma Kolu (Banhart, 2005)

3.1.1.2. Enerji Absorbe Eden Yapılar

Alüminyum köpüklerin otomotiv endüstrisindeki uygulamalarına bir diğer örnek crash box olarak da bilinen çarpışma kutuları (emicileri)'dır. Otomotiv sektörünün önde gelen firmaları araç içindeki yolcuların güvenliğini sağlamak ve aracın en önemli unsuru olan motor bloğunu korumak amacıyla araçlarında meydana gelebilecek hasarı azaltmak ve maddi olarak da tamir masraflarını en aza indirgemek için çeşitli çalışmalar yapmışlar ve bu çalışmalar sonucunda da çarpışma kutularını keşfetmişlerdir. Bu crash box'lar aracın darbe aldığı ön tampon ile ön korkuluk arasında bulunurlar. 15 km/s hızda giden bir araç darbeye maruz kalırsa bu çarpışma kutuları darbenin tüm enerjisini absorbe ederek

deforme olurlar ve ayrıca arabanın şasesinde meydana gelebilecek bir hasarı engellerler. Şekil 3.3'te çarpışma kutularının araçlardaki kullanım yeri gösterilmiştir (Banhart, 2003).



Şekil 3.3. Çarpışma Kutularının Kullanımı (Banhart, 2003)

Çarpışma kutuları, alüminyum ekstrüzyon veya çelik bir dış yapının içerisine köpük malzemenin yerleştirilmesi ile oluşur. İçerisinde alüminyum köpük bulunan bu kutular, içi boş çarpışma kutularına göre çok daha fazla enerji absorbe etme özelliğine sahiptirler.

Plastik çökmeye maruz kalan ve enerjiyi sönümleyen içi boş tüpler, alüminyum köpük ile doldurulduğunda malzemelerin enerji sönümleme özelliği geliştirilir. (Banhart, 2003) Şekil 3.4'te çarpışma kutularının örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Çarpışma Kutusu Örnekleri (Banhart, 2003)

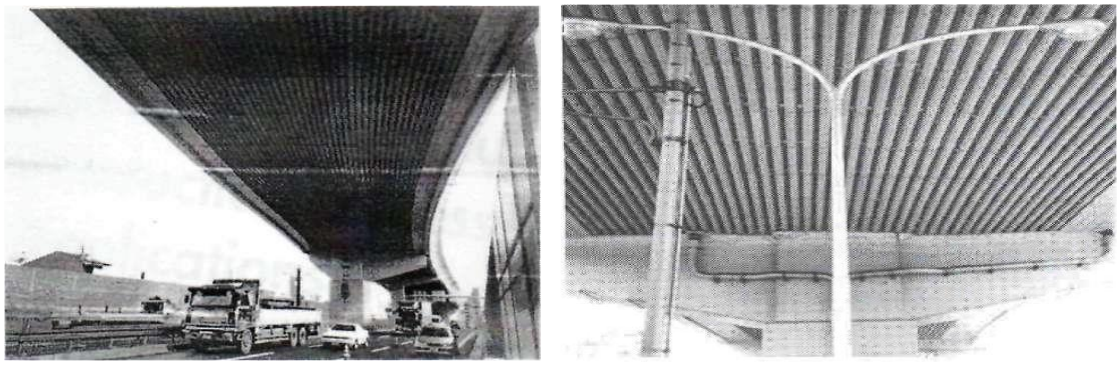
LKR ve BMW firmaları tarafından yapılan, içi alüminyum köpük ile doldurulmuş motor montaj kelepçeleri Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Otomobiller İçin Köpük Dolgulu Motor Montaj Kelepçesi Örnekleri (Banhart, 2003)

3.1.1.3. Gürültüyü Absorbe Eden Yapılar

Gürültü emilimi ve yalıtımı otomotiv endüstrisinde önemlidir. Bunun sağlanması için ise çok iyi ses yalıtımına sahip alüminyum köpükler kullanılmaktadır. Şekil 3.6'da bir viyadüğün altına serilmiş metal köpüklerin, viyadük altından geçen araçların yarattığı gürültüyü absorbe ettiği gösterilmiştir (Miyoshi, Itoh, Akiyama, Kitahara, 2000).



Şekil 3.6. Viyadük Altında Kullanılan Metal Köpük Yapı (Miyoshi vd., 2000)

3.1.2. Gemi Endüstrisi

Gemi sanayiinde düşük ağırlığa sahip malzemelerin kullanımı oldukça önemlidir. Gemiler genellikle alüminyum ekstrüzyon, levha ve bal peteği yapılarından oluşmaktadır. Alüminyum köpükten üretilmiş sandviç paneller gemilerde hafif ve yüksek dayanım elde edebilmek için poliüretan yapıştırıcılarla birlikte kullanılırlar. Gemi endüstrisinde metal köpükler; gemi bölmelerinde, anten platformları ve fişek ambarları gibi alanlarda kullanılmaktadır (Banhart, 2001).

3.1.3. Uzay Havacılık Endüstrisi

Metal esaslı kompozit köpüklerin uzay havacılık alanında kullanılmasının nedeni otomotiv sektörüyle benzerdir. Uzay havacılık endüstrisinde metal köpükler hafif yapı ve yüksek dayanımlarından dolayı kullanılmaktadır. Dünya genelindeki helikopter üreten çeşitli firmalar alüminyum sandviç panelleri helikopterlerin kuyruk kısımları başta olmak üzere pek çok farklı parçaların yerine kullanmaktadır.

Sandviç metal köpük paneller uzay havacılık endüstrisinde kullanılan pahalı bal petek yapıların yerini almaya adaydır. Alüminyum metal köpükler uzay mekiklerinin iniş takımlarında, enerjiyi absorbe eden çarpışma malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Şekil 3.7'de uzay endüstrisinde kullanılmak üzere geliştirilmiş alüminyum köpük sandviçten imal edilen roket başlığı gösterilmiştir (Banhart, 2003).



Şekil 3.7. Alüminyum Köpük Sandviçlerden Üretilmiş Prototip Roket Başlığı (Banhart, Seeliger, 2008)

3.1.4. İnşaat Sektörü

Hafif olmaları, katılıkları ve yangına dayanıklılıklarından dolayı metal köpükler inşaat sektöründe de kullanılmaktadır. Aynı özellikleri sahip bal petek yapılar metal köpüklere kıyasla daha pahalı ve ayrıca ağırdırlar. Günümüzde asansörlerde hafiflik ve hızlı ivmelenme önemlidir. Asansörlerde köpürtülmüş sandviç yapılar kullanmak gövde ağırlığını azaltmanın yanında enerji tüketiminin azaltılmasına da yardımcı olur. Ayrıca darbe sönümleme ve yangın dayanıklılığının olması da metal köpük kullanılmış asansörlerde güvenilirliği arttırmaktadır (Banhart, 2003).

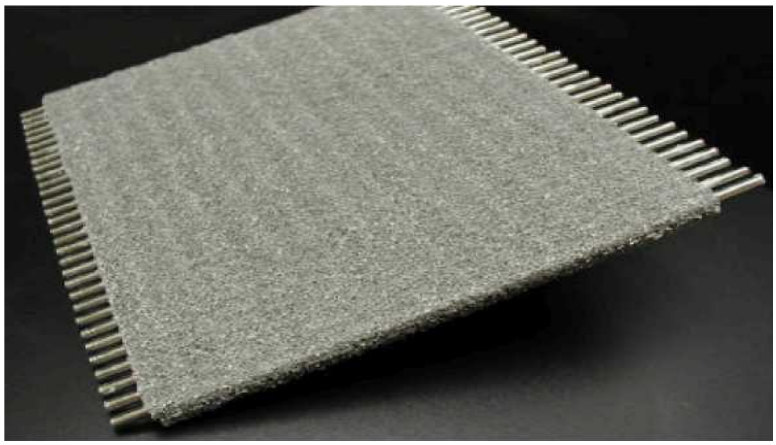
3.1.5. Spor Malzemeleri

Köpük malzemeler bu sektör için fazla maliyetli olmasına rağmen çeşitli kullanım alanları vardır. Örneğin futbolcular için tekmelik yapımında iyi enerji emiliminden dolayı alüminyum köpük kullanımı bulunmaktadır (Banhart, 2001).

