

METALİK KÖPÜKLER VE UYGULAMA ALANLARI

Şuayip ELDEMİR

suayipeldemirr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1962-9568>

Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Kırıkkale, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM

oguz.erdem@kku.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-8094-3222>

Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Kırıkkale, Türkiye

ÖZET: Mühendislik malzemeleri genel olarak; metaller, seramikler, polimerler ve kompozit malzemeler olarak sınıflandırılır. Fakat, günümüz mühendislik malzemeleri, teknik, ekonomik, çevresel ve estetik açıdan bazı uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Bu yetersizlikleri aşma arayışları her geçen gün araştırmacıları farklı özellikleri olan malzemeler keşfetmeye zorlamaktadır. Metalik köpükler yapısında %75-90 oranında gözenek bulunduran metal ya da alaşımlardan oluşmaktadır. Metalik köpükler diğer metal malzemelere göre daha hafif olmasına karşın hafiflik/mukavemet oranının yüksek olması, darbe ve sarsıntıları iyi sönmüleyebilmesi, yüksek kesme ve kırılma mukavemetleri, ısı ve ses izolasyonu sağlaması ve kimyasal süzme (filtrasyon) özellikleri sebebiyle giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, metalik köpük üretim yöntemleri ve üretim parametreleri (köpürtme süresi, köpürtme sıcaklığı, köpürtücü madde miktarı vb.) hakkında literatürde var olan çalışmalar incelenmiş ve yöntem üzerine detaylı bilgiler verilmiştir. Ayrıca, metalik köpüklerin günümüz endüstrisindeki uygulama alanları hakkında da kapsamlı açıklamalar yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELE: Metalik Köpükler, Gözenek, Köpürtücü Ajan, Köpürtme Sıcaklığı, Darbe Sönümleyici

METALLIC FOAMS AND ITS APPLICATION AREAS

ABSTRACT: Engineering materials are generally classified as metals, ceramics, polymers and composite materials. However, today's engineering materials are inadequate in some applications in terms of technical, economic, environmental and aesthetic aspects. The quest to overcome these inadequacies forces researchers to discover new materials with different properties every day. Metallic foams consist of metals or alloys with 75-90% porosity in their structure. Although metallic foams are lighter than other metal materials, they are gaining importance due to their high lightness/strength ratio, ability to absorb impacts and shocks well, high shear and rupture strength, heat and sound insulation, and chemical filtration properties. In this study, existing studies in the literature on metallic foam production methods and production parameters (foaming time, foaming temperature, amount of foaming agent, etc.) were examined and detailed information on the method was given. In addition, comprehensive explanations are given about the application areas of metallic foams in today's industry.

KEYWORDS: Metallic Foams, Porosity, Foaming Agent, Foaming Temperature, Shock Absorber

Date of Submission: 01.12.2023

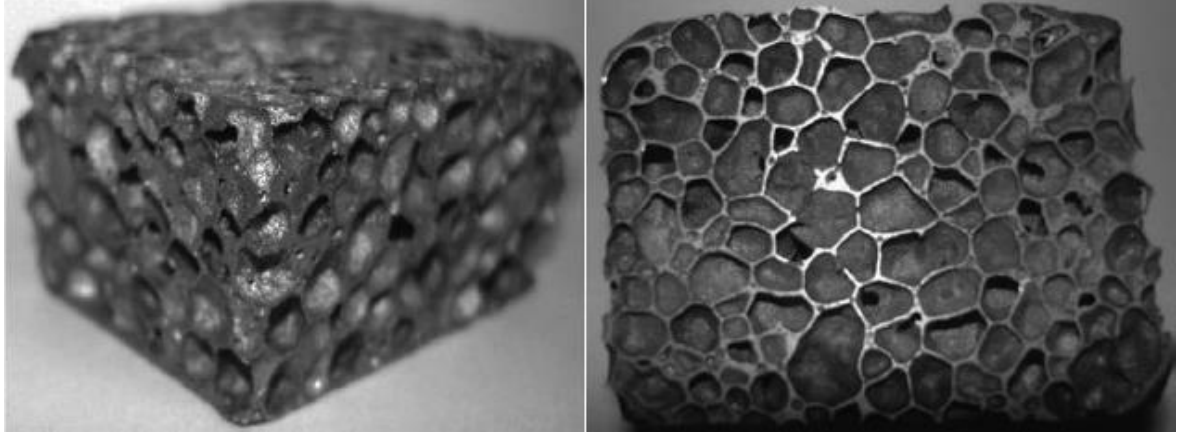
Date of acceptance: 25.12.2023

<https://doi.org/10.5281/zenodo.10446724>

1.GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca üretim, tüketim ve gelişim artarak devam etmiştir. Bu artış sınırlı olan hammadde kaynaklarını ve bu malzemelerin kısıtlı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yetersizliği ile birleştiğinde bilim insanlarını yeni malzemeler ve üretim teknikleri geliştirmeye sevk etmiştir (Bilhan, 2005). Otomotiv, savunma, biyomedikal, havacılık ve uzay sanayilerinde kullanılmak üzere hafif ve mukavemetli malzemelere ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır (Veale, 2010). Belirtilen sektörlerdeki beklentileri karşılamak için üretim yöntemleri ve yeni malzeme önerileri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Metalik köpükler de bu araştırmalar sonucu ortaya çıkan ürünlerden biridir (Fratzl ve Weinkaner, 2007). Metalik köpüklerin tarihçesine bakıldığında ilk ortaya çıkışları takı parçaları üretmek içindir fakat, ilk resmi adım ise 1925 yılında Fransa'da ilk patentli köpük üretim çalışmasıyla atılmıştır (Secundus), (Ongunyurt, 2019). Metalik köpükler ile ilgili ilk endüstriyel çalışmayı 1948'de Benjamin Sosnick alüminyum ve cıva kullanarak kapalı hücreli metal köpük üretimi üzerine yapmıştır (Davies ve Zhen, 1983). 1960'lı yıllarda Peisker ve Hardy (United Aircraft Şirketi) tarafından köpükleştirici ajanlar ile metal köpük üretimini gerçekleştirmiştir (Ongunyurt, 2019), (Sosnick, 1951).

