



**Al/B₄C METAL KÖPÜK KATMANLI KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Betül SAYGILI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Betül SAYGILI

07/07/2023

Al/B₄C METAL KÖPÜK KATMANLI KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Betül SAYGILI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

ÖZET

Savunma ve otomotiv sektöründe kullanılabilecek yüksek darbe ve korozyon direncine sahip, düşük ağırlıklı B₄C parçacık takviyeli ve katmanlı alüminyum sandviç köpük (ASK) malzemeler toz metalürjisi (TM) tekniği ile üretilmiştir. Çalışmada B₄C katmanlı ve katmansız olmak üzere 5 farklı kombinasyona sahip ASK malzemeler elde edilmiştir. Al köpükte ana malzeme olarak ön alaşımlı Alumix 231 (Al-Cu %2,5-Mg %0,5-Si %14) alaşımı kullanılırken köpürtücü ajan olarak ise ağırlıkça %1 oranında TiH₂ (<45 µm) kullanılmıştır. Katmanlı ASK malzemelerde ise ana malzeme olarak ön alaşımlı Al2024 tozu (<150 µm), takviye elamanı olarak ise B₄C (<10 µm) parçacıkları kullanılmıştır. Numuneler köpük, köpük ve Al2024 alaşımı katmanlı ve %5,10, 20 oranında B₄C parçacık takviyeli Al2024 alaşımı katmanlı olarak üretilmiştir. 45 dakika boyunca homojen olarak karıştırılan tozlar sıcak presleme kalıbına sırası ile doldurulduktan sonra 25 MPa basınç altında ön presleme ardından 550 °C sıcaklıkta 30 dakika bekletilmiş ve 200 MPa basınç altında sıcak presleme yapılarak köpürebilir preform malzeme üretilmiştir. Köpürebilir preform malzemeler sınırlandırılmış çelik kalıp içerisinde 750 °C sıcaklıkta 11(içerde 10) dakikada köpürtme işlemi yapılarak B₄C parçacık katmanlı ASK malzemeler üretilmiştir. Kompozit katmanlı ASK malzemelerin mikroyapı, yoğunluk, gözenek boyutu ve morfoloji analizleri yapılmıştır. En yüksek yoğunluğun %99,15 ile Al2024 alaşımında olduğu ve B₄C oranı arttıkça bağıl yoğunlukların azaldığı gözlenmiştir. B₄C miktarı arttıkça sıkıştırılabilir azalmış, topaklanma artmıştır. B₄C içermeyen malzemelerde TiH₂ ve Si parçacıkların etrafında gözeneklere rastlanmıştır. Homojenliğin en iyi olduğu ve küresele en yakın gözeneklerin olduğu malzemenin Alx231 olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 91512
Anahtar Kelimeler : Toz metalürjisi, Al köpük, sıcak presleme
Sayfa Adedi : 59
Danışman : Doç. Dr. Ramazan ÇITAK
İkinci Danışman : Öğr. Gör. Dr. Üyesi Halil KARAKOÇ

Al/B₄C METAL FOAM LAYER COMPOSITE MATERIALS PRODUCTION AND INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES

(Master's Thesis)

Betül SAYGILI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

ABSTRACT

Low-weight B₄C particle reinforced and layered aluminum sandwich foam (ASK) materials with high impact and corrosion resistance that can be used in the defense and automotive industries are produced by powder metallurgy (TM) technique. In the study, ASK materials with 5 different combinations, B₄C layered and unlayered, were obtained. While the pre-alloyed Alumix 231 (Al-Cu 2.5%-Mg 0.5%-Si 14%) alloy was used as the main material in Al foam, 1% by weight TiH₂ (<45 µm) was used as the blowing agent. In the layered ASK materials, pre-alloyed Al2024 powder (<150 µm) was used as the main material and B₄C (<10 µm) particles were used as the reinforcement element. The samples were produced with foam, foam and Al2024 alloy layer and 5.10-20% B₄C particle reinforced Al2024 alloy layer. After the powders, which were mixed homogeneously for 45 minutes, were filled into the hot pressing mold sequentially, pre-pressing under 25 MPa pressure, then kept for 30 minutes at 550°C and hot pressing under 200 MPa pressure, foamable preform material was produced. B₄C particle layered ASK materials were produced by foaming the foamable preform materials in a limited steel mold at 750°C temperature for 11(minute 10) minutes. Microstructure, density, pore size and morphology analyzes of composite layered ASK materials were examined. It was observed that the highest density was 99.15% in the Al2024 alloy and the relative densities decreased as the B₄C ratio increased. As the amount of B₄C increases, the compressibility decreases and agglomeration increases. There are pores around the TiH₂ and Si particles in the materials that do not contain B₄C. It has been observed that the material with the best homogeneity and the closest pores to the spherical is Alx231.

Science Code : 91512
Key Words : Powder metallurgy, Al foam, Hot pressing
Page Number : 59
Supervisor : Assoc. Prof. Ramazan ÇITAK
Co-Supervisor : Asst. Prof. Dr. Halil KARAKOÇ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca derin bilgisi ve deneyimleri ile beni yönlendiren, desteğini eksik etmeyen ve her daim tezim için yardımcı olan başta hocam Prof. Dr. Ramazan ÇITAK'a teşekkür ederim. Yine değerli yardım ve katkılarıyla çalışmamda destek olan Öğr. Gör. Dr. Halil KARAKOÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca her daim yanımda olan ve hem maddi hem manevi yardımlarını esirgemeyen başta ebeveynlerim annem ve babama ardından iki erkek kardeşime tüm içtenliğimle teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. METALİK KÖPÜKLER.....	3
2.1. Metalik Köpükler Tarihçe	3
2.2. Metalik Köpükler Özellikleri	3
3. SANDVIÇ KOMPOZİT KÖPÜK.....	7
3.1. Kompozit Köpük Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	7
3.2. Sandviç Kompozit Köpük Üretim Yöntemleri	9
3.2.1. Ergiyik metale gaz enjekte edilmesi	10
3.2.2. Ergiyik metale köpürtücü madde eklenmesi.....	11
3.2.3. Katı-gaz ötektik katılaştırma	12
3.2.4. Hassas döküm	13
3.2.5. Toz metalurjisi yöntemiyle metalik köpük üretimi.....	14
3.3. Sandviç Köpük Kompozitlerin Uygulama Alanları	16
3.4. Literatür Çalışması	23
4. MALZEME VE METOT	27
4.1. Malzeme	27

	Sayfa
4.2. Metot	27
4.3. Tozların Karıştırılması	29
4.3.1. Sıcak presleme	30
4.3.2. Köpürtme işlemi.....	31
4.4. Karakterizasyon Testleri	32
4.4.1. Yoğunluk ölçümü hesaplanması	32
4.4.2. Gözenek boyutları ve küresellik faktörünün hesaplanması	32
4.4.3. Mikroyapı analizleri.....	33
4.4.4. Basma deneyleri.....	34
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	37
5.1. Malzemelerdeki Yoğunluk Değişimi	37
5.2. Malzemelerdeki Mikroyapı Değişimi	38
5.3. Köpüklerin Gözenek Yapısı ve Dağılımı	45
5.5. Malzemelerin Basma Deneyi ve sonuçları.....	49
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ.....	59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Deneyde kullanılan malzemeler ve özellikleri	27
Çizelge 4.2. Numune numarası, malzemeler ve karışım oranları	29
Çizelge 4.3. Keller dağılayıcısı içeriği	34