3.2. Diğer Uygulama Alanları

3.2.1. Isı Değiştiriciler (Eşanjörler)

Açık hücreli köpüklerin ısıyı iletme özellikleri yüksek olduğu için ısı değiştiricisi olarak kullanılabilirler. Kapalı hücreli metal köpüklerin ise ısı iletim özellikleri düşüktür ve soğutma radyatörleri olarak kullanılmaktadır. (Banhart, 2001) Şekil 3.8'de metal köpük ile çevrelenmiş ısı değiştiricisi gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Metal Köpükten Isı Değiştiricisi (Degischer, Kristz, 2002)

3.2.2. Su Arıtıcılar

Köpük metaller, suda çözünmüş olan ancak istenmeyen iyonların konsantrasyonunu azaltmak için kullanılabilir. Su, açık hücreli köpük metal yapı içerisinden dökülür. İyonlar ve hücresel yapı, redoks reaksiyonuyla tepki gösterir (Banhart, 2003).

3.2.3. Filtreler

Alüminyum köpük malzemeler filtre olarak kullanıldığında bir katıyı sıvı veya gazdan ya da iki sıvıyı birbirinden ayırabilmek mümkündür (Banhart, 2000).

3.2.4. Dekorasyon Ve Sanatsal Uygulamalar

Mekanik özellikleri iyileştirmek için (dayanım, ses ve enerji sönümleme vb.) alüminyum köpükler süslü mobilyalar, saatler, lambalar gibi dekoratif eşya alanlarında da kullanım olanağı bulmuştur. Ayrıca her yerde görülen klasik eşyalara kıyasla dizayn anlamında da fark yaratıp şık ve modern bir hava kattıkları için de kullanılmaktadır (Banhart, 2003).

3.2.5. Susturucular

Koprasörler için kullanılan pnömatik aletlerde gürültüyü azaltmak için, Şekil 3.9'da örneği görülen susturucular kullanılabilmektedir (Degischer, Kristz, 2002).



Şekil 3.9. Alüminyum Köpükten Üretilen Susturucu Örnekleri (Banhart, 2000)

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzeme Seçimi

Bu tez çalışması kapsamında farklı takviye oranlarına sahip üç farklı alüminyum alaşımına sahip köpük kullanılmıştır. Kullanılan alüminyum alaşımları, Al 5083, 5754 ve 7075 alaşımları olup, köpük yapıcı olarak %0,5 TiH_2 kullanılarak hazırlanmış % 0, 5, 10, 15 ve 20 oranlarında SiC takviyesi içeren kompozit köpüklerdir.

Al 5083 alaşımı, Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi yüksek oranda Mg içermesinden dolayı yüksek kaynak kabiliyeti ve korozyon dayanımına sahip olmakla birlikte yorulma dayanımı da oldukça fazladır.

Çizelge 4.1. Al 5083 Alaşımının Kimyasal Bileşimi (SEYKOÇ)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer
0.40	0.40	0.10	0.40-1.0	4.0-4.9	0.25	0.05-0.25	0.15	0.15

Diğer alüminyum alaşımlarına kıyasla akma ve çekme mukavemetleri de kimyasal bileşiminde sahip olduğu elementlerin oranlarından dolayı fazladır. Çizelge 4.2'de Al 5083 alaşımı için üç farklı temperleme işlemi ile oluşan mekanik özellikler gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Al 5083 Alaşımının Mekanik Özellikleri (SEYKOÇ)

Temper	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Sertlik (brinel) min-max
0/H111	125-145	275-300	70-75
HX2	205-240	310-330	85-90
HX4	270-275	340-360	100

Al 5754 alaşımı, Çizelge 4.3'de görülen kimyasal bileşime sahip olmakla birlikte Al 5083 alaşımından farklı olarak içeriğinde daha fazla saf alüminyum bulundurmaktadır. Korozyon dayanımı, yorulma dayanımı ve kaynak kabiliyeti yüksek bir alüminyum alaşımıdır.

Çizelge 4.3. Al 5754 Alaşımının Kimyasal Bileşimi (SEYKOÇ)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0.40	0.40	0.10	0.50	2.6-3.6	0.20	0.30	0.15	0.15	Kalan

Çizelge 4.4'te Al 5754 alaşımına ait akma, çekme mukavemetleri ile sertlik değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.4. Al 5754 Alaşımının Mekanik Özellikleri (SEYKOÇ)

Temper	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Sertlik (brinel) min-max
0/H111	80-100	190-215	50-55
HX2	130-185	220-245	65-70
HX4	160-215	240-270	73-75

Çizelge 4.5'te Al 7075 alaşımına ait kimyasal bileşim verilmiştir. Bu tabloda diğer alaşımlardan farklı olarak içerdiği Zn oranının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu alaşımın yorulma dayanımı yüksek olmasının yanında yüksek sertlik değerlerine de kolayca erişebilmektedir.

Çizelge 4.5. Al 7075 Alaşımının Kimyasal Bileşimi (SEYKOÇ)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Zi+Ti	Diğer	Al
0.50	0.50	1.2-2.0	0.3	2.1-2.9	5.1-6.1	0.18-0.28	0.25	0.15	Kalan

Al 7075 alaşımına ait mekanik özellikler Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Tabloda ilk göze çarpan kısım ise Al 7075 alaşımının diğer alaşımlara göre daha kolay sertlik oranını arttırabilmesidir.

Çizelge 4.6. Al 7075 Alaşımının Mekanik Özellikleri (SEYKOÇ)

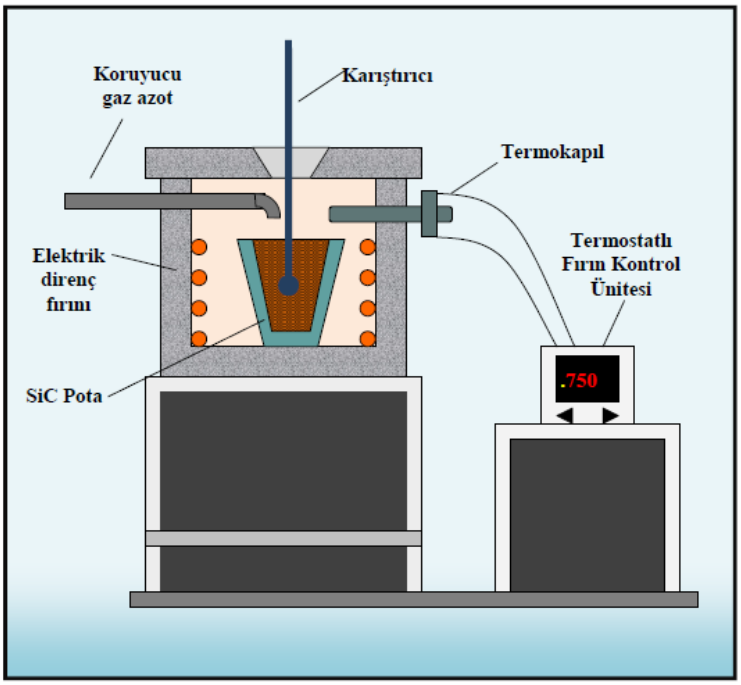
Temper	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Sertlik (brinel) min-max
0	105	225	60
T6	460-505	530-570	140-160
T7	435	505	140

Köpürtücü ajan olarak kullandığımız TiH_2 bileşimindeki titanyum, çok yüksek derecede ısıya dayanıklıdır (1650 ^{0}C). Yorulmaya ve bükülmeye karşı çok dayanıklı olan titanyum ayrıca oldukça hafif bir metaldir. Bu özelliklerinden dolayı köpük üretimi esnasında yüksek sıcaklığa sahip fırın içine TiH_2 girdiğinde titanyum sıcaklıktan etkilenmez iken hidrojen o sıcaklıklarda gaz olarak ayrışarak köpürme meydana getirmektedir.

Farklı takviye oranlarında alüminyum alaşımlarına eklediğimiz SiC, oldukça sert, aşınma direnci yüksek ve yüksek sürünme direncine sahiptir. Bileşimindeki silisyum ve

karbür elementleri doğada oldukça fazla bulunmasından dolayı tungsten karbürden daha ucuzdur.