Günümüzde metalik köpükler; alüminyum (Şekil 1), titanyum, çelik ve nikel bazlı metallerden üretilmekte ve kullanılmaktadır (Ertürk, 2013), (Bram v.d., 2000). Bu alanda literatürde yapılmış birçok çalışma mevcuttur.



Şekil 1. Alüminyum esaslı metalik köpük malzemeler (Amjad, 2001)

Baumeister ve arkadaşları alüminyum köpüklerle ilgili yapmış oldukları çalışmalarında, alüminyum köpüklerin enerji absorbe edici (sönümleyici) olarak kullanılabileceğini keşfetmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında %90 gözenekli yapıya ve 0,4-1 g/cm³ kapalı hücre yoğunluğuna ulaşmayı başarmışlardır (Baumeister v.d., 1997), (Yıldırım, 2017). Benzer şekilde, Wei ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada saf alüminyum ile saf alüminyum matrisin içine NaCl ekleyerek oluşturdukları metalik köpükte enerji sönümleme davranışını incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda ürettikleri metalik köpüğün saf alüminyuma göre üç kat daha fazla sönümleme kapasitesi olduğunu tespit etmişlerdir (Yıldırım, 2017), (Wei v.d., 2002).

Çinici yapmış olduğu çalışmada, farklı parametreler kullanarak alüminyum esaslı metal köpük üretmeyi denemiştir. Üretim yöntemi olarak toz metalürjisi tekniğini kullanarak köpürtme süresi, sıcaklığı ve köpürtücü madde miktarının metalik köpük üzerine etkisini incelemiştir. Çalışması sonucunda köpürtme süresi, sıcaklığı ve köpürtücü madde miktarı arttığında gözenek boyutlarının ve lineer gelişme oranının arttığını gözlemlemiştir (Yıldırım, 2017), (Çinici, 2004). Onck ve arkadaşları çalışmalarında, kırılma davranışları açısından açık ve kapalı hücreli alüminyum esaslı metalik köpükleri incelemişlerdir. Çalışmalarında kapalı hücrelerin daha gevrek, açık hücrelerin ise daha sünek olduğunu gözlemlenmiştir. Kapalı hücre köpüklerindeki gevrekliğin hücre duvarındaki mikro yapıların çökmesi sonucunda meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Yıldırım, 2017), (Onck v.d., 2005).

Tunçer yapmış olduğu çalışmada, titanyum esaslı metalik köpükler imal etmiştir. Üretim yöntemi olarak yer tutucu ilavesiyle metalik köpük üretim yöntemi benimsenerek köpüklerin göreceli yoğunluk, iç yapı özellikleri ve basma davranışı gibi özelliklerinin başlangıç toz boyutu, yer tutucu cinsi ve miktar, sinterleme sıcaklığı gibi parametreler ile kontrol edilebildiğini saptamıştır (Tunçer, 2006). Dou ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ürettikleri metalik köpüklerin deformasyon gerilim eğrilerini çıkarmışlar ve enerji absorbe miktarlarını araştırmışlardır. Matris malzeme olarak saf alüminyum ve yer tutucu olarak cenosphere (seramik içi boş küre) kullanılarak 65-120 MPa plastik deformasyon gerilim değeri tespit etmişlerdir. Ayrıca, enerji sönümleme miktarının da %50-70 oranında arttığını belirtmişlerdir (Dou v.d., 2007).

Ergönenç yaptığı çalışmasında, alüminyum köpük içeren sandviç panellerin patlamaya karşı verdiği tepkileri incelemiştir. Deneysel çalışmalardan, üretilen sandviç panellerin aynı ağırlıktaki yekpare malzemeden %50-150 arasında daha yüksek enerji absorbe edebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, 10 kg TNT patlama yükü karşısında 9 cm kalınlığa sahip sandviç yapıdan 6,3 cm ve 7,2 cm kalınlığa sahip alüminyum köpük malzemelerin daha iyi enerji sönümleme yetenekleri olduğunu tespit etmiştir. Yine, bu sandviç yapıda en verimli yüzey malzemesinin de AISI 4340 çeliği olduğunu belirtmiştir (Ergönenç, 2008). Tao ve arkadaşının çalışmasında, alüminyum matrisli köpük üretimi gerçekleştirilmiş ve üretilen köpükler basma testine tabi tutulmuştur. Metalik köpük üretimini infiltrasyon yöntemiyle gerçekleştirmişler ve metalik köpüğün sünekliğinin bariz olarak arttığını, basma dayanımının ise %30 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Üretilen metalik köpüklerin enerji absorbe kapasitesini ise 50 kJ/kg olarak ölçüldüğünü belirtmişlerdir (Tao ve Zhao, 2009). Rajendran ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, metalik köpük ile dolu ezilme kutuları ile boş ezilme kutularının enerji sönümleme

kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Kıyaslama sonucunda darbe sönümleme enerjisinin metalik köpük ile dolu olan üründe çok daha yüksek olduğunu (3,32 kat) tespit etmişlerdir (Rajendran v.d., 2009). Aynı şekilde, Toksoy yapmış olduğu çalışmada, AlSi10 metalik köpük (Alulight) ile doldurulmuş 1050H14 Al kutuların ezilme davranışlarını incelemişlerdir. 1050H14 ezilme kutularının spesifik enerji absorpsiyonu oranlarını Alulight köpükler için %5,6 ve Hydro köpükler için %21,9 olarak hesaplamıştır (Toksoy, 2009).