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Açık gözenekli metalik köpük	4
Şekil 2.2. Kapalı gözenekli metalik köpük	4
Şekil 2.3. Hücre ve hücre duvarı	4
Şekil 2.4. Hücre köşesi	4
Şekil 2.5. Metalik köpük	5
Şekil 2.6. Farklı metalik köpüklere ait görüntüler	5
Şekil 3.1. Hafif ağırlıklı alüminyum sandviç panel	7
Şekil 3.2. Sandviç kompozit köpük üretimi	9
Şekil 3.3. Sandviç köpük bileşenleri	10
Şekil 3.4. Eriyik metale gaz enjektisi yöntemi.....	11
Şekil 3.5. Eriyik metale köpürtücü ilavesi yöntemi	12
Şekil 3.6. Katı gaz ötektik ile üretilen köpük	13
Şekil 3.7. Hassas döküm yöntemi ile köpük üretimi	13
Şekil 3.8. Hassas dökümle üretilen köpüğün SEM görüntüsü ve üretilen bazı parçalar	14
Şekil 3.9. Köpük üretiminde toz metalurjisi basamakları	14
Şekil 3.10. Toz metalurjisi yöntemi	15
Şekil 3.11. Otomotiv alanındaki uygulamalar	17
Şekil 3.12. Alüminyum sandviç panelden yapılmış bir kaldırma kolu	17
Şekil 3.13. Çarpışma kutusu kullanımı	18
Şekil 3.14. Çarpışma kutuları örnekleri	18
Şekil 3.15. Viyadükte kullanılan köpük yapılar	19
Şekil 3.16. Alüminyum ısı değiştirici	21
Şekil 3.17. Bakır değiştirici	21
Şekil 3.18. Alüminyum köpükten yapılan susturucu	22

Şekil	Sayfa
Şekil 3.19. Zamana bağlı olarak sandviç köpük üretiminin radyoskopik görüntüleri	23
Şekil 3.20. Statik delme (a) üst yüzey (b) alt yüzey	24
Şekil 3.21. Hasar türleri	24
Şekil 4.1. Üretim akış şeması.....	28
Şekil 4.2. Toz karıştırma işlemi	29
Şekil 4.3. Sıcak presleme ünitesi; (a) hidrolik pres ve sıcak presleme ünitesi (b) sıcak presleme kalıbı (c) sıcak preslenmiş köpürebilir preform malzeme (d) köpürebilir preform blok malzemenin presleme sonrası ölçüleri.	30
Şekil 4.4. Fırın içerisinde köpürme işlemi	31
Şekil 4.5. 60x60x32 mm ölçülerine sahip köpürtülmüş numuneler (a) Alx231 metalik köpük (b) Al2024 tabakalı ASK (c) Al2024%5B4C tabakalı ASK (d) Al2024%10B4C tabakalı ASK (e) Al2024%20B4C tabakalı ASK.....	32
Şekil 4.6. Hassas kesici	33
Şekil 4.7. Optik mikroskop	34
Şekil 4.8. Basma deneyi yapılan cihaz çeneleri	35
Şekil 5.1. Katmanlı ASK malzemelerin köpürtme öncesi yoğunluk değişimleri	37
Şekil 5.2. Köpük malzemelerin gözenek boyutları değişim grafiği.....	48
Şekil 5.3. Köpük malzemelerin yoğunluk değişimleri ve gözeneklilik oranları.....	48
Şekil 5.4. Metalik köpük malzemelerin maksimum basma gerilimi	49
Şekil 5.5. Metalik köpük malzemelerin maksimum basma gerinimi.....	49
Şekil 5.6. Metalik köpük malzemelerin maksimum basma gerinimindeki enerji miktarı.....	50
Şekil 5.7. (a) Alx231 malzemenin, (b) Alx231/Al2024 (c) Al2024%5B4C (d) Al2024%10B4C (e) Al2024%20B4C malzemenin basma testi eğrileri..51	
Şekil 5.8. Metalik köpük malzemelerin basma test eğrileri.....	52
Şekil 5.9. Metalik köpük numunelerin basma test deneyleri	53

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Al ₂ O ₃ /B ₄ C ASK malzemenin gözenek yapısı	33
Resim 5.1. Köpürebilir Al _x 231 metalik köpük malzemesinin sıcak presleme sonrası SEM haritalama görüntüsü	39
Resim 5.2. Al ₂ O ₃ alaşım tabakasının sıcak presleme sonrası SEM haritalama görüntüsü	41
Resim 5.3. Al ₂ O ₃ /B ₄ C kompozit tabakasının sıcak presleme sonrası SEM haritalama görüntüsü.	42
Resim 5.4. Al _x 231 metalik köpük malzemesinin (a) SEM resmi, (b) genel EDS pikleri.....	43
Resim 5.5. Al ₂ O ₃ katmanlı Al _x 231 metalik köpük malzemesinin (a) SEM resmi.....	44
Resim 5.6. Al ₂ O ₃ /B ₄ C katmanlı Al _x 231 metalik köpük malzemesinin (a) SEM resmi	45
Resim 5.7. Köpürtme sonrası gözeneklerin makro resimleri.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla aşağıda verilmiştir:

Simgeler	Açıklamalar
°C	Derece Santigrat
Al	Alüminyum
B ₄ C	Bor Karbür
g	Gram
J	Joule
mm	milimetre
TiH ₂	Titanyum Hidrür
ZrO ₂	Zirkonyum Dioksit

Kısaltmalar	Açıklamalar
Al	Alüminyum
Al2024	2024 Alüminyum Alaşımı
ASK	Alüminyum Sandviç Köpük
MMK	Metal Matrisli Kompozit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-ışınları Difraktometresi

1. GİRİŞ

Hızla değişen teknoloji tüketicilerin ihtiyaçlarını daha farklı yönlerle çekmeye başlamıştır. Özellikle ergonomik açıdan insan yapısına uyumlu olan malzeme üretiminin yanı sıra mühendislik açısından da insan ihtiyaçlarına cevap veren karmaşık yapıda malzeme üretimi çalışmaları yapılmaktadır. Metalik köpük bu anlamda ihtiyaçları karşılamaktadır. İçerisindeki gözenekli yapı sayesinde kazanmış olduğu birtakım özellikler bazı malzemelerin yetersiz olduğu alanlarda kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Böylelikle hafiflik ve mukavemetin istendiği otomotiv, demiryolu taşımacılığı, uçak ve uzay sanayi, gemi yapımı gibi endüstrilerde kullanılmaktadır (Pelit, 2012).

Metalik köpük üretiminde çinko, demir, magnezyum, alüminyum, nikel gibi elementler kullanılabilir. Aralarında alüminyum bilhassa sağlamış olduğu hafiflik sayesinde tercih edilmektedir (Pelit, 2012).

Metalik köpük üretimi 1940'lı yıllara kadar dayanmakta olup Benjamin Sosnick tarafından Alüminyumun civa ile köpürtülmesine dayanmaktadır (Ozan ve Katı, 2011). 1950'li yıllarda farklı köpürtücüler keşfedilmiş; 1980'lerde metalik köpük üretimi tüm dünyaya yayılmaya başlanmıştır (Onuklu, 2015).

Farklı üretim yöntemleri olan metalik köpükler için yöntemler temel olarak iki prensibe dayanmaktadır. Bunlar; metal eriyiklerin direk köpürtülmesi ve sıkıştırılmış tozların dolaylı yoldan köpürtülmesidir (Güven, 2011).