Alüminyum köpüklerin üretildiği numune hazırlama ünitesi; ergitme fırını, karıştırma aracı, pota, azot tüpü ve kontrol sistemlerinden oluşmaktadır. Bu ünite; sıcaklık kontrolü, ergitme hızı kontrolü, azot gazı koruyucu atmosferi, ergiyik gözetleme ve karıştırma penceresi, 1200^0C sıcaklık ve 2 kW güce sahiptir. Şekil 4.1'de yarı katı köpük üretiminin gerçekleştirildiği alüminyum köpük hazırlama ünitesi gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Köpük Hazırlama Ünitesi (Demirhan, 2010)

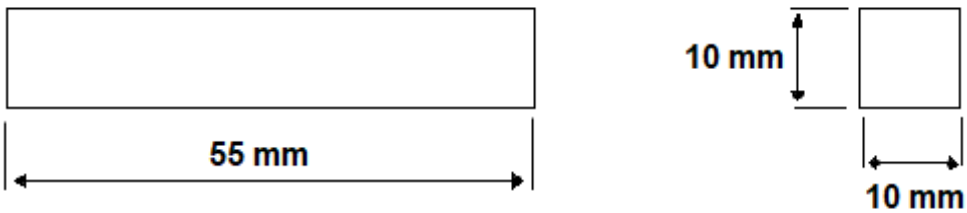
Alüminyum alaşımlarından elde edilen köpüklerin dayanım özellikleri endüstriyel ortamdaki uygulamalarda kullanım için düşüktür. Bu alaşımlara çeşitli oranlarda takviye malzemeleri eklenerek (silisyum karbür, alümina gibi) karakteristik özelliklerini değiştirir ve bu sayede köpüğün dayanımı arttırılır. (Gui,2000)

4.2. Numune Hazırlama

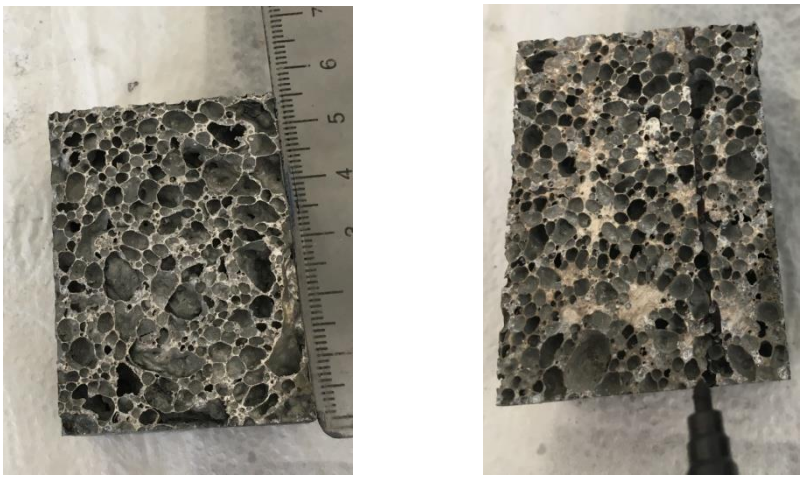
Yarı – katı karıştırma yöntemi ile üretilen SiC takviyeli alüminyum köpükler Şekil 4.2'deki Metkon marka Micracut 200 model numune kesme cihazı ile hazırlanmıştır. Şekil 4.3'te gösterilen Charpy darbe testinin ASTM E23 standardı modifiye edilerek her bir numuneden üçer adet kesilmiştir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.2. Metkon Mircacut 200 Kesim Makinası

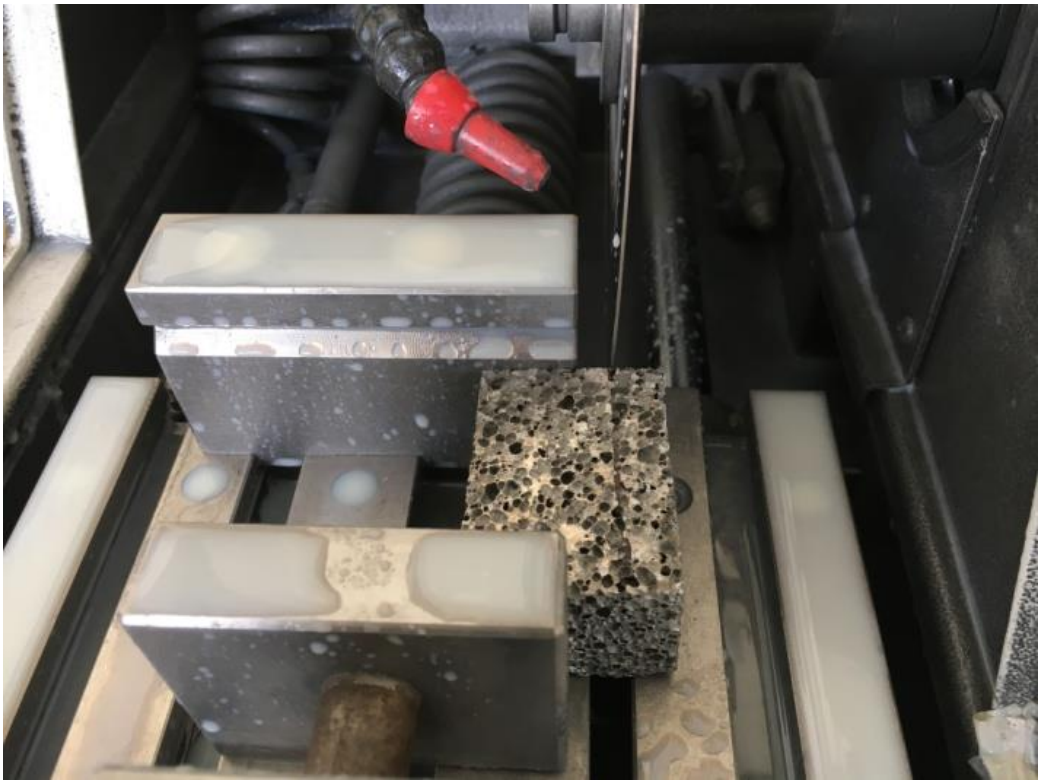


Şekil 4.3. Çentik Darbe Testi İçin Gerekli ASTM E23 Standardı



Şekil 4.4. Köpük Numunenin Test Standartlarına Göre Ölçülendirilmesi

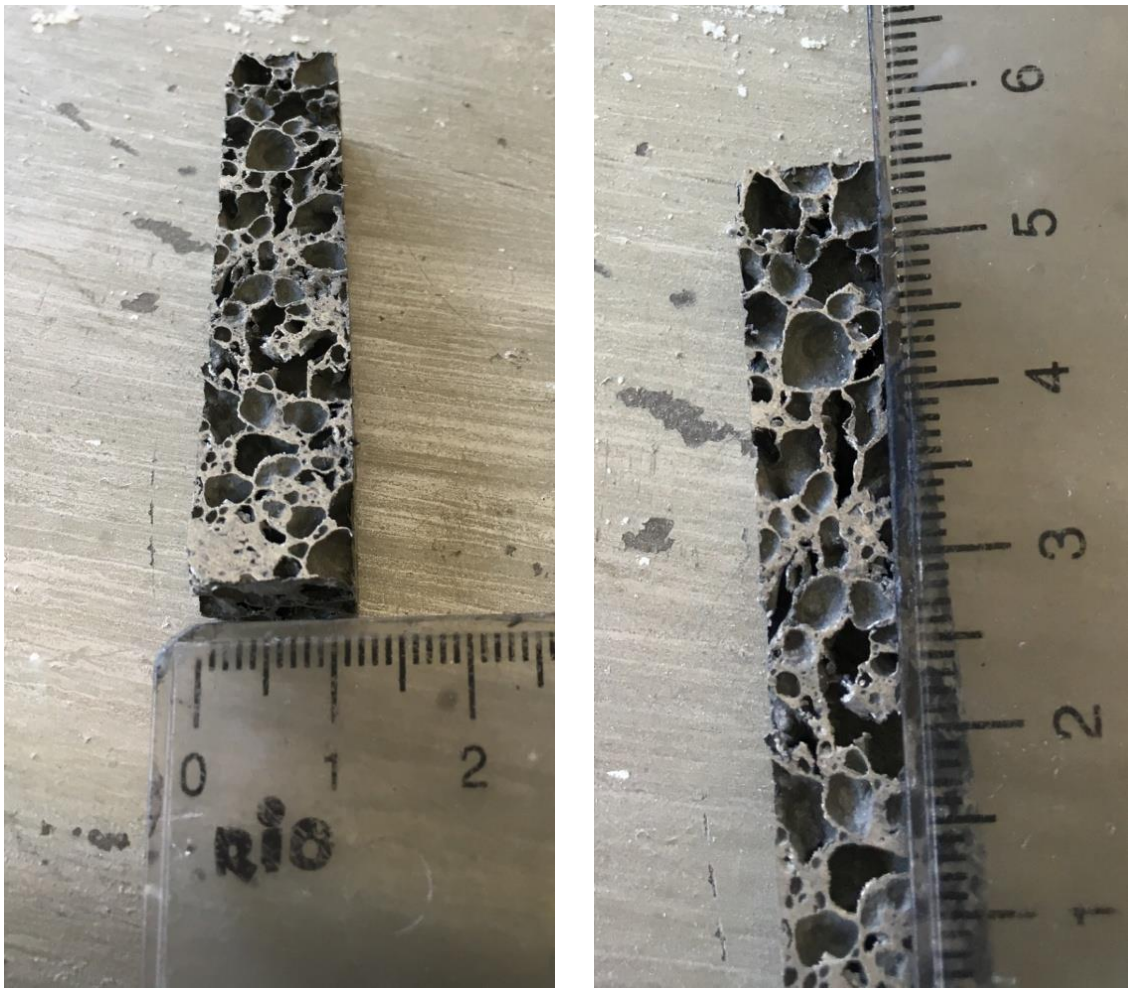
ASTM E23 standardına uygun olarak ölçülendirilen numunenin kesim işlemi şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Köpük Numunenin Kesim İşlemi