Çağlar yaptığı çalışmada, AlMg₃ alüminyum alaşımından TiH₂ (titanyum di hüdrür) ajanı kullanarak metalik köpük elde etmiştir. Çalışmasında köpük malzemesine farklı oranlarda SiC ile takviye etmiştir ve bunun etkilerini araştırmıştır. Yapılan takviyenin hücre stabilizasyonunu olumlu yönde etkilediğini tespit etmiştir. Ayrıca takviyeyle birlikte yoğunluğun azaldığını, gözeneklerin küçüldüğünü ve dağılımın düzenlendiğini tespit etmiştir (Çağlar, 2009). Benzer şekilde, Gökmen yaptığı çalışmada, toz metalurjisi tekniği ile metal matrisli köpük üretim parametrelerini incelemiştir. Matris malzemesi olarak saf alüminyum ve Alumix 231 metal tozlarını kullanmıştır. Köpürtücü madde olarak TiH₂ tozu kullanmıştır. Yaptığı çalışmalar neticesinde %1 TiH₂ oranı ve 690-710 °C sıcaklıkta 10 dakika köpürtme süresinin optimum parametreler olarak belirlemiştir (Gökmen, 2009).

Jha ve arkadaşları, alüminyum cenesphore ile metalik köpük ve alüminyuma ağırlıkça %10 oranında SiC tozu karıştırarak alüminyum köpük üretmişlerdir. SiC tozu katkılı ve katkısız köpüklerin sürtünme aşınma davranışı irdelenmiştir. Sürtünme aşınma oranının SiC tozu katkısız köpükte, katkılıya oranla daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir (Yıldırım, 2017), (Jha v.d., 2011). Benzer şekilde, Kocatürk yapmış olduğu çalışmada, SiC tozu katkılı ve katkısız Al köpükler imal etmiş ve bu köpükleri basma testine tabii tutmuştur. Yapılan testlerde SiC tozu katkılı ve katkısız Al köpüklerin deformasyon hızına tepki verdiği görülürken Alulight köpüklerin buna tepki vermediği gözlemlenmiştir. Bası yükleri altında hücre duvarlarında kırılma oluşan cam köpük malzemelerde mukavemet artışı gözlemlenmiştir (Kocatürk, 2011).

İhvan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, alüminyum köpük üretiminde alaşım elementlerinin etkisini araştırmışlardır. Deneyisel çalışmalarında, alüminyum tozuna magnezyum ve silisyum alaşım elementlerini toz olarak ilave etmişler ve 6000 serisi yaşlandırılabilen alüminyum alaşımı köpük malzemeyi üretebilmişlerdir. Köpükleştirici ajan olarak TiH₂ tozu kullanmışlardır. Deneyler sonucunda üretilen köpüklerin sertliği üzerinde, kullanılan köpükleştirici ajanın bir etkisinin olmadığını gözlemlenmiştir. Fakat, alaşımdaki magnezyum yüzdesi arttıkça sertliğin lineer olarak arttığını, silisyum yüzdesi arttıkça ise sertliğin parabolik bir eğilimle değiştiğini gözlemlenmiştir (İhvan v.d., 2011). Aktay ve arkadaşları çalışmalarında, bal peteği yapısında doldurulmuş alüminyum profillerin basma testine maruz bırakmış ve değişken hücre boyutlarında ve geometrilerdeki davranışları incelemişlerdir. Çalışma sonucunda artan hücre çapı sayesinde enerji sönümleme kapasitesinin azaldığını belirlemişlerdir (Aktay v.d., 2011), (Altın, 2017).

Orbulov ve arkadaşı yaptıkları çalışmada, sekiz farklı metal matris sentaktik (örüntülü) köpüklerin bası davranışlarını incelemişler ve küçük mikro hücrelerin daha kusursuz olması sebebiyle daha yüksek basma dayanımı ve daha iyi mekanik özellikler sağladığını tespit etmişlerdir (Yıldırım, 2017), (Obulov ve Ginsztler, 2012). Ertürk yaptığı çalışmada, metalik köpüklerin uygulamaya yönelik üretimini ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Deneyisel çalışmalarına göre 450-500 °C'de ısıtılma işlemi yapılmasının daha kararlı bir köpük üretmeye faydalı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, üretimden önce mekanik karıştırmanın etkileri analizine göre toz dağılımının daha düzenli olduğu 90 rpm karıştırma hızında 90 veya 120 min süreyle karıştırmanın daha verimli olduğu gözlemlenmiştir (Ertürk, 2013).

Taherisharg ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, 356 serisi Al köpüğüne T6 ısıtılma işlemi uygulamışlardır. Isıl işlem sonucunda perlitik yapıya getirdikleri ürünü incelemişlerdir. Basınç altında ısıtılma işlemi gören metalik köpüklerin daha homojen bir deformasyon gösterdiğini tespit etmişlerdir (Yıldırım, 2017), (Taherisharg v.d., 2014). Altın yaptığı çalışmada, içi metalik köpük ile dolu deformasyon kutuları ve boş deformasyon kutularını kıyaslamıştır. Dikdörtgen kesitli çarpışma kutularında içi dolu olanların boş olanlara göre dört kat daha fazla enerji sönümlendiğini tespit etmiştir. Ayrıca, daire kesitli deformasyon kutularında içi dolular boş olanlara göre altı kat daha fazla enerji sönümlenebildiğini belirtmiştir (Altın, 2017).