Al metal köpük sağlamış olduğu özellik bakımından birçok alanda kullanılmaktadır. Fakat daha iyi özellikler kazandırarak kaliteyi arttırmak mümkündür. Bunun için mühendisler Al metal köpüğe seramik katkılar ilave ederek katmanlı kompozit köpük üretimi gerçekleştirmektedir. Böylelikle kararlılığı, rijitliği, enerji sönümleme kabiliyeti gibi iyi özellikleri olan bu malzemeler çoğu ihtiyacı karşılayarak insan yaşamına kolaylık sağlamaktadır.

Bu çalışmada B₄C takviyeli ve katmanlı alüminyum sandviç kompozit malzemeler T/M yöntemi ile üreterek hafif, yüksek korozyon direnci, yüksek delinebilme dirençli ve

yüksek basma dayanımı olan başta otomotiv ve savunma sanayi sektörü olmak üzere endüstrinin ihtiyacını karşılayabilecek bir malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Toz metalürjisinde sıcak presleme tekniği kullanarak B_4C katmanlı ve katmansız beş farklı Alüminyum Sandviç Köpük (ASK) malzemeler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Köpük Al malzemedeki ana madde Alumix 231 ile köpürtücü ajan olarak TiH_2 kullanırken katmanlı ASK malzemeler için ana madde Al_{2024} alaşımı ile %5,10 ve 20 oranlarında B_4C ilave edilmiş ASK malzemeler elde edilmiştir. Toz halinde elde edilen malzemeler sıcak presleme için homojen olarak 45 dakika karıştırıldı. 25MPa ön presleme sonrası 550° C sıcaklık ve 200 MPa basınç altında 30 dakika bekleterek köpürebilir preform malzeme elde edilmiştir. Köpürebilir preform malzemeleri sınırlandırılmış çelik kalıp içerisinde 750°C sıcaklıkta 11 dakika bekleterek B_4C takviyeli ASK malzemeler üretilmiştir. Üretilen ASK köpük malzemelerin mikroyapı, gözenek boyutu, yoğunluk ve mekanik testlerini tayin edip kıyaslama gerçekleştirilmiştir.

2. METALİK KÖPÜKLER

2.1. Metalik Köpükler Tarihçe

Metal köpüklerle ilgili ilk çalışmalar 1948 yılında Benjamin Sosnick tarafından yapıldı (Çinici, 2012). Alüminyum ve cıva karışımı kullanarak yüksek basınçta eriyik elde etmiş ve ardından basıncı kaldırarak cıva buharlaşması sonucu köpük elde etmiştir.

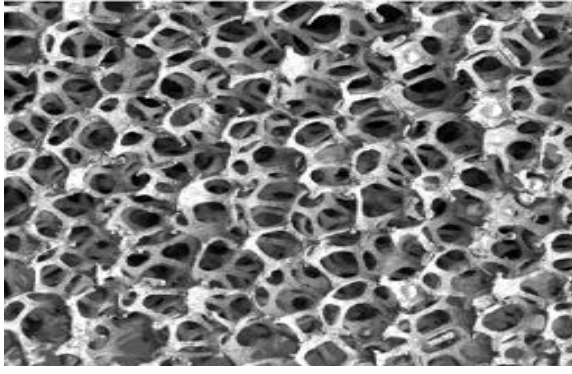
1950li yıllarda sıvı metallerin viskozitesinin arttırılmasıyla daha kolay köpük elde edildiği gözlenmiştir. Metal oksit veya oksit parçaları eklenerek köpük oluşumu kolay hale gelmiştir. Aynı yıllarda, William Elliot ve Stuard Fiedler alüminyum köpük üreterek köpükleştirme işlemlerini ve olası kullanım alanlarını araştırdı (Onuklu, 2015). Ayrıca TiH_2 , ZrH_2 ve $CaCO_3$ gibi diğer elementlerin köpürtücü özellikleri üzerine araştırmalar yapılmıştır.

1960lı yıllarda ise Hardy ve Peisker patent almış oldukları yöntemde köpürtücü ajanları direkt olarak yarı eriyik metale eklemiştir. Ayrıca viskoziteyi arttırmak amaçlı eriyik metale silisli bir malzeme ilave etmişlerdir. Yine köpürtücü ajan olarak metal hidritleri yerine hidrat killeri kullanmışlardır (Katı, 2011).

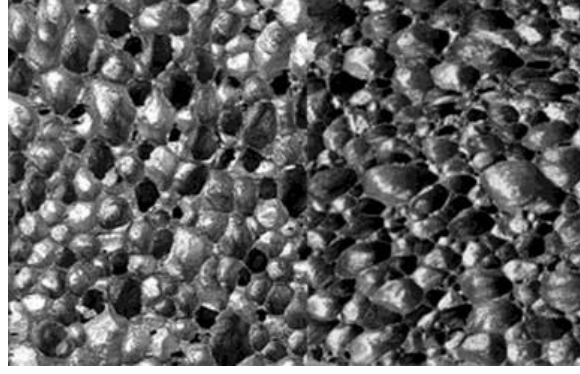
1970li yıllarda Alüminyumun köpük yapımı için uygun olduğu kanısına varılmıştır. Dolayısıyla 1980 ve 90lı yıllarda çalışmalar hız kazanmıştır. Çeşitli üretim yöntemleri bulunarak günümüze kadar gelecek olan çalışmalar yapılmıştır (Onuklu, 2015).

2.2. Metalik Köpükler Özellikleri

Metal köpükler, gözenekli yapısı itibariyle ısı davranışları, enerji absorbe etme yetenekleri, düşük yoğunluk, yüksek kesme ve kırılma mukavemetleri ile farklı uygulama alanlarında tercih edilmektedir (Güven, 2011). Metal köpükler yapısı itibariyle şekil 2.1. ve şekil 2.2’de görüldüğü gibi açık gözenekli ve kapalı gözenekli olarak ikiye ayrılmaktadır. Açık gözenekli köpüklerin oluşumu birbiri ile iç içe geçmiş yapılardan meydana gelirken kapalı gözenek yapılı köpükler birbirine bağlı olmayan gözeneklerden meydana gelmektedir (Özer, 2005).

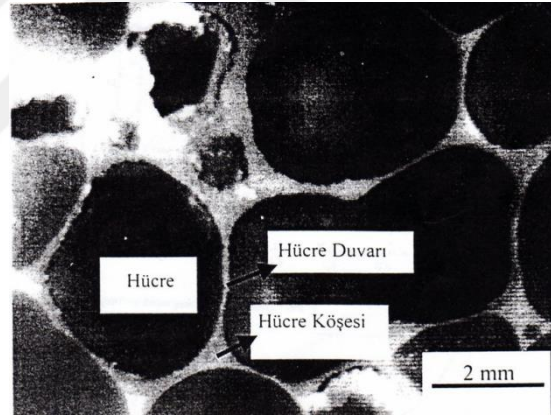
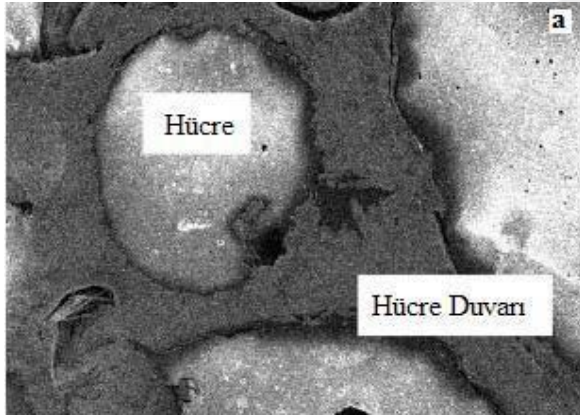