Kesim işlemi sırasında diskin dönüş hızının ayarı çok önemlidir. Kesilen numunenin cinsine göre diskin dönüş hızı ayarlanması gerekir. Alüminyum kompozit köpükler için, disk dönüş hızı malzemenin içerdiği takviye oranının artışı ile ters orantılı olacak şekilde düşmektedir. SiC katılmamış (takviyesiz) bir numunenin kesimi 120 rpm hız ile (dakikada 120 dönüş) gerçekleştirilirken, içinde %20 SiC olan bir numuneyi kesmek için makineyi 40 hatta 30, 20 rpm'lere kadar düşürmek gerekmektedir. Aksi takdirde numune ve disk zarar görmektedir.

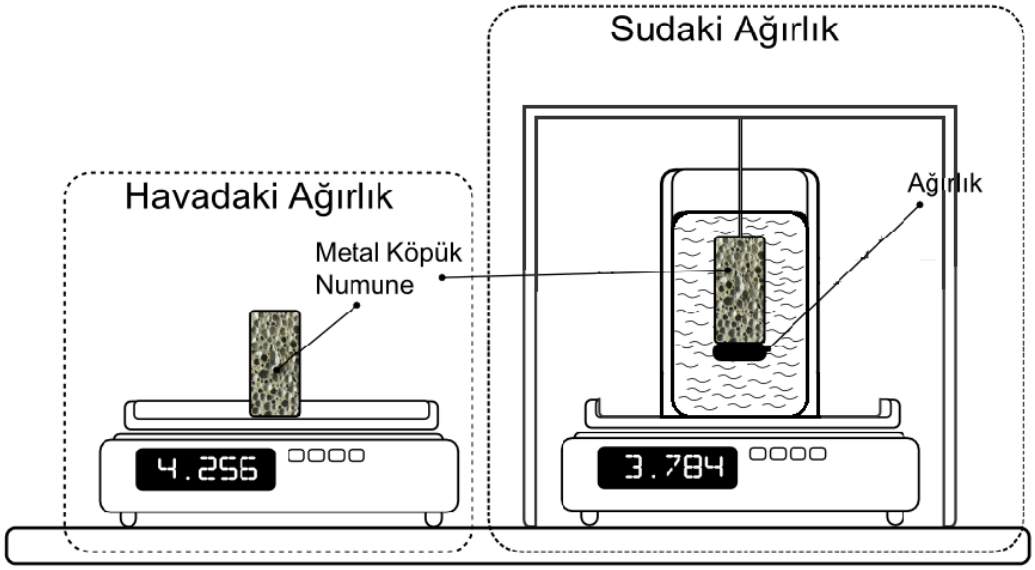
Kesilmiş numuneler Şekil 4.6'da gösterilmiş olup, ASTM E23 standardına uygun numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 4.6. Ölçüsünde Hazırlanmış Numuneler

4.3. Yoğunluk Ölçümü

Numunelerin yoğunluklarını hesaplamak için Arşimet Prensibinden yararlanılmıştır. Arşimet Prensibine göre numunelerin havadaki ve sudaki ağırlıkları bilindiği takdirde sıvının kaldırma kuvvetini hesaplanabilir. Numunelerin havadaki ve sudaki ağırlıkları Şekil 4.7'deki gibi bir düzenek yardımıyla hesaplanmıştır. Sudaki ağırlıklarını hesaplarken ilk olarak numunelerin suya batmasına yardımcı olacak bir cisim belirlenip, bu cismin sudaki ağırlığı hesaplanmıştır. Ardından numuneler bu cisim ile birlikte suya batırılmış ve böylelikle numunelerin sudaki ağırlıkları bulunmuştur.



Şekil 4.7. Arşimet Prensibi İle Köpük Yoğunluğu Ölçümü

Arşimet Prensibine göre;

Kaldırma kuvveti = Cismin havadaki ağırlığı – Cismin sudaki ağırlığı

$$F_k = G_{hava} - G_{sıvı} \quad (4.1.)$$

formülü ile her bir numuneye etki eden kaldırma kuvveti hesaplanmıştır.

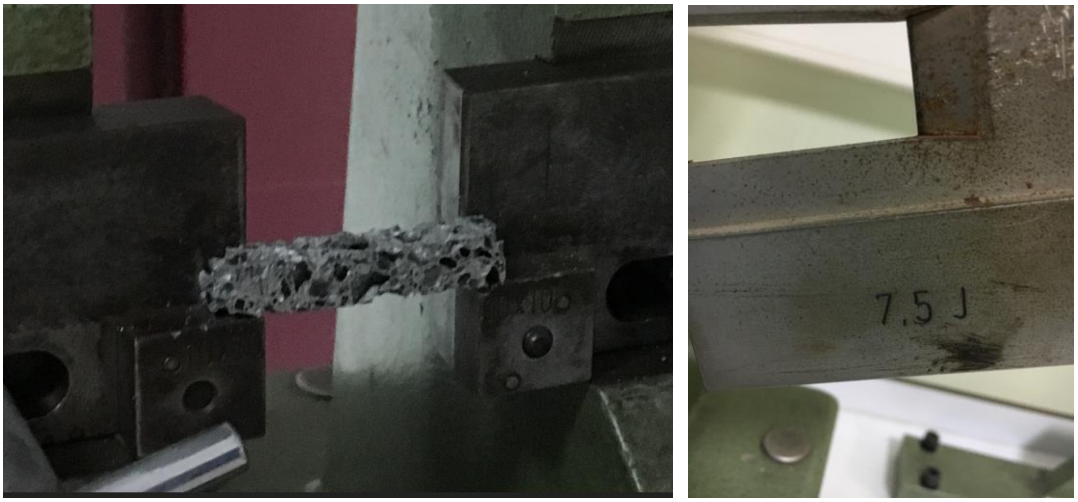
4.4. Çentik Darbe Deneyi

Numunelerin yoğunluk hesaplaması yapıldıktan sonra Tubitak Marmara Araştırma Merkezi (MAM)'da çentik darbe testi yaptırılmıştır. Şekil 4.8'deki kalibrasyon kontrolleri yapılmış, Zwick marka masaüstü çentik darbe testi cihazına 7,5 Joule'lük çekiç takılarak yapılmıştır. Değerlendirmede kullanılacak olan hava sürtünme katsayısı çekicin numuneye çarpmadan boş olarak salınımı ile ölçülmüş olup 0,25 Joule olarak saptanmıştır.