Kırmızı yaptığı çalışmada, Al köpük malzemesini fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) içerisine dahil ederek ve zırh malzemesi olarak kullanılmak üzere fonksiyonel derecelendirilmiş köpük malzemeleri (FDKM) sıcak presleme ile üretmiştir. Üretilen FDKM numunelerin en iyi matris/takviye ara yüzey durumu, 193,66 HBW ile en yüksek sertlik değeri, 704,58137 MPa ile en yüksek çapraz kırılma dayanımı gösterdiğini tespit etmiştir. V_{50} hız limitini tespit etmek amacıyla gerçekleştirilen 30 derecelik balistik testlerde FDKM'lerin V_{50} hız limiti MIL-DTL-46063 standardında belirtilen değerden yaklaşık %3 oranında daha yüksek değerde elde edildiğini belirtmiştir (Kırmızı, 2017).

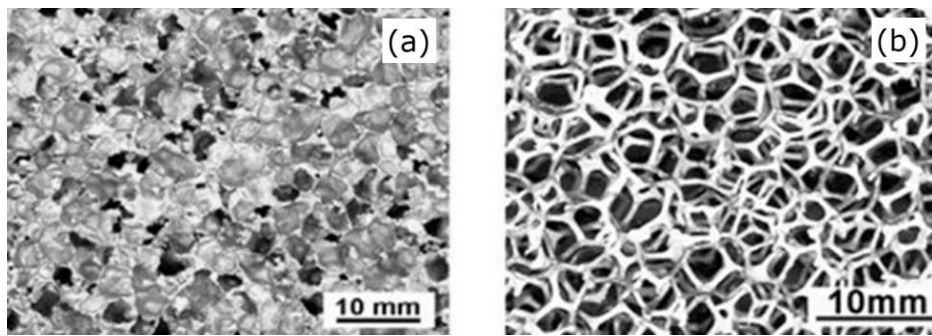
Ongunyurt yapmış olduğu çalışmada, indüksiyon sinterleme tekniğini kullanarak 6061 alaşımlı köpük üretmiş ve köpüklerin karakterizasyonunu incelemiştir. Deneysel çalışmaları sonucunda, göre 6061 alaşımlı köpük üretiminde köpürtücü madde olarak Dolapix tozu, sinterleme sıcaklığı olarak 1070 °C ve yaşlandırma sıcaklığı olarak 200 °C seçilmesinin uygun olduğunu belirtmiştir (Ongunyurt, 2019).

Ünalır yaptığı çalışmada, seramik destek plakası arkası balistik malzemesi olarak alüminyum köpük kullanımını incelemiştir. Üretilen dört farklı yoğunluktaki alüminyum köpüklü ve alüminyum köpüksüz kompozit zırh numuneleri ile atış testleri yapılmıştır. Yapılan balistik testler sonucunda zırh plakalarına yapılan kapalı hücre alüminyum köpük dolgularının balistik özelliği iyileştirici bir çözüm olacağı belirtilmiştir (Ünalır, 2021).

Bu çalışmada, metalik köpük üretim yöntemleri ve üretim esnasındaki parametreler hakkında literatürde var olan çalışmalar incelenmiş ve yöntem üzerine detaylı bilgiler verilmiştir. Ayrıca, metalik köpüklerin günümüz endüstrisindeki uygulama alanları ve diğer alanlara sağlayabileceği faydaları hakkında da kapsamlı açıklamalar yapılmıştır.

2. METALİK KÖPÜKLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Metalik köpükler genel anlamda içinde gaz boşlukları bulunan gözenekli (süngerimsi) elemanlar olarak tanımlanır. Bu malzemeler doğada kendiliğinden oluşmaz, üretilmesi için çeşitli işlemler gerekir. Bu üretimler için genelde farklı fazlarda farklı malzemelerin kullanılması şarttır (Amjad, 2001), (Altın, 2017). Metalik köpükler açık ve kapalı hücreli olmak üzere iki tiptir (Şekil 2). Hücre terimi; içerisinde gaz kabarcığı bulunan bölüme verilen isimdir. Hücre duvarı; iki gaz kabarcığının arasındaki yapıya verilen isim, hücre köşesi ise; üç gaz kabarcığının kesişiminde oluşan yapıya verilen isimdir. Hücre köşesi, hücre duvarına göre daha kalın yapıdadır (Gökmen, 2009), (Özer, 2005). Metalik köpüklerin yapısının %80-90'ı gözeneklerden oluşur. Gözenekler birbiriyle bağıntılı ise bu yapıya açık hücreli köpük metal denir. Hücrelerin her birinin içerisinde gaz boşluklarının bulunduğu ve bu boşlukların birbirinden izole edilmiş durumdaki haline ise kapalı hücre denir (Amjad, 2001), (Gökmen, 2009).



Şekil 2. Metalik köpük hücre yapısı: a) kapalı hücre, b) açık hücre (Sosnick, 1951)

Metalik köpükler; sıvı metalden, toz metalden, metal iyonlarından ve metal buharında elde edilebilmektedir. Metalik köpüklerin üretim yöntemleri Tablo 1'de genel olarak sınıflandırılmıştır. Metalik köpük üretim yöntemleri endüstride üretici firmaların isimleriyle de anılmaktadır (Banhart, 2001).