Şekil 2.1. Açık gözenekli metalik köpük (Onuklu, 2015)



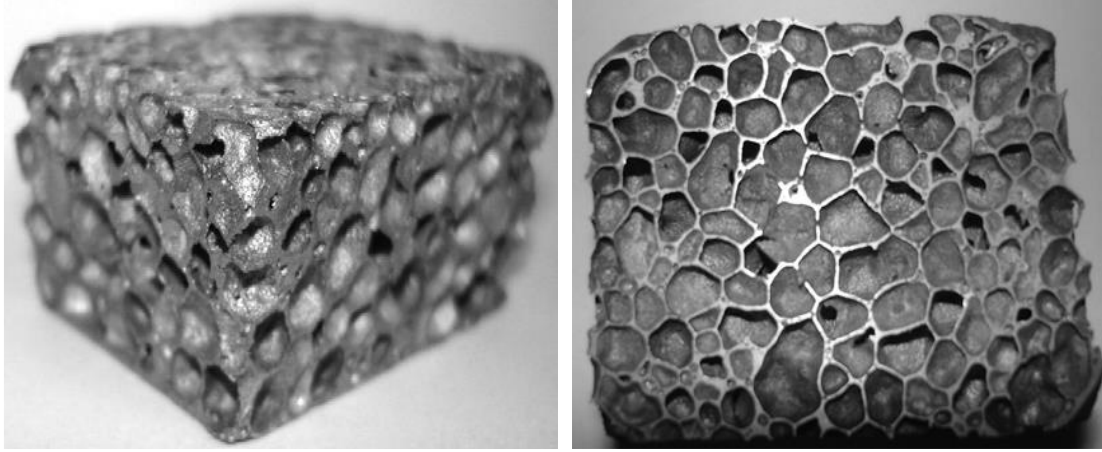
Şekil 2.2. Kapalı gözenekli metalik köpük (Degin, 2003)

Metalik köpük içinde gaz kabarcıklarının her birinin meydana getirdiği alan hücre olarak adlandırılır. Hücre, yapısı itibariyle hücre duvarı ve hücre köşesinden oluşmaktadır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de görüldüğü gibi iki gaz kabarcığının meydana getirdiği sınır hücre duvarı iken üç gaz kabarcığının kesişim bölgesi hücre köşesidir (Özer, 2005).



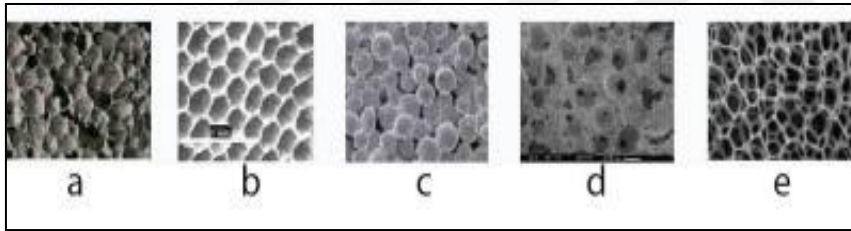
Şekil 2.3. Hücre ve hücre duvarı (Özer, 2005) Şekil 2.4. Hücre köşesi (Özer, 2005)

Tipik olarak bakıldığında metalik köpükler %75-%90 oranında gözenek yapısına sahip; gaz veya katı halde bulunan yapılardır. (Yıldırım, 2018) Üretiminde bilhassa gaz kabarcıklarının oluşumu ve bunların homojen dağılması baz alınmaktadır (Şekil 2.5) Böylelikle sağlamış oldukları mekanik ve kimyasal özellikler ile farklı kombinasyonlar ile kullanılabilirler.



Şekil 2.5. Metalik köpük (Gökmen, 2009)

Metalik köpük terimi boşluk olan tüm metal yapılar için kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra hücreli metal, gözenekli metal, metal sünger gibi farklı isimler de köpük tanımlamasında kullanılmaktadır (Özer, 2005). Burada değişen gözenek morfolojisidir. Şekil 2.6'da farklı metalik köpüklere ait görüntülemeler görülmektedir.



Şekil 2.6. Farklı metalik köpüklere ait görüntüler (Banhart, 2000)

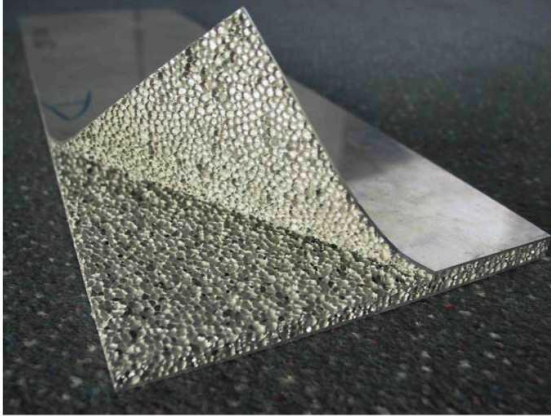
3. SANDVIÇ KOMPOZİT KÖPÜK

Metalik köpükler her ne kadar bazı malzemelere göre iyi özellikler taşımış olsa da bazı istenilen kriterlerde yetersiz kalmıştır. Dolayısıyla bilim insanları yeni çalışmalar üzerinde çalışarak metal köpük üzerine bazı iyileştirici özellikler eklemiştir. Kompozit metal köpük bu şekilde uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır.

Kompozit malzemeler iki farklı malzeme bileşimlerinden oluşan kompleks yapıli malzemelerdir. Kompozit köpüklerde bir matris elemanı, takviye elemanı ve köpük malzeme bulunmaktadır. (Kara, 2012)

Bir kompozit köpük türü olan sandviç metal köpük de birçok alanda kullanılmaktadır. İki metal malzeme arasına köpürtülerek oluşturulmuş metal içeren malzemelerdir (şekil 3.1).

Sandviç metal yapılar ya yapıştırılarak ya da haddelenerek elde edilmektedir. Son işlem olarak fırında köpürtme işlemi ile merkezdeki köpürtülecek malzeme köpürerek genişler fakat iki levhanın yoğunluğunda herhangi bir değişiklik olmaz (Çinici, 2012).



Şekil 3.1. Hafif ağırlıklı alüminyum sandviç panel (Kara, 2012)

3.1. Kompozit Köpük Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Kompozit metal köpükler yapıları itibariyle hem hafif hem dayanımlı malzemelerdir. Rijitlik- ağırlık oranları yüksek olduğundan dolayı ısı ve ses izole etme oranları da iyidir.

Polimer köpüklerle kıyaslandığında metal köpükler daha rijit ve yüksek sıcaklıkta karardır. Seramik köpükler ise diğerlerine kıyasla daha kırılmandır. (Kısasöz, 2018)

Köpük kompozit üretiminde alüminyum, alümina, borik asit, kübik bor nitrür, polivinil alkol gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bunların arasında en çok alüminyum tercih edilmektedir.

Alüminyum

Alüminyum yerkabuğunun %8,2'sini oluşturan gümüş, sünek ve hafif bir metaldir. Yerkabuğunda oksijen ve silikondan sonra en çok bulunan metaldir. Metal kullanımında demirden sonra en çok kullanılan malzemedir (Zor, 2018).