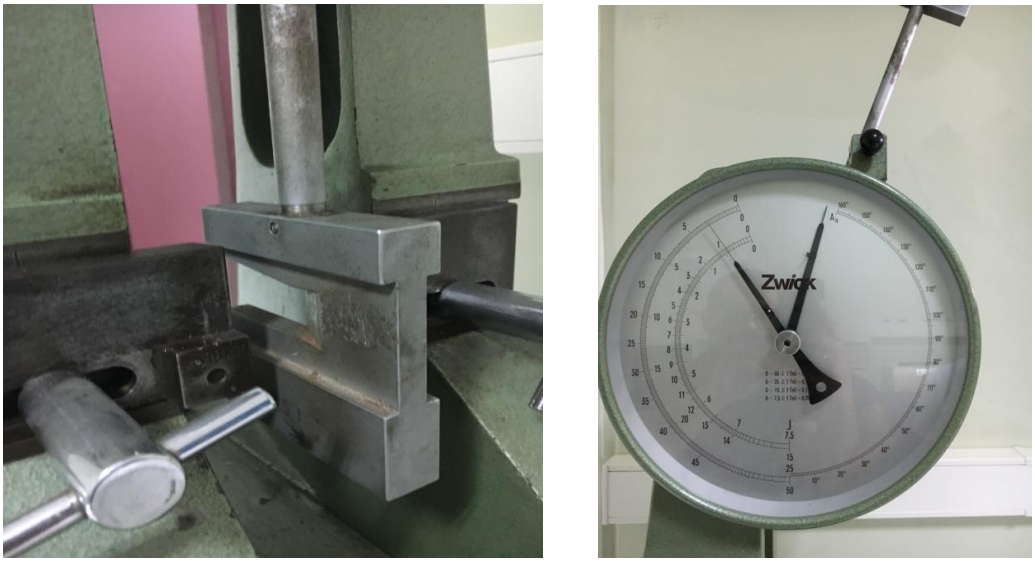
Şekil 4.8. Zwick Marka Darbe Test Cihazı

Hava sürtünme katsayısı bulunduktan sonra, Al 5083'e ait % 0, 15 ve 20'lik SiC takviyesine sahip numuneler, her birinden üçer adet olmak üzere sırasıyla test cihazına yerleştirilerek kırılmaları için sarf edilen enerjileri hesaplanmıştır. Aynı işlemler Al 5754'ün % 0, 5, 10, 15 ve 20'lik SiC takviyesine sahip numuneleri ile Al 7075'e ait %10 ve %20'lik SiC takviye oranına sahip numuneleri için de gerçekleştirilmiştir. Testin yapılmasına ilişkin görseller Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Numunenin Cihaza Yerleşimi ve 7,5 Joule'lük Çekiç

Çekicin numuneye çarpması sonucunda oluşan darbe enerjisini hesaplamak için göstergede okunan değerden havadaki sürtünme kaybı (0,25 J) çıkarılarak bulunmuştur. Tüm numuneler aynı işlemlerden geçirilerek hepsine ait darbe enerjileri Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Kırılma Sonrasında Göstergede Oluşan Değişim

Sarkacın, numune ile temas haline geldiği andaki potansiyel enerji ile numune kırıldıktan sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji farkı, o numunenin kırılması için gereken enerjiyi başka bir deyimle, darbe direncini verir.

Köpüklerin darbe mukavemetlerini hesaplayabilmek için charpy darbe testi sırasındaki kırılma alanlarının bilinmesi gerekmektedir. Gözenekli bir yapıya sahip bu köpüklerin kesit alanlarını hesaplarken alüminyum alaşımlarının 2,7 g/cm^3 yoğunluğa sahip olduğu bilinmeli ve köpük malzemelerin kendi yoğunlukları ile alüminyum alaşımlarının yoğunluğu karşılaştırılarak kesit alanındaki gözenek boşluklarının yüzdesi yaklaşık bir değerle hesaplanabilmektedir.

Örneğin; 2,7 g/cm^3 yoğunluğa sahip alüminyum alaşımının kesit alanı %100'dür. 0,703 g/cm^3 yoğunluğa sahip 1 no'lu takviyesiz Al 5083 alaşımlı köpüğün kesit alanı ise yaklaşık %26'lık bir doluluğa sahip olup %74'ünü gözenek boşlukları oluşturmaktadır. Sonuç olarak kenar ölçülerinin çarpımının %26'sı 1 no'lu numunenin kesit alanı olmaktadır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

Farklı oranlarda SiC takviyesine sahip üç farklı alüminyum alaşımı için yapılan darbe testi sonuçları incelenmiştir. Al 5754 alaşımına ait verilerde, darbe enerjilerinin diğer alüminyum alaşımlarına oranla daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda Al 5754 alaşımı ile yapılmış olan SiC takviyeli köpükler, diğer alaşımlar ile yapılan köpüklere göre daha fazla enerji absorbe özelliğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Al 7075 alaşımlarına ait numunelerin test sonuçlarına bakıldığında, Al 5083 ve 5754 alaşımlarına ait numunelerin darbe enerjilerinin, Al 7075 alaşımına ait numunelerinkinden daha fazla olduğu görülmektedir.

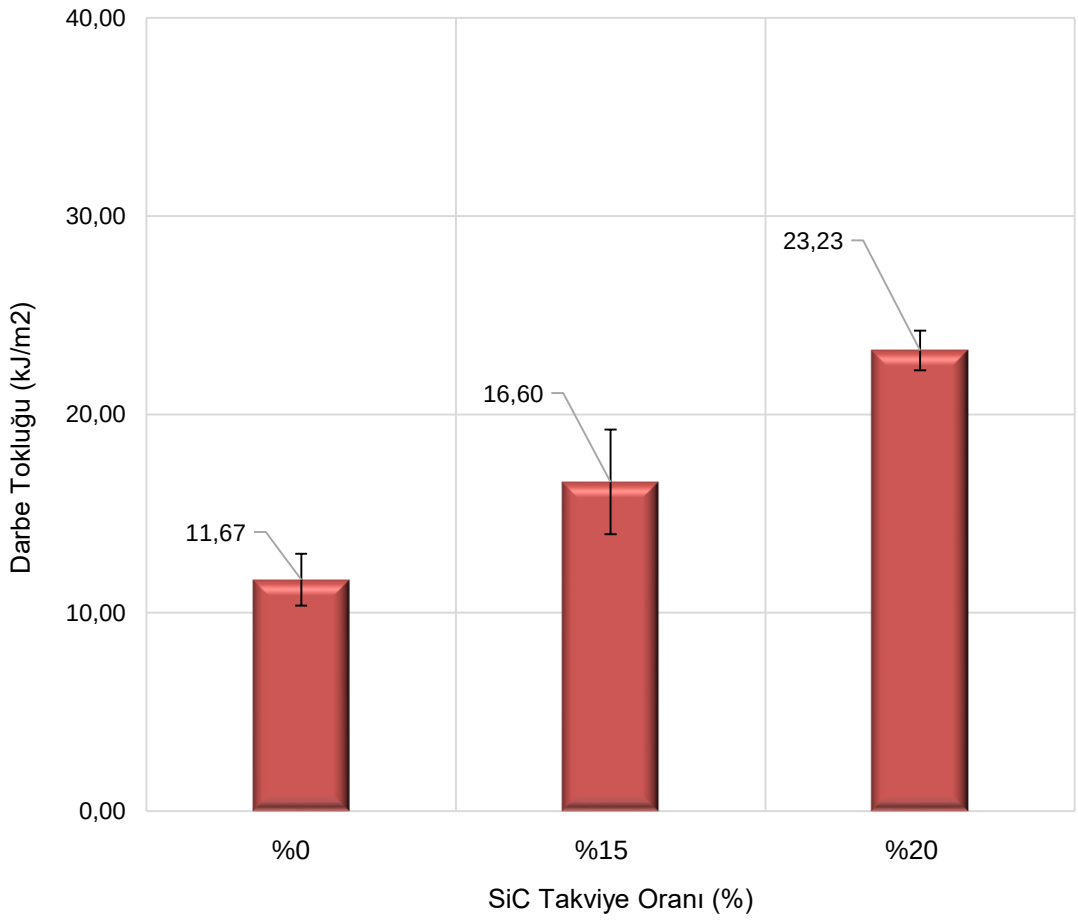
Al 5083 alaşımlı köpüklere ait özellikler ve test sonuçları Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Al 5083 Alaşımlı Numunelerin Özellikleri ve Deney Sonuçları

Numune No.	SiC Takviye Oranı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Kesit Alanı (mm^2)	Darbe Enerjisi (Joule)	Darbe Tokluğu (kJ/m^2)
1	0	0.703	34.1642	0.45	13.1717
2	0	0.559	22.6832	0.25	11.0214
3	0	0.593	23.1217	0.25	10.8124
4	15	0.731	28.6949	0.55	19.1672
5	15	0.784	29.8941	0.50	16.7257
6	15	0.778	28.7807	0.40	13.8982
7	20	0.440	14.9053	0.35	23.4816
8	20	0.544	24.9170	0.60	24.0799
9	20	0.633	27.1139	0.60	22.1289

Takviyesiz ve %20 SiC takviyeli Al 5083 alaşımı köpükler ve absorbe ettikleri enerji miktarları incelendiğinde, genel olarak yoğunluk arttıkça absorbe edilen enerji miktarının da arttığı görülmüştür. %15 SiC takviyeli köpüklerde ise böyle bir sonuca varılamamıştır. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde kırılma kesitindeki boşluk oranının fazla olduğu durumlarda köpük malzeme yoğunluğu fazla olsa bile o numunenin daha az enerki absorbe ederek kırıldığı gözlemlenmiştir.