Tablo 1. Metalik Köpüklerin Üretimine ait Sınıflandırma (Secundus), (Ongunyurt, 2019)

Metalik Köpükler			
Sıvı Metal	Toz Metal	Metal İyonları	Metal Buharı
Gaz ile köpürtme	Gaz hapsetme	Elektro-kimyasal depozisyon	Buhar depozisyonu
Ajan ile köpürtme	Çamur hazırlama		
Katı-Gaz ötektik katılaştırma	Toz sinterleme		
Basıncılı toz ergitme	Boşluk tutucularla sıkıştırma		
Döküm	İçi boş metal toplarını sinterleme		
Sprey oluşturma	Polimer metal bileşiklerinin ekstrüzyonu		
	Reaksiyon sinterleme		

2.1. Sıvı Metal İçerisine Gaz Enjektisiyle Metalik Köpük Üretimi

Ergimiş metal dolu potanın zeminine gaz enjekte edilerek köpük oluşmasının sağlanmasının ardından tepede oluşan köpüklerin soğutulması esasına dayanır. İlave edilen gaz doğrudan sıvı metale enjekte edilirse kararsız gözenekler oluşabilir. Bu sebeple daha kararlı yapı için sıvı metal içerisinde silisyum karbür, alüminyum oksit veya magnezyum oksit gibi seramik tozları ilave edilerek karıştırılır ve döner bir pervane yardımıyla nitrojen, argon veya hava gibi gaz kullanılarak metalik köpük oluşturulur (Amjad, 2001), (Gökmen, 2009), (Banhart, 2001), (Banhart, 2005), (Banhart, 2003).

2.2. Sıvı Metal İçerisine Köpürtücü Ajan İlavesiyle Metalik Köpük Üretimi

Temel anlamda ergiyik metal içerisine köpürtücü ajan (madde) eklenerek köpük üretimi gerçekleştirilir Köpürtücü madde ısı etkisi altında ayrışır ve köpüklenme işini yapacak olan gazı açığa çıkarır. Ergiyik metal içerisine 680° C’de Ca eklenir ve karıştırılır. Bu ekleme yapının viskozitesini artırır. İstenilen viskozite değerine ulaşıldığında ergimiş metal içerisine TiH₂ köpürtücü olarak eklenir. Alaşımın ergime sıcaklığının altındaki sıcaklığa kadar üretimin yapıldığı tank soğutulur ve sıvı metalik köpükler katı metalik köpüklere dönüşür (Gökmen, 2009), (Banhart, 2001), (Miyoshi v.d., 2000).

2.3. Ergitme-Çözünürlük-Filtrasyon Yöntemiyle Metalik Köpük Üretimi

Temel olarak bir kap içerisinde metal ergitilir ve düzenek içerisine H₂ gazı enjekte edilir. Ergiyen metal hidrojen gazını emer ve bu sebeple ergiyen metalde bozunmalar başlayarak metalik köpük oluşur. Daha sonra bu köpük alt kısımda altı soğutulmuş diğer kaba aktarılır. Ergiyen metal alt kısımdan başlayarak katılaşıp (Gökmen, 2009), (Çinici, 2004), (Banhart, 2003).

2.4. Sıvı Metal Yoluyla Köpükleşebilen Öncü Üretimi

Bu yöntemde ilk etapta ısıtılma tabi tutulan titanyum hidrat tozları ile alüminyum tozları karıştırılır. 620°C’deki Al/SiC kompozit eriyik içerişe bu karışım ilave edilerek karıştırılır (yaklaşık 1200 rpm). Daha sonra bu öncül ürün grafit kalıp içerisine alınır ve sıvı duruma gelinceye kadar ısıtılır ve metalik köpük elde edilir (Amjad, 2001), (Çinici, 2004), (Gökmen 2009), (Banhart, 2005), (Frei v.d., 2002).

2.5. Toz Metalurjiyle Metalik Köpük Üretimi

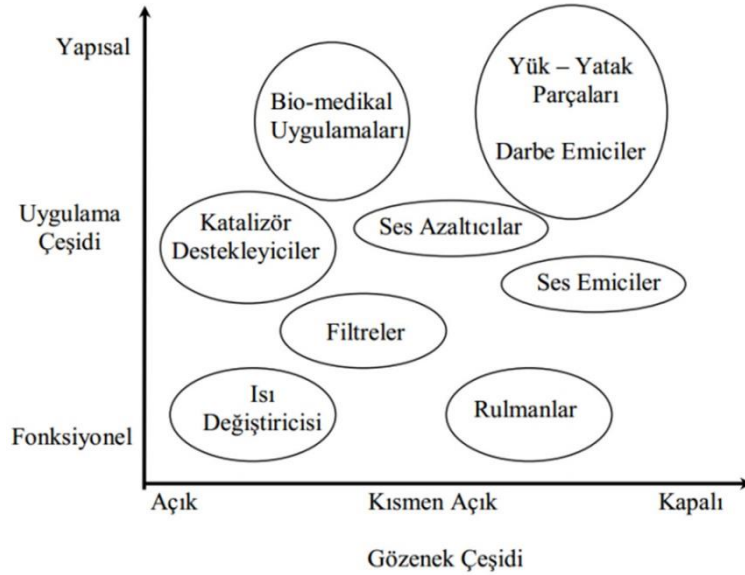
Bu yöntem, metal tozların köpürtücü madde tozuyla karıştırılması ile başlar. Sonra bu karışım sıkıştırılır. Daha sonra matris malzemenin ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu ısıtma köpürtücünün daha yoğun bir hal almasını sağlar. Daha sonra öncül materyalin ergime sıcaklığının yakın bir sıcaklığına kadar ısıtılır. Ayrışan köpürtücü malzeme sayesinde genleşme sağlanır ve köpüklü yapı elde edilir. Aynı zamanda bu işlem kullanılacak ürünün şekline göre özel olarak tasarlanabilir ya da dolgu malzemesi olarak da kullanılabilir (Gökmen, 2009), (Banhart, 2001), (Yu v.d., 1998).