Alüminyumun genel özelliklerine bakıldığında zaman ilk olarak 2,7 g/cm³ yoğunluğunda olup oldukça hafif bir malzemedir. Bilinmektedir ki mühendislik uygulamalarında hafiflik maliyetten de aynı oranda tasarruf sağlamaktadır. Dolayısıyla uçak sanayiden otomotive birçok alanda uygulanmaktadır. Bir diğer özelliği kolayca eğme, kesme, delme gibi işlemler yapılabilir. Kolay bir şekilde işlendiği için yine tercih edilmektedir. Aynı şekilde ekstrüzyon vb şekillendirme işlemlerine kolayca adapte olabilmektedir alüminyum. Isı ve elektriği de iyi iletir ve mükemmel bir korozyon direnci sağlamaktadır (Surappa, 2003).

Takviye elemanı

Alüminyumun ticari olarak daha iyi kullanımı için bazı seramik partiküller ilave edilmektedir (Toptan & Kumdalı, 2006). Bu seramik katkı ilavesi ile;

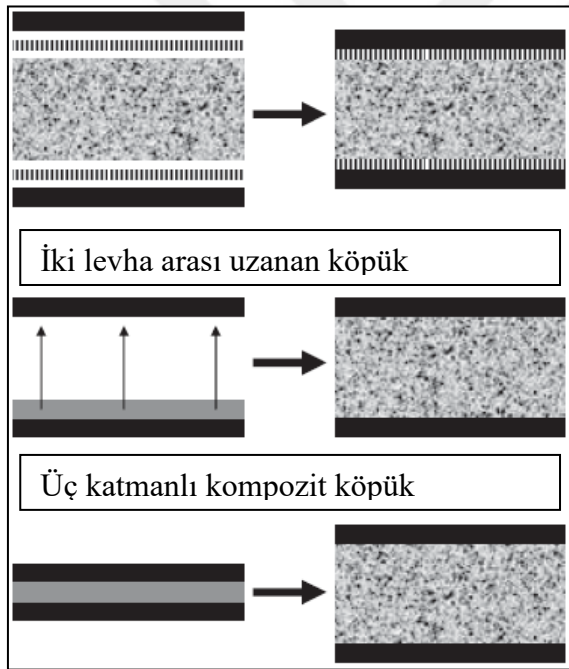
- Metal köpüğün kararlılığını artırır.
- Doğrusal uzamayı artırır.
- Elastisite modülünü artırır.
- Rijitliği artırır.
- Enerji sönümleme kapasitesini artırır.
- Basma mukavemetini artırır (Başer, 2012).

Köpürtücü madde

Sandviç kompozit köpüklerde köpürtücü olarak ise TiH_2 , ZrH_2 , $CaCO_3$ gibi maddeler kullanılmaktadır (Banhart, 2001).

3.2. Sandviç Kompozit Köpük Üretim Yöntemleri

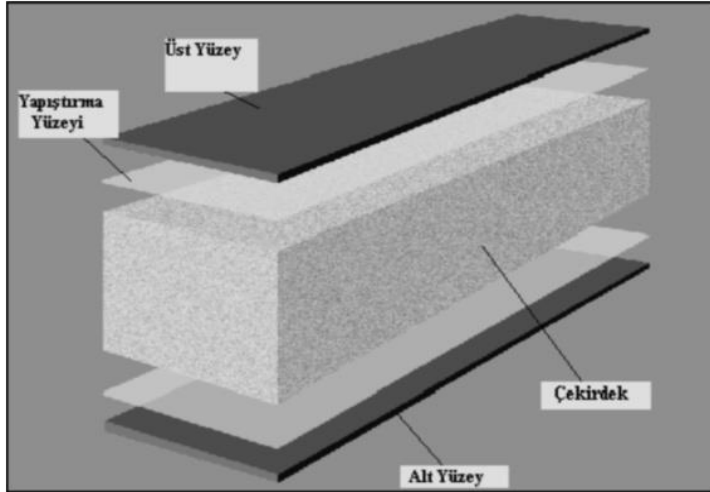
Sandviç kompozit köpük şekil 3.2’ de görüldüğü gibi bileşenleri 3 farklı şekilde bir araya gelmektedir. Bu yöntemde baz alınan ana amaç dış iki levha ile içte bulunan metal köpük arasında bir bağ oluşturmaktır. Bunun için yapıştırma, lehim ve difüzyon bağı gibi yöntemler bulunmaktadır (Ashby ve Gibson, 2000).



Şekil 3.2. Sandviç kompozit köpük üretimi (Banhart ve Seeliger, 2008)

Yapıştırma tekniğinde arada epoksi yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Bu yöntemin dezavantajları arasında ilk olarak maliyetin yüksek olması ardından rijitlikte düşme meydana gelmesidir.

İki tabaka dışında üçlü tabakalı yapılarda bulunmaktadır. Bu üçlü tabakalı sandviç köpük malzemede levha kısımlar genellikle alüminyum veya çelikten yapılmaktadır (şekil 3.3). Merkezdeki köpük ile yüzey arasında metalik bağ bulunmaktadır (Güler ve Ulay, 2010).



Şekil 3.3. Sandviç köpük bileşenleri (Güler ve Ulay, 2010)

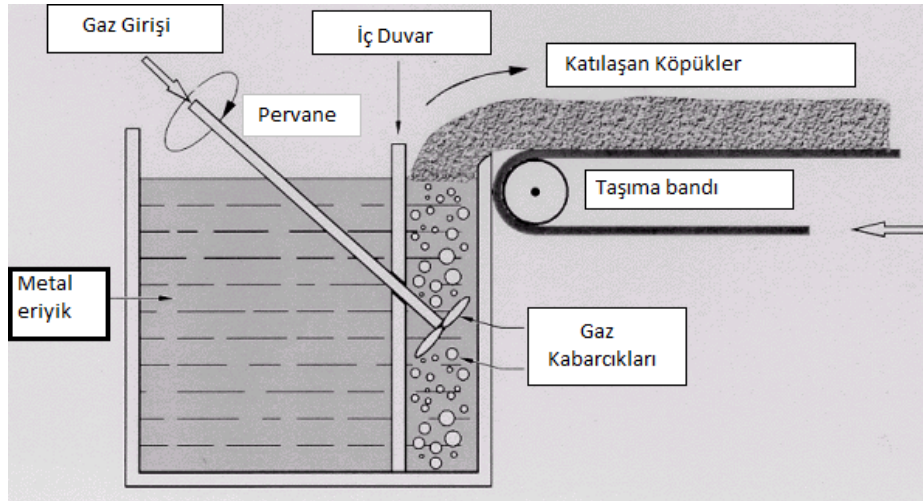
Çekirdek ve katman olarak üretilen sandviç köpük kompozitler içerik olarak temelde 2 yöneme dayanmaktadır. Bunlar; metal eriyiklerin direk köpürtülmesi ve sıkıştırılmış tozların dolaylı yoldan köpürtülmesidir. Yaygın olarak kullanılan köpük teriminin anlamı üzerine bir tarif yapılacak olursa; bir sıvı içerisinde gaz kabarcıklarının (boşlukların) dağılmasıyla oluşan yapılar olarak tarif edilebilir, bu yapılarda sıvı katılaşmasına izin verilerek gözenek morfolojisi korunur, elde edilen yapının son hali katı köpük halini alır. (Gökmen, 2009)

Genel olarak bakıldığında 5 çeşit kompozit köpük üretim yöntemi bulunmaktadır.