%15 ve %20 SiC takviyeli Al 5083 alaşımlı köpükler ile takviyesiz Al 5083 alaşımlı köpüklerin darbe enerjileri 0,25-0,6 J değer aralığında değiştiği, darbe tokluklarının ise 10-25 kJ/m^2 değerleri arasında olduğu yapılan çalışmada ortaya konmuştur. Al 5083 alaşımlı köpüklerin darbe toklukları Şekil 5.1'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Farklı Takviye Oranlarına Sahip Al 5083 Alaşımlı Köpüğün Darbe Tokluğu Grafiği

Al 5754 alaşımlı farklı takviye oranlarına sahip köpüklerin özellikleri ve test sonuçları Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

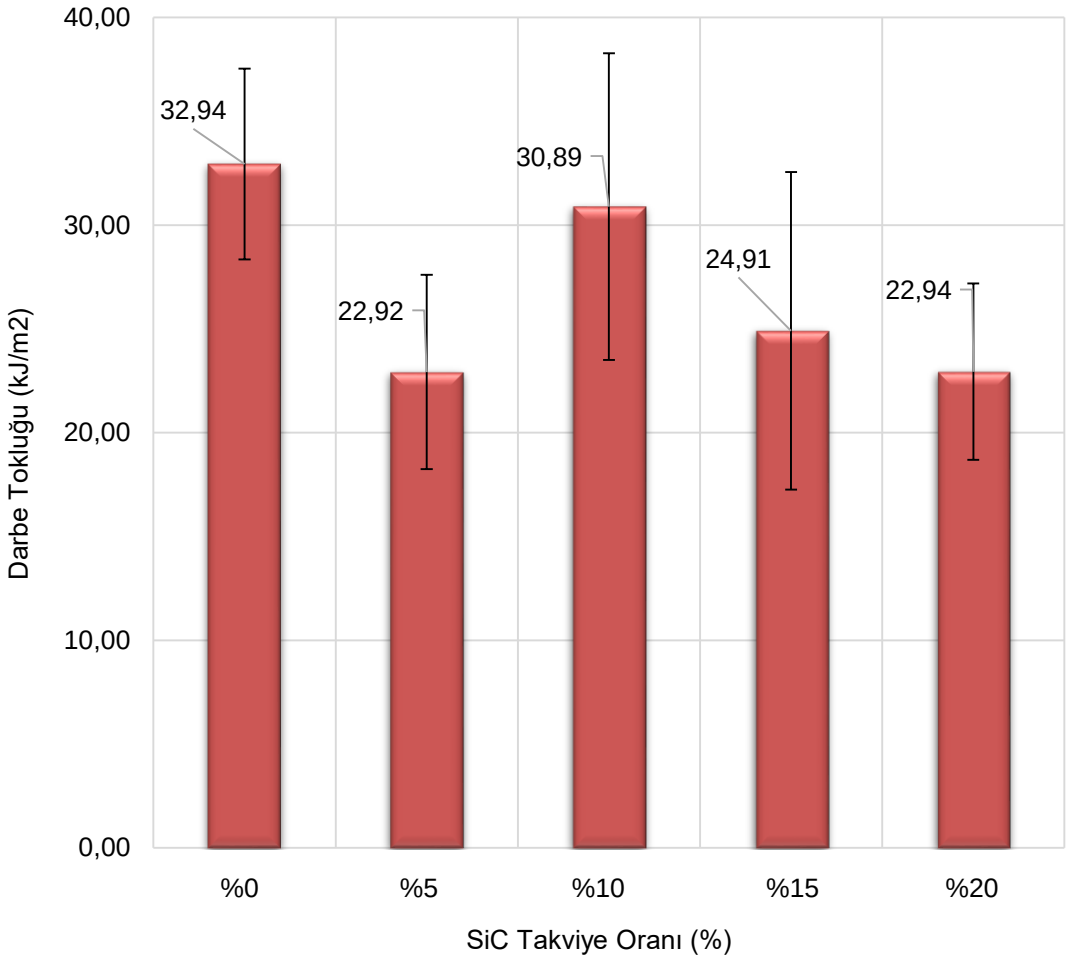
Çizelge 5.2. Al 5754 Alaşımlı Numunelerin Özellikleri ve Deney Sonuçları

Numune No.	SiC Takviye Oranı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Kesit Alanı (mm^2)	Darbe Enerjisi (Joule)	Darbe Tokluğu (kJ/m^2)
10	0	0.886	38.8153	1.15	29.6275
11	0	0.958	47.1358	1.80	38.1875
12	0	0.811	33.8673	1.05	31.0034
13	5	0.662	25.8673	0.55	21.2624
14	5	0.891	35.4508	1.00	28.2081
15	5	0.664	31.0973	0.60	19.2943
16	10	0.642	24.5286	0.60	24.4612
17	10	0.573	23.1014	0.90	38.9587
18	10	0.495	17.0878	0.50	29.2606
19	15	0.735	30.1766	0.90	29.8244
20	15	0.643	22.5695	0.65	28.7999
21	15	0.625	21.7401	0.35	16.0993
22	20	0.633	25.1329	0.70	27.8519
23	20	0.721	29.2279	0.60	20.5283
24	20	0.612	24.4543	0.50	20.4463

Al 5754 alaşımı köpükler incelendiğinde benzer olarak yoğunluk arttıkça absorbe edilen enerji miktarının da arttığı görülmüştür. Yoğunluk olarak aynı numunenim hacmi içerisinde homojen gözenek boyut ve dağılımı çok hassas olarak sağlanamadığından dolayı kırılma olayı gözenek yoğunluğunun fazla olduğu kesitlerde gerçekleşmiştir. Örneğin; 16 nolu %10 SiC takviyeli numunenin yoğunluğu, 17 nolu numuneden daha fazla olmasına rağmen daha az enerji absorbe ederek kırılmıştır. Bunun sebebi 16 nolu numunenin kırılma kesitinde büyük gözenek boşluğu bulunmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

%20'ye kadar SiC takviye oranlarına sahip Al 5754 alaşımlı köpük numunelerin darbe enerjileri 0,35-1,80 Joule arasında olduğu söylenebilmektedir. Darbe toklukları ise 16-38 kJ/m^2 aralığında değişkenlik gösterdiği sonucuna varılmaktadır.

Al 5754 alaşımlı köpüklerin darbe tokluklarındaki dalgalanma Şekil 5.2'deki grafikte görülmektedir.



Şekil 5.2. Farklı Takviye Oranlarına Sahip Al 5754 Alaşımlı Köpüğün Darbe Tokluğu Grafiği

Al 7075 alaşımlı %10 ve %20 SiC takviye oranına sahip köpük numunelerin özellikleri ve test sonuçları Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

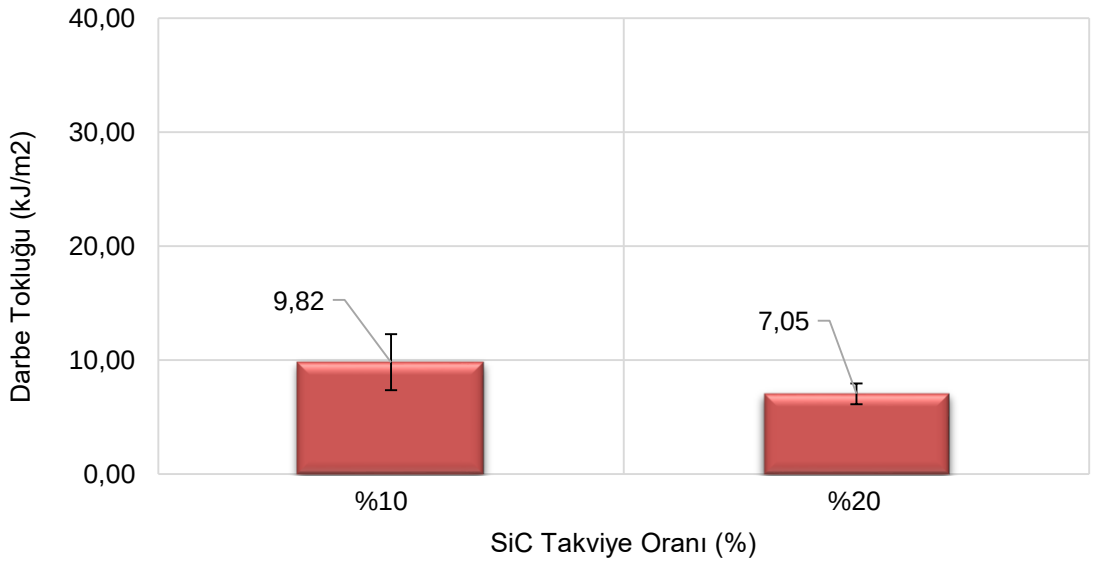
Çizelge 5.3. Al 7075 Alaşımlı Numunelerin Özellikleri ve Deney Sonuçları