2.6. Döküm Yöntemiyle Metalik Köpük Üretimi

Bu yöntemde kalıp içerisine polimer köpük ya da yer tutucu malzeme konulur. Sonra dolgu malzemesiyle kalıp doldurulur. Kılcal boşluklar bulunması halinde dolgu malzemesi basınç altında da doldurulabilir. Kuruyan dolgu malzemesi daha sonra ısı tesiri ya da uygun çözücü gibi etkenlerle polimer köpüğün ya da yer tutucu malzemenin kalıptan uzaklaştırılması sağlanır. Daha sonra kalıp bozularak nihai metalik köpüğe ulaşılır (Ertürk, 2013), (Banhart, 2001), (Köner ve Singer, 2000), (Wichianrat, 2012), (Smitha v.d., 2013), (Zou v.d., 2013).

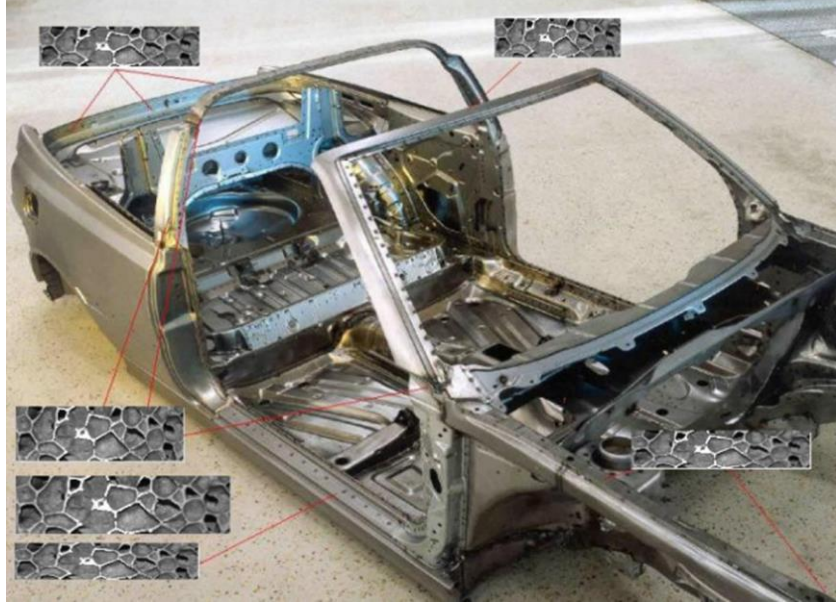
3. METALİK KÖPÜKLERİN KULLANIM ALANLARI

Metalik köpükler diğer metal malzemelere göre daha hafif olmasına karşın hafiflik/mukavemet oranının yüksek olması, darbe ve sarsıntıları iyi sönümleyebilmesi, yüksek kesme ve kırılma mukavemetleri, ısı ve ses izolasyonu sağlaması ve kimyasal süzme (filtrasyon) özellikleri sebebiyle giderek önem kazanmakta ve pratikte kullanılabilir hale getirilmeye çalışılmaktadır (Polat v.d., 2010), (Varyoz v.d.,). Metalik köpüklerin hücre yapısına göre açık veya kapalı olması uygulama alanını doğrudan belirleyen en temel özelliktir (Şekil 3) (Banhart, 2001), (Yıldırım, 2018).



Şekil 3. Metalik köpüklerin hücre yapısına göre kullanım alanları (Banhart, 2001), (Yıldırım, 2018)

Günümüzde metalik köpüklerin kullanım alanları giderek yaygınlaşmaktadır. Makine imalatı, uzay ve uçak sanayi, otomotiv sanayi, inşaat, biyomedikal gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur (Tunç, 2020). Yoğunluğu küçük olan metalik köpüklerin sahip oldukları; titreşim azaltma, darbe sönümleme ve ses yalıtımı gibi özellikleri sayesinde otomotiv (Şekil 4 ve 5) ve inşaat (Şekil 6) sektörlerinde tercih edilmektedir (Gökmen, 2009), (Tunç, 2020). Otomobillerin güvenliğini artırmak amacıyla tampon ve şase arasındaki bölgelerde ve diğer otomobil yapılarında (A, B ve C sütunlarında) dolgu ürünleri olarak metalik köpüklerin kullanımı yaygındır (Gökmen, 2009), (Banhart, 2005). Metalik köpüklerin hafif olması otomotiv endüstrisinde olduğu gibi havacılık (Şekil 7) ve uzay endüstrisi (Şekil 8) için de bir cazibe oluşturmaktadır (Tunç, 2020), (Yavuz, 2010).



Şekil 4. Metalik köpüklerin otomobilde kullanılan bölgeleri (Gökmen, 2009), (Banhart, 2005).



Şekil 5. LKR Ranshofen firması tarafından BMW için üretilmiş motor kulağı, soldan sağa; içi boş parça, içi köpük doldurulmuş parça ve tam kesit alınmış parça (Gökmen, 2009), (Banhart, 2005).



Şekil 6. Yerleşim alanlarına yakın otoyollar için ses yalıtımı uygulaması (Miyoshi v.d., 2000), (Tunç, 2020).