3.2.1. Ergiyik metale gaz enjekte edilmesi

Genellikle bu yöntemle Alüminyum alaşımlarının eldesi yapılmaktadır. Bu yöntemde önce metal, ergiyik haline getirilmektedir. Ardından eriyik metalin viskozitesini artırmak için SiC, Al₂O₃ veya MgO tanecikleri kullanılmaktadır ve kompozit metal elde edilmektedir. Bu üretimde dönen bir pervane aracılığı ile ergiyik maddeye argon, azot veya hava üflenir. Böylelikle ergiyik madde köpük hale gelmektedir. Dönen hava sayesinde gaz kabarcıkları oluşmakta ve eşit şekilde dağılım göstermektedir. Son olarak taşıma bandı ile taşınan köpükler soğutulma işlemine tabi tutulmaktadır (Banhart, 2001). Bu yöntem şekil 3.4'te verilmiştir.

Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken bir husus da takviye elemanlarının eklendiği miktardır. Birçok üretimde olduğu gibi denge esastır. Yani takviye ne çok az ne de çok fazla olmalıdır. Aksi takdirde istenen homojen bir yapı elde edilememektedir. Az bir katkı kararlılık seviyesini etkilerken fazla katkı köpüğün viskozite durumunu etkilemektedir (Onuklu, 2015).

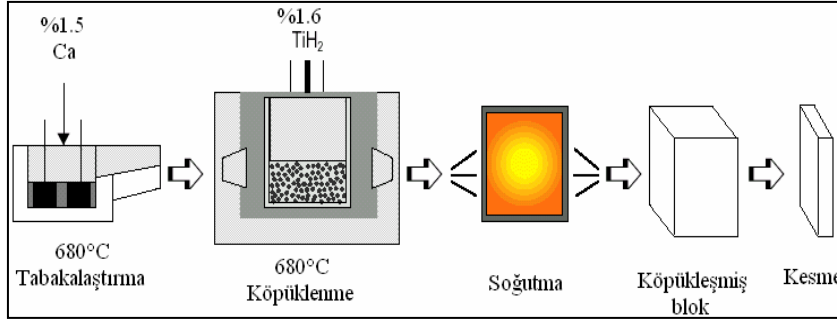


Şekil 3.4. Eriyik metale gaz enjeksiyonu yöntemi (Gawdzinska ve Gucma, 2015)

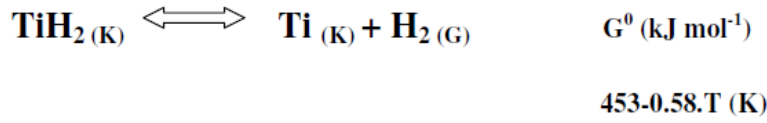
Bu yöntemle üretilen sandviç köpük yoğunluğuna bakıldığında ortalama olarak 0,069-0,54 g/cm³ aralığında bir miktar çıkmaktadır (Banhart, 2001). Bu yöntemin avantajlarına bakılırsa büyük oranda devamlı bir üretim imkanı sağlamaktadır. Başka yöntemlere göre daha ucuzdur ve daha az yoğunluklu üretimler elde edilmektedir. Dezavantajlarına baktığımızda köpük son olarak kesme işlemine ihtiyaç duyabilmektedir. Ayrıca takviye taneleri kırılmalığa neden olabilmektedir (Fuse, Badheka, Patel ve Anderson, 2021).

3.2.2. Ergiyik metale köpürtücü madde eklenmesi

Ergimiş olan metale köpürtücü madde eklenerek de metal köpük elde edilebilmektedir. Bu yöntemde köpürtücü maddeler ısı etkisi ile birlikte ayrışmaya girerek gaz kabarcıkları meydana getirir ve böylelikle metal köpük oluşmasına neden olur. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi metal eriyik içerisine ilave katıldıktan sonra gaz açığa çıkarmasına neden olacak köpürtücü bir madde eklenmektedir. Son olarak eriyiğin katılaşması sağlanarak ergiyikten katı bir köpük elde edilmektedir (Onuklu, 2015). Köpürtücü maddeden sıcaklığın etkisiyle ayrılan H₂ gazının kimyasal reaksiyonu eşitlik 3. 6'da verilmiştir.



Şekil 3.5. Eriyik metale köpürtücü ilavesi yöntemi (Çinici, 2012)



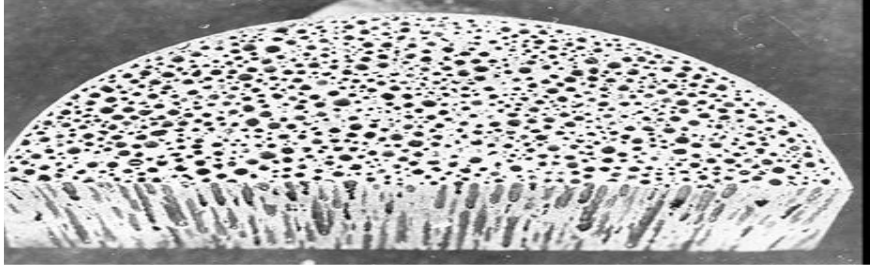
Eşitlik 3.6. Köpürtücü madde gaz salınımı (Pelit, 2012)

Bu yöntemin en önemli avantajı oldukça homojen bir yapı elde etmektir. Dezavantaj olarak katkı malzemelerinden dolayı maliyeti yüksektir (Özer, 2005).

3.2.3. Katı-gaz ötektik katılaştırma

Bu metotta esas alınan sıcaklığın kontrol altına alınarak bir katılaştırma işlemi gerçekleştirmektir. Böylelikle ötektik sistem de kontrol altına alınmaktadır. İlk olarak metal belli bir sıcaklık ve basınç dikkat edilerek eritilerek uniform bir halde elde edilir. Ardından ötektik bir dönüşüm meydana gelebilmesi için erimiş yapı soğutulur. Tabii bu soğuma hızlı değil yavaş gerçekleşir. Dolayısıyla metal de yavaşça katılaşır ve böylelikle erimiş yapı içerisinde hava kabarcıkları oluşmaya başlar. Oluşan bu hava kabarcıkları metalin içinde saklanarak gözenek yapıları oluşturur (Banhart, 2000). Bahsedilen yöntem şekil 3.6’da gösterilmiştir.

Bu yöntem vasıtasıyla birçok malzemeden köpük üretimi yapılmaktadır. Örnek olarak magnezyum, bakır, alüminyum, krom, krom ve çelikler verilebilir. Bu üretim yönteminin olumsuz etkisine bakıldığında soğuma esnasında iri ve ufak yapıların bir araya gelmesi kaynaklı homojen olmayan bir görüntü meydana gelebilmektedir. (Onuklu, 2015)

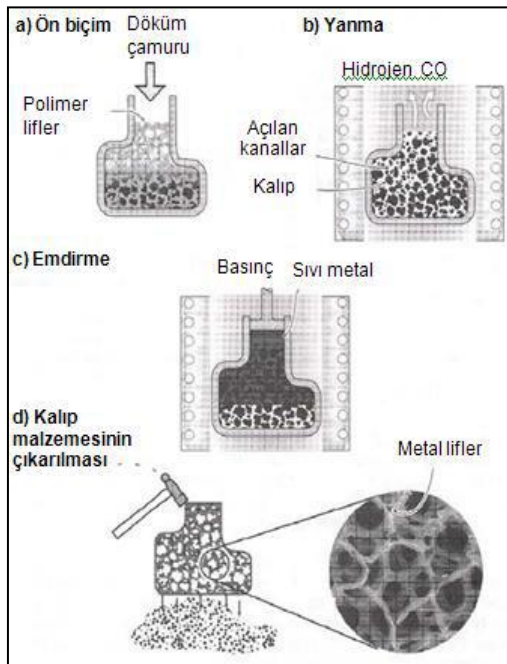


Şekil 3.6. Katı gaz ötektik ile üretilen köpük (Banhart, 2000)