Numune No.	SiC Takviye Oranı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Kesit Alanı (mm^2)	Darbe Enerjisi (Joule)	Darbe Tokluğu (kJ/m^2)
25	10	0.448	16.8237	0.20	11.8880
26	10	0.340	14.0935	0.10	7.0955
27	10	0.429	14.3197	0.15	10.4751
28	20	0.585	23.4522	0.15	6.3960
29	20	0.716	24.6861	0.20	8.1017
30	20	0.619	22.5377	0.15	6.6555

Al 7075 alaşımı köpükler incelendiğinde diğer alaşımlı köpüklerde olduğu gibi numune yoğunluğu arttıkça absorbe edilen enerji miktarının da arttığı görülmüştür.

%10 ve %20 oranlarında SiC takviyesine sahip Al 7075 alaşımlı köpüklerin darbe enerjileri 0,15-0,2 J'lük değer aralığında olup darbe toklukları ise 6-12 kJ/m^2 değerleri arasında değişkenlik göstermektedir.

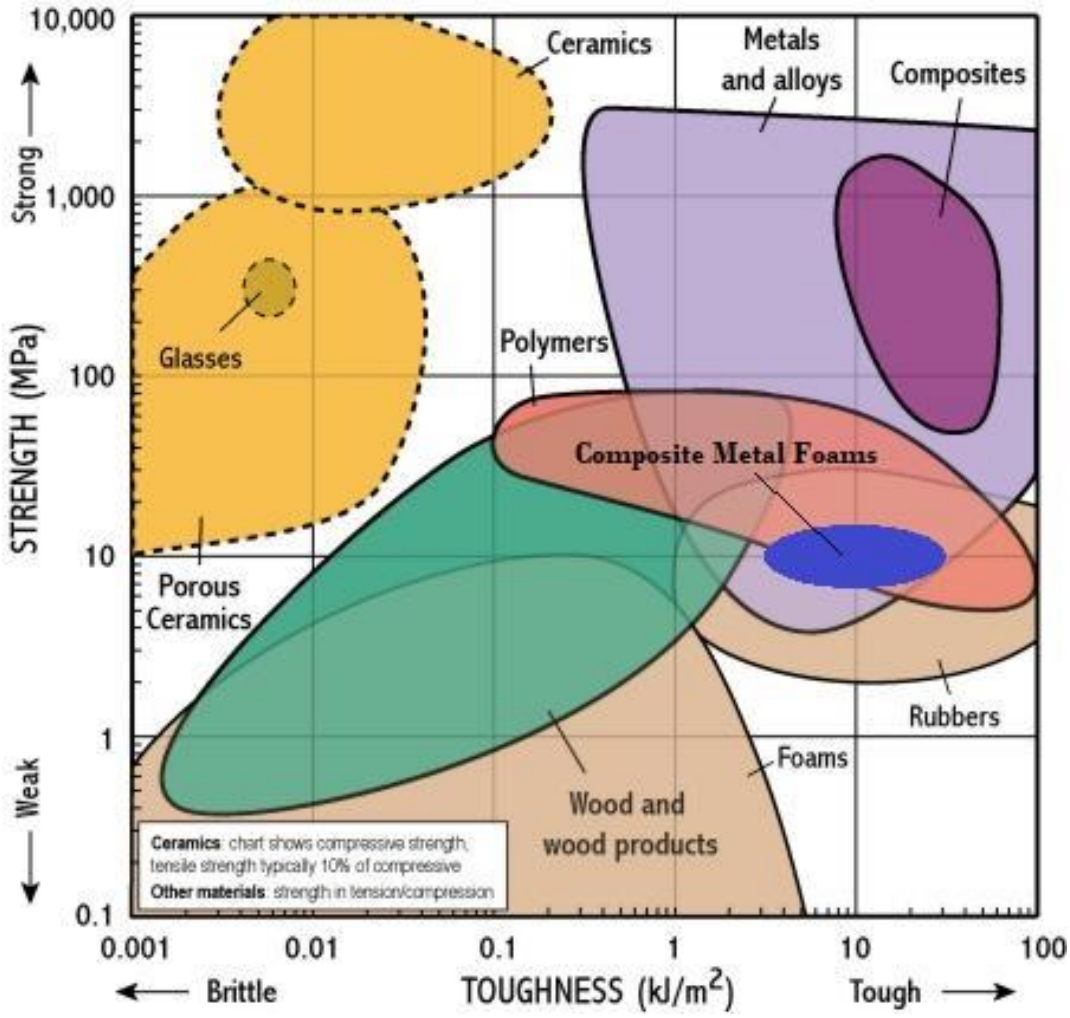
Şekil 5.3'teki grafikte Al 7075 alaşımlı köpüklerin darbe toklukları gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Farklı Takviye Oranlarına Sahip Al 7075 Alaşımlı Köpüğün Darbe Tokluğu Grafiği

Yapılan çalışmalar sonucunda Al 5754 alaşımlı köpüklerin darbe enerjilerinin, Al 5083 ve Al 7075 alaşımlı köpüklerin darbe enerjilerine göre daha yüksek değer aralığında olduğu belirlenmiştir. Al 7075 alaşımlı köpüklerin darbe enerjileri ise en düşük değer aralığındadır.

Bu çalışmadaki %20'ye kadar silisyum karbür takviye oranına sahip alüminyum köpüklerin darbe toklukları 6 – 39 kJ/m^2 değerleri arasındadır. Bu çalışmadan kullanılan SiC takviyeli alüminyum köpüklerin basma dayanımları 8-20 MPa aralığındadır (Demirhan P., 2010). Bu sonuçlar ile birlikte irdelendiğinde SiC takviyeli alüminyum kompozit köpük malzemelerin, farklı malzemeler arasındaki yeri Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Kompozit Metal Köpüklerin Kuvvet-Tokluk Diyagramındaki Yeri (MATERIALS)

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Al 5083, Al 5754 ve Al 7075 olmak üzere üç farklı alüminyum alaşımından doğrudan yarı-katı köpürtme yöntemi ile üretilen farklı takviye oranlarındaki kompozit köpüklerden hazırlanmış numunelere charpy darbe testi uygulanarak absorbe ettikleri darbe enerjileri ölçülmüştür. Test sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir:

1. Farklı alüminyum alaşımından elde edilen tüm kompozit numunelere charpy darbe testi uygulanmış ve numunelerin enerji absorbe etme kabiliyetlerinin alaşımın karakteristiğine uygun olarak değiştiği görülmüştür. Metal alaşımının kimyasal yapısına bağlı olarak sünek veya gevrek olması, o alaşımdan üretilen köpük malzemelerin de kırılma esnasında aynı karakterde davranmasına neden olmaktadır.
2. Tüm alüminyum çeşitlerinde köpük yoğunluğunun artması ile kırılma için gereken darbe enerjisi artmıştır.
3. Yoğunluk olarak aynı olan numunelerde, numunenin hacmi içerisinde homojen gözenek boyut ve dağılımı çok hassas olarak sağlanamadığından, kırılma kesitindeki boşluk oranının fazla olmasından dolayı numunenin yoğunluğu fazla olsa bile daha az enerji absorbe ederek kırıldığı gözlemlenmiştir.
4. Darbe enerjisi, numunenin kırılma yüzeyindeki gözeneklilik oranına, takviye oranına ve alaşımın kimyasal bileşimine göre değişim göstermektedir. Al 5754 alaşımından üretilen köpükler 5083 ve 7075 alaşımından üretilen köpüklere göre daha fazla enerji absorbe ederek kırılmışlardır.
5. Çentik darbe numunelerinde takviye oranı arttıkça yapı içindeki gözeneklerin hemen hemen aynı boyuta geldiği ve homojen dağıldığı görülmüştür. Gözenek büyüklüklerinin hemen hemen eşit olduğu, aynı yoğunluğa sahip numunelerde silisyum karbür takviye oranı arttıkça darbe enerjisini arttığı da gözlemlenmiştir.