Şekil 7. Uçak kanadında metalik köpük kullanımı (Tunç, 2020)



Şekil 8. Sandviç metalik köpük panelden üretilmiş roket konisi (Tunç, 2020), (Banhart, 2008)

4. SONUÇ

Metalik köpükler genel anlamda içinde gaz boşlukları bulunan gözenekli malzemelerdir. Bu malzemelerin üretilmesinde sıvı metalden, toz metalden, metal iyonlarından ve metal buharından yararlanılır. Günümüzde metalik köpükler; alüminyum, titanyum, çelik ve nikel bazlı metallerden ağırlıklı olarak toz metalurjisi yöntemiyle üretilmekte ve kullanılmaktadır. Toz metalurjisi yönteminde, köpüğü üretilen metal tozları TiH_2 (titanyum di hüdrür) gibi köpürtücü madde tozuyla karıştırılır ve köpüğü üretilen metalin ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Ayrışan köpürtücü malzeme sayesinde genleşme sağlanır ve köpüklü yapı elde edilir. Bu çalışmada, metalik köpük üretim yöntemleri, üretim esnasındaki parametreler ve uygulama alanları detaylı bir şekilde ele alınmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Saf alüminyum matrisin içine NaCl eklenerek oluşturulan metalik köpüğün saf alüminyuma göre üç kat daha fazla sönümlenme kapasitesi olduğu tespit edilmiştir. Toz metalurjisi tekniğini kullanarak üretilen metalik köpüklerde, köpürtme süresi, köpürtme sıcaklığı ve köpürtücü madde miktarı arttığında gözenek boyutlarının ve lineer gelişme oranının arttığı gözlemlenmiştir. Metalik köpükler kırılma davranışları açısından incelendiğinde, kapalı hücrelerin daha gevrek, açık hücrelerin ise daha sünek olduğunu gözlemlenmiştir. SiC tozu katkılı ve katkısız köpüklerin sürtünme aşınma davranışı irdelendiğinde, sürtünme aşınma oranının SiC tozu katkısız köpükte, katkılıya oranla daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Alüminyum köpük üretiminde, alüminyum tozuna magnezyum ve silisyum alaşım elementlerinin

katılması köpük sertliğini etkilediği görülmüştür. Alaşımdaki magnezyum yüzdesi arttıkça sertliğin lineer olarak arttığı, silisyum yüzdesi arttıkça ise sertliğin parabolik bir eğilimle arttığı tespit edilmiştir. Köpükleştirici ajan olarak kullanılan TiH_2 tozunun ise sertlik açısından bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Dikdörtgen kesitli çarpışma kutularında içi metalik köpükle dolu olanların boş olanlara göre dört kat daha fazla enerji sönümleyebildiği tespit edilmiştir. Zırh plakalarına yapılan kapalı hücre alüminyum köpük dolgularının balistik özelliği iyileştirici bir çözüm olacağı görülmüştür. Günümüzde metalik köpüklerin; makine imalatı, uzay ve uçak sanayi, otomotiv sanayi, inşaat, biyomedikal gibi birçok alanda kullanımı olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

- Aktay, L. & Çakıroğlu, C., & Güden, M. (2011), Quasi-static axial crushing behavior of honeycomb-filled thin-walled aluminum tubes. *The Open Materials Science Journal*, 5, 184-193
- Altın, M., (2017), *Taşıtlarda Kullanılan Metalik Köpük İçeren Çarpışma Kutularının Enerji Sönümleme Kapasitelerinin Araştırılması*, Gazi Üniversitesi, Doktora Tezi, Ankara.
- Amjad, S. (2001). *Thermal conductivity and noise attenuation in aluminium foams*, M.Sc. Thesis, Wolfson College University of Cambridge Graduate School Of Natural and Applied Sciences, Cambridge.
- Banhart, J. & Seelinger, H. W. (2008), *Aluminium Foam Sandwich Panels: Metallurgy, Manufacture and Applications*, *Advanced Engineering Materials*. 10(9), 793-802.
- Banhart, J. (2005), "Aluminium foams for lighter vehicles", *Int. J. Vehicle Design*, 37: 114–125.
- Banhart, J. (2003), "Aluminium Foams: On the Road to Real Applications", *Mrs Bulletin*, 290-295.
- Banhart, J. (2001), "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, 46: 559-632.
- Bram, M. & Stiller, C. & Buchkremer H.P. & Stöver, D. & Baur, D. (2000), *High-porosity titanium, stainless steel, and superalloy parts*, *Advanced Engineering Materials*, 2, (s. 196-199).
- Baumeister, J. & Banhart, J. & Weber, M. (1997). Aluminium foams for transport industry. *Materials & Design*, Vol. 18, Nos. 4r6, 217–220.
- Bilhan, S. (2005) *Alüminyum metal köpüklerin difüzyon kaynağı (TLP) davranışının incelenmesi*. Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Çağlar, S.İ. (2009), *Alüminyum esaslı kompozit köpük üretimi ve karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Davies G. J. & Zhen S., *Metallic foams: their production, properties and applications*, (1983), *J. Mater. Sci.*, 18, 1899-1911.
- Degisher, H. P. & Kriszt, B. (2002), *Handbook of cellular metals*, Wiley-vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Dou, Z.Y. & Jiang, L.T. & Wu, G.H. & Zhang, Q. & Xu Z.Y. & Chen, G. Q. (2007), High strain rate compression of cenosphere-pure aluminium syntactic foams. *Scripta Materialia*, 57: 945-978.
- Ergönenç, Ç. (2008), *Development And Design Of Closed-Cell Aluminum Foam-Based Lightweight Sandwich Structures For Blast Protection*, Degree of Master, Izmir Institute of Technology, İzmir.
- Ertürk, A.T. (2013), *Alüminyum Köpük Malzemelerin Uygulamaya Yönelik Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Kocaeli Üniversitesi, Doktora Tezi, Kocaeli
- Fratzl, P. & Weinkamer, R. (2007). *Nature's hierarchical materials*, *Progress in Materials Science*, 52(8), (s. 1263 – 1334).
- Frei, J. & Gergely, V. & Mortensen, A. & Clyne, T.W. (2002), "The effect of prior deformation on the foaming behaviour of FORMGRIP precursor material", *Advanced Engineering Materials*, 4: 749-752.
- Gökmen, U. (2009), *Toz Metalurjisi Yöntemi ile Al Esaslı Parçacık Takviyeli Metalik Köpük Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Güven, Ş.Y. (2011), Toz Metalurjisi ve Metalik Köpükler, *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, Cilt 1, Sayı 2, 22-28.
- İhvan S. & Polat B.D. & Sezer D. & Keleş Ö. (2011), Alüminyum köpük üretiminde alaşım elementlerinin etkisi, *itüdergisi/d mühendislik Cilt: 10, Sayı: 2, 149-157*.