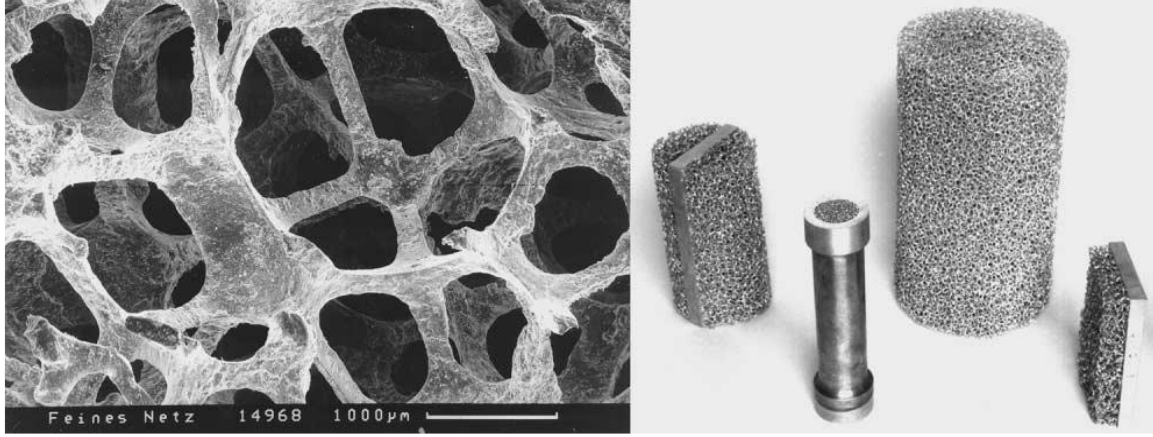
3.2.4. Hassas döküm

Genellikle açık gözenekli köpük üretiminde kullanılan hassas döküm yöntemi infiltrasyon olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemde gözenekli yapıya sahip bir model kullanılmaktadır. Kuma gömülen model kurutularak döküm kalıp çamuru ile kaplanmaktadır. Fırın işlemine tabi tutulan malzeme ardından soğutularak üzerine metal alaşımı eklenmek suretiyle tamamlanmaktadır. Soğuma sonrası metal köpük malzemeden ayrılmaktadır (Katı, 2011).

Şekil 3.7’de hassas döküm aşamaları ile üretilen metal köpük yöntemi görülmektedir. Şekil 3.8’de ise üretilen köpüğün elektron mikroskop görüntüsünde görünümü ve üretilen malzemeler bulunmaktadır.



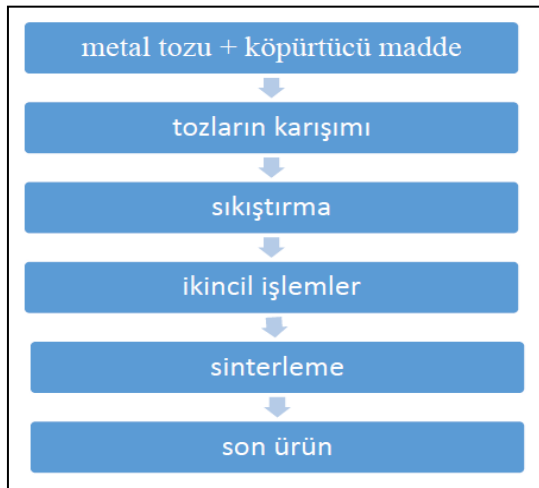
Şekil 3.7. Hassas döküm yöntemi ile köpük üretimi (Ashby ve Evans, 2000)



Şekil 3.8. Hassas dökümle üretilen köpüğün SEM görüntüsü ve üretilen bazı parçalar (Kara, 2012)

3.2.5. Toz metalurjisi yöntemiyle metalik köpük üretimi

Bu yöntemde, metal toz olarak alınmakta ve üzerine köpükleştirici madde eklenerek karışım haline getirilmektedir. Bu karışım presleme ve şekillendirme işlemlerinden geçerek köpük haline gelebilecek ön ürünü oluşturmaktadır. Ardından gelen ısıtma yani sinterleme işlemi ile köpükleştirici madde bozunur ve gaz ortaya çıkarmaktadır (Çinici, 2012), (Onuklu, 2015). Çıkan gaz metalin hacim olarak genişlemesine ve gözenek oluşturmaya neden olmaktadır. Şekil 3.9’da toz metalurjisi adım olarak gösterilmiştir.

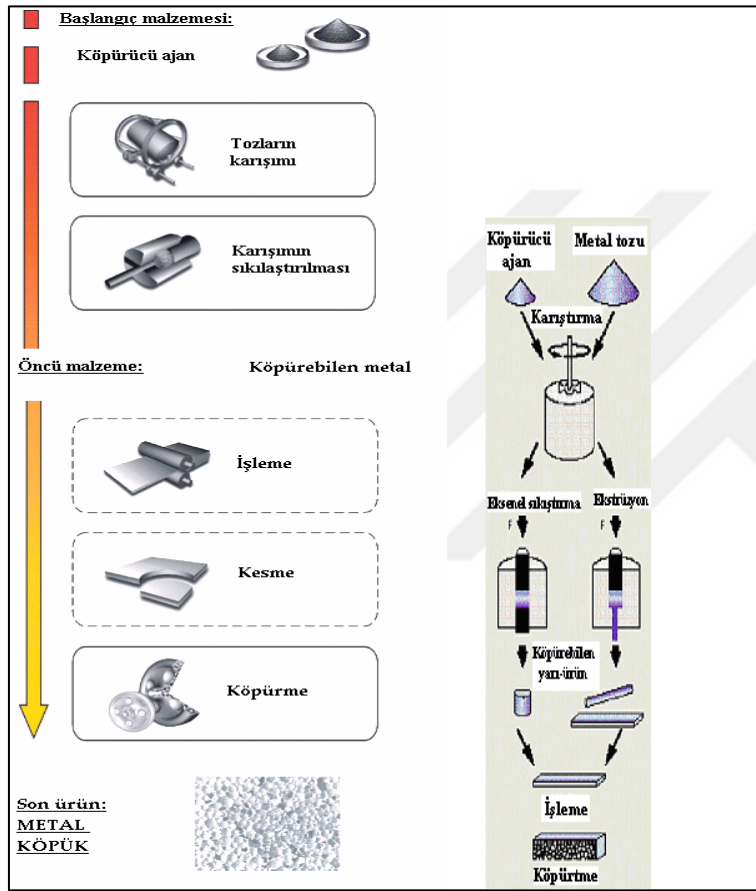


Şekil 3.9. Köpük üretiminde toz metalurjisi basamakları (Güven, 2011)

Toz metalurjisinde katılaştırma işlemi yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır. Hızlı bir şekilde gerçekleşen katılaşma gözenek yapılarında düzensiz bir

yapıya neden olurken yavaş gerçekleşen katılaşma gözeneklerin çökerek şeklen malzemenin bozulmasına neden olmaktadır (Güven, 2011).