6. Deney sırasında kırılma kesitleri incelendiğinde kırılmanın büyük gözeneklerin olduğu kesitlerde gerçekleştiği, numune içindeki gözenek boyutlarının kırılma enerjisinin belirlenmesinde önemli ölçüde etkisi olduğu görülmüştür.

Alüminyum kompozit köpük malzemelerde takviye oranının artışı ile darbe enerjisinin değişiminin incelenmesinde numune içindeki gözeneklerin yerleşimi de dahil olmak üzere çok fazla sayıda parametrenin etkili olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., and Wadley H.N.G. (2000). *Metal foams: a design guide*, Oxford: Butterworth-Heinemann. doi: 10.1016/S0261-3069(01)00049-8

Babcsan, N., Banhart, J. (2006). *Metal foams*: *Towards high-temperature colloid chemistry*, Cambridge University Press, Advance online publication. doi: 10.1017/CB09780511536670.012

Babcsan, N., Banhart, J., Leitlmeier, D. (2003). *Metal foams – manufacture and physics of foaming*. Smolenice/ Slovakia: ” International Conference “Advanced Metallic Materials.

Banhart, J., Seeliger, H.W., (2008). Advanced Engineering Materials, 2000-2009: Cilt 10 (9. Baskı). *Aluminium foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and applications*, Advance online publication. doi: 10.1002/adem.200800091

Banhart, J., (2005). International Journal of Vehicle Design. Cilt 37 (2-3. Baskı). *Aluminium foams for lighter vehicles*, doi: 10.1504/IJVD.2005.006640

Banhart, J., (2003). *Aluminium foams: on the road to real applications*. Cambridge: Mrs Bulletin. https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/open/preprint/a073_banhart2003.pdf . Erişim: 27.04.2018

Banhart, J., Weaire, D., (2002). *On the road again: metal foams find favor*, American Institute of Physics: Physics Today. https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/open/article/a064_banhart2002.pdf . Erişim: 27.04.2018

Banhart, J., (2001). Progress In Materials Science. Cilt 46 (6. Baskı). *Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams*. Advance online publication. doi: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5

Banhart, J., (2000) Advanced Engineering Materials, 2000-2009: Cilt 2 (4. Baskı). *properties and applications of cast aluminum sponges*. Advance online publication. doi: 10.1002/(SICI)1527-2648(200004)2:4<188::AID-ADEM188>3.0.CO;2-G

Behrendt, F., Banhart, J., Schubert, H., (2006). *Characterisation and optimisation of blowing agent for making ımproved metal foams*. Advance online publication. doi: 10.14279/depositonce-1314

Çağlar, S. İ., (2009). A*lüminyum esaslı kompozit köpük üretimi ve karakterizasyonu*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=NtBAevXNhYaNqJFoAcdBds-TS2542YFJRiUn0BM44k59LQG9yZnZwOa3a_c0GbdJ . Erişim: 27.04.2018)

Çinici, H. (2004). *Toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretimi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi/Metal Eğitimi, Ankara. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=ERzfJLahXz4lHWyByonS6fnJhIFZ8277PXNgJb8Ey7pugkosURh9Iy2uQGsl3O9B

Degıscher, H. P., Kristz, B. (2002). Handbook of Cellular Metals. *Production, processing and aplications*, Advance online publication. doi: 10.1002/3527600558

Demirhan A. P., (2010). *Kompozit metal köpük malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=ZeTyprYuef2HkaF3xt4wYkkK-iOmbd4tDGhrHuirgeteOMRcde_PzTjnop6FEVwF . Erişim: 27.04.2018

Deqing, W. Xiangjun, M., Weiwei, X., Ziyuan, S. (2006). Materials Science and Engineering. Cilt 420 (1-2. Baskı). *Effect of processing parameters on cell structure of an aluminum foam*. Advance online publication. doi: 10.1016/j.msea.2006.01.044

Duarte, I., Banhart, J., (2000). Acta Materialia. Cilt 48 (9. Baskı). *A study of aluminium foam formation - kinetics and microstructure*. Advance online publication. doi: 10.1016/S1359-6454(00)00020-3

Haesche, M., Weise, J., Garcia-Moreno, F., Banhart, J., (2008). Materials Science And Engineering. Cilt 480 (1-2. Baskı). *Influence of particle additions on the foaming*

behaviour of AlSi11/TiH2 composites made by semi-solid processing. https://www.researchgate.net/publication/40830174_Influence_of_particle_additions_on_the_foaming_behaviour_of_AlSi11_TiH2_composites_made_by_semi_solid_processing . Erişim: 28.04.2018

Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., Kitahara, A., (2000). Advanced Enginnering Materials. 2. Cilt (4. Baskı). *Alporas aluminium foam: production process, properties and applications.* Advance online publication. doi: 10.1002/(SICI)1527-2648(200004)2:4<179::AID-ADEM179>3.0.CO;2-G

Mutlu, İ., (2011). *AlZn5.5MgCu /SiCp Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Isıl İşlemin Etkisinin İncelenmesi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Trakya Üniversitesi, Edirne.

O'Neill, A.T., (2004). *Development of closed cell metallic foam using casting techniques*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). North Carolina State University, North Carolina. https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.16/1717/etd.pdf?sequence=1&isAllowed=y . Erişim: 28.04.2018

Özer, G., (2005). *Alüminyum esaslı köpük metal üretimi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=XohQ0H2mJnBfxLPsY8dG42YRDJWVwps0GS-yYm_wutzfcEGQopjMDlOC7lU8FGJ3 . Erişim: 28.04.2018

Simancik, F., (2001). Inzynieria Materialowa. Cilt 22 (5. Baskı). *Metallic foams-ultra light materials for structural application.* https://cv3.sim.ucm.es/access/content/group/curriculo-3313-1/grupos/espumas/Foams2.pdf . Erişim: 28.04.2018

Song, Z. Nutt, S.R., (2007). Materials Science and Engineering. Cilt 458 (1-2. Baskı). *Rheology of foaming aluminum melts*. https://docslide.com.br/documents/rheology-of-foaming-aluminum-melts.html . Erişim: 28.04.2018

Song, Z., Zhu, J., Ma, L., He, D., (2001). Materials Science And Engineering. Cilt 298 (1-2. Baskı). *Evolution of foamed aluminium structure in foaming process*. Advance online publication. doi: 10.1016/S0921-5093(00)01285-5

Weise, J., Stanzick, H., Banhart, J., (2003). Cellular Metals and Metal Foaming Technology. *Semi-Solid Processing of Complex-Shaped Foamable Material.* https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b059_weise2003.pdf . Erişim: 28.04.2018

Yu, C.J. Banhart, J., (1998). *Mechanical Properties of Metallic Foams*. https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b020_yu1998.pdf . Erişim: 28.04.2018

DEVOTRANS, https://devotrans.com/centik-darbe-cihazi-ve-deneyi.html . Erişim: 28.04.2018

MATERIALS, http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/strength-toughness/NS6Chart.html . Erişim: 19.05.2018

SEYKOC, http://www.seykoc.com.tr/icerik/7075?dil=tr . Erişim: 28.04.2018

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Edirne'de doğan Metecan ÖZEN, ilk ve ortaokulu Şükrüpaşa İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra Edirne Anadolu Lisesi'nde Fen Bilimleri bölümünde okumuş, ardından 2010 yılında girdiği Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü 2015 yılında üçüncülükle bitirmiştir. Eğitim hayatı boyunca çeşitli kurs ve eğitimlere katılarak CAD programları ile yabancı dilini geliştirmiş, ayrıca 2014 yılında 10'uncusu düzenlenen International Engineering Mechanics Contest'te Belarus'ta ülkesini temsil etmiştir. 2015 yılında mezun olduktan sonra yüksek lisansını Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği anabilim dalında yapmaya başlamıştır.