- Jha, N. & Badkul, A. & Mondal, D.P. & Das, S. & Singh M. (2011), *Sliding wear behaviour of aluminium syntactic foam: A comparison with Al-10 wt% SiC composites*. *Tribology International*, 44: 220–231.
- Kırmızı, G., (2017), *Al7xxx/SiC ve Al Köpükten Oluşan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme Üretimi, Mekanik ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi*, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Kocatürk, O. (2011), *Alüminyum metal köpüklerde atalet etkisi*. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Körner C. & Singer R.F. (2000), *Processing of metal foams challenges and opportunities*, *Advanced Engineering Materials*, 2, 159-165.
- Miyoshi, T. & Itoh, M. & Shigeru, A. & Kitahara, A. (2000), “ALPORAS aluminum foam: Production Process, Properties and applications”, *Advanced Engineering Materials*, 4: 179-183.
- Onck, P.R.R. & Merkerk, V. & Raaijmakers, A. & De Hosson, J.T.H.M. (2005), Fracture of open- and closed-cell metal foams. *Journal Of Materials Science*, 40: 5821–5828.
- Ongunyurt, B. (2019), *İndüksiyon Sinterleme Tekniği Kullanılarak Açık Hücreli 6061 Alaşımli Köpüklerin Üretimi ve Karakterizasyonu*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Orbulov, N.I. & Ginsztler, J. (2012), *Compressive characteristics of metal matrix syntactic foams. Composite: Part A*, 43: 553-561.
- Özer, G. (2005), “Alüminyum esaslı köpük metal üretimi”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*.
- Polat, B.D. & Keleş, Ö. & Taptık, Y. (2010). Metalik Köpükler, Alüminyum Metalik Köpük ve Üretim Yöntemleri, *Metal Dünyası*, 205, 2-7.
- Rajendran, R. & Sai, K.P. & Chandrasekar, B. & Gokhale, A. & Basu, S. (2009), Impact energy absorption of aluminium foam fitted aısı 304l stainless steel tube. *Materials & Design*, 30(5), 1777-1784.
- Secundus G. P. (n.d.). *The Natural History*. New York, NY: Penguin Classics.
- Smitha M. & Guana Z. & Cantwell W.J. (2013), Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique, *International Journal of Mechanical Sciences*, 67, 28-41.
- Sosnick, B. (1951). U.S. Patent 2,553,016. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Taherishargh, M. & Belova, I.V. & Murch, G.E. & Fiedler, T. (2014). On the mechanical properties of heat-treated expanded perlite–aluminium syntactic foam. *Materials and Design*, 63: 375–383.
- Taherishargh, M. & Belova, I.V. & Murch, G.E. & Fiedler, T. (2014), On the mechanical properties of heat-treated expanded perlite–aluminium syntactic foam. *Materials and Design*, 63: 375–383.
- Tao, X.F. & Zhao, Y.Y. (2009), Compressive behaviour of Al matrix syntactic foams toughened with Al particles. *Scripta Materialia*, 61: 461-464.
- Toksoy, A.K. (2009), *Optimization of the axial crushing behavior of closed-cell aluminum foam filled welled 1050 al square-cross section crash boxes*, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fen Bilimleri, İzmir.
- Tunç, A. (2020), “Köpük Metaller ve Uygulama Alanları”, *Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya*
- Tunçer, N. (2006), *Metalik Köpük Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Ünalır, T., (2021), *Alümina ve Alüminyum Köpük Takviyeli Seviye 4 Düzeyinde Yeni Bir Standalone Zırh Sentezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Varyoz, H., Dikdere, O., Dinç, A.M., Tiryaki, M., Aygahoğlu, A., Metal Köpükler, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Özel sayı, 195-200.
- Veale, P.J. (2010) *Investigation of the Behavior of Open Cell Aluminum Foam*, Massachusetts Amherst Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Amherst.
- Wei, J.N. & Gong, C.L. & Cheng, H.F. & Zhou, Z.C. & Li, Z.B. & Shui, J.P. & Han, F.S. (2002). Low-frequency damping behaviour of foamed commercially pure aluminium. *Materials Science and Engineering*, A332, 375–381.

- Wichianrat E. & Boonyongmaneerat Y. & Asavavisithchai S. (2012), Microstructural examination and mechanical properties of replicated aluminium composite foams, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22, 1674-1679.
- Yavuz, İ. (2010), Metalik Köpük Malzemeler ve Uygulama Alanları, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (TATED)*. 2(1), 49-58.
- Yıldırım, A. (2017), *Sentaktik Alüminyum Köpüklerin Modellenmesi ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.
- Yıldırım, Ç.V. (2018), Metalik Köpük Malzemelerin Üretim Yöntemleri, Uygulama Alanları ve Malzeme Özellikleri, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, Cilt 7, Sayı 2, 100-116.
- Yu, C.J. & Eifert, H. & Baumeister, J. & Banhart, J. (1998), “Metal foaming by a powder metallurgy method: production, properties and applications”, *Mat. Res. Innovat*, 2: 181-188.
- Zou L.C. & Zhang Q. & Pang B.J. & Wu G.H., Jiang L.T. & Su H. (2013), Dynamic compressive behavior of aluminum matrix syntactic foam and its multilayer structure, *Materials and Design*, 45, 555-560.