Bu yöntemle alüminyum ve alaşımları dışında kalay, pirinç, çinko ve kurşun gibi malzemelerin de köpük üretimi gerçekleştirilmektedir. Toz metalurjisi üretim aşamaları şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Toz metalurjisi yöntemi (Pelit, 2012)

Toz metalurjisinin sağlamış olduğu birçok yarar bulunmaktadır. Üretim maliyeti olarak tasarruf sağlanmaktadır ve karmaşık şekilli birçok parça üretimi gerçekleştirilmektedir. Talaşlı işlem gibi ikincil işlemlere gerek kalmamaktadır ve dolayısıyla malzeme kaybı da daha düşük olmaktadır (Güven, 2011; Pelit, 2012).

3.3. Sandviç Köpük Kompozitlerin Uygulama Alanları

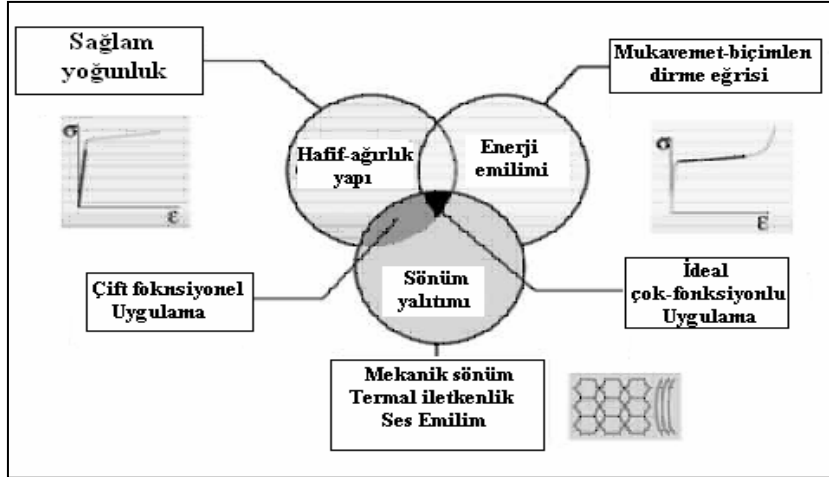
Metalik köpüklerin uygulama alanlarına bakıldığında birçok farklı alanda kullanıldığı görülmüştür. Metalik köpükler özellikle düşük yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle hafiflik istenilen alanlarda kullanılmaktadır. Bunun yanında gözenek yapıları, enerjiyi absorbe edebilme kabiliyetleri sayesinde havacılık, taşıt, otomotiv, inşaat , denizcilik gibi alanlarda kullanılmaktadır (Banhart, 2005).

Otomotiv endüstrisi

Otomobillerde gelişen teknoloji ile birlikte farklı malzeme çeşitleri kullanılmaya başlanmıştır. Ağır malzeme seçimi ile birlikte yoğunluğu artan taşıtlarda hafiflik gibi önemli özelliğin kazandırılması amacıyla farklı malzeme arayışına girilmiştir. Metal köpük tam da bu kısımda devreye girmektedir. İçerisindeki gözenek yapısı nedeniyle taşıtlarda kullanıldığında yoğunluğun düşük olmasına dolayısıyla daha az benzin harcanmasına olanak sağlamıştır. Özellikle alüminyum esaslı metal köpük bu yüzden tercih edilmektedir. (Banhart, 2005).

Başka bir açıdan bakıldığında taşıtlarda enerji emme kapasitesi yani tokluk oldukça önemli bir detaydır. Olası araba kazalarında bir taşıtın tokluğu ne kadar iyiye o kadar az hasar alınacaktır. Yine metal köpükler enerji emme kapasitesi yüksek olduğu için otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Aynı zamanda ses ve ısı yalıtımı olarak da iyi sonuçlar verdiği için metal köpük kullanımı yaygındır. Metal köpük kullanımı ile daha yüksek elastisite modülü elde edinilir ve rijitlik-kütle oranı artırılabilir. Bunun yanı sıra, daha dirençli ve darbeye dayanıklı özellikler sağlanmaktadır. Özellikle sandviç şeklinde üretilen alüminyum köpükler motor kapağı, bagaj kapağı ve açılır tavan gibi burulma deformasyonundan kaçınmak ve titreşimi önlemek için yüksek dayanım gereken uygulamalarda kullanılmaktadır (Katı, 2011; Yıldırım, 2018).

Şekil 3.11 otomotiv endüstrisinde, üç farklı alanda kullanılan sandviç köpükleri özetlemektedir. Burada daireler üç uygulama alanını, dıştaki kutularda o alandan sorumlu köpük özelliklerinin avantajını göstermektedir.



Şekil 3.11. Otomotiv alanındaki uygulamalar (Yavuz, 2010)

Hafif yapılar

Özellikle sandviç yapıda olan köpük malzemeler düşük ağırlık istenen taşıtlar için iyi bir malzeme seçimi olmuştur. Yakıt tüketimini azaltmanın yanı sıra çeliklerden 8 kat dayanıklı ve %25 daha sağlamdır (Pelit, 2012).

Alüminyum sandviç köpük normal metal köpüklere göre çok daha gözenekli ve dayanıklı yapılardır. Şekil 3.12’de bu alüminyum sandviç köpüğün kullanım alanı görülmektedir.

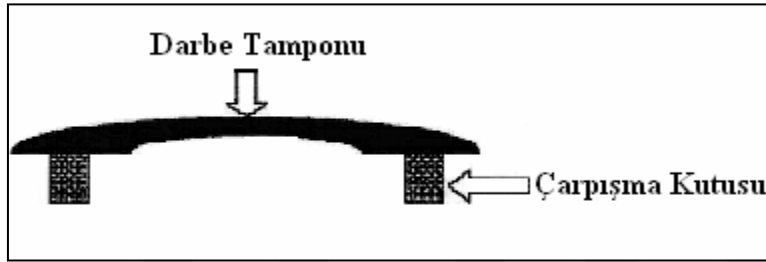


Şekil 3.12. Alüminyum sandviç panelden yapılmış bir kaldırma kolu (Banhart, 2003)

Enerji emilimi

Tokluk, bir malzemenin enerji absorbe edebilme yeteneğidir. Bir araba kazası esnasında alınacak olan hasar tokluk ile doğrudan orantılıdır. Taşıt yapımı için kullanılan

malzemelerin tokluğu ne kadar iyi olursa kaza sırasında ortaya çıkan enerjinin insana geçişi o kadar az olacak; dolayısıyla kişi en az hasar ile kazayı atlatacaktır. İşte bilhassa alüminyum katkılı köpükler enerjiyi emme kabiliyetinde oldukça iyidir. Bu bilgi neticesinde bilim adamları çarpışma kutuları denilen enerjiyi emici köpük üretimi gerçekleştirmiştir (şekil 3.13) Bu çarpışma kutuları darbe tamponuyla ön korkuluk arasında yer almaktadır (Gökmen, 2009).



Şekil 3.13. Çarpışma kutusu kullanımı (Kara, 2012)

Normalde içi boş şekilde üretilen çarpışma kutularından farklı olarak üretilen köpük çarpışma kutularının iç kısmı köpük ile doldurulmuştur. Bu yüzden içi boş olan malzemeye göre daha iyi enerjiyi emmektedirler (Banhart, 2003). Şekil 3.14'te köpük çarpışma kutu örnekleri görülmektedir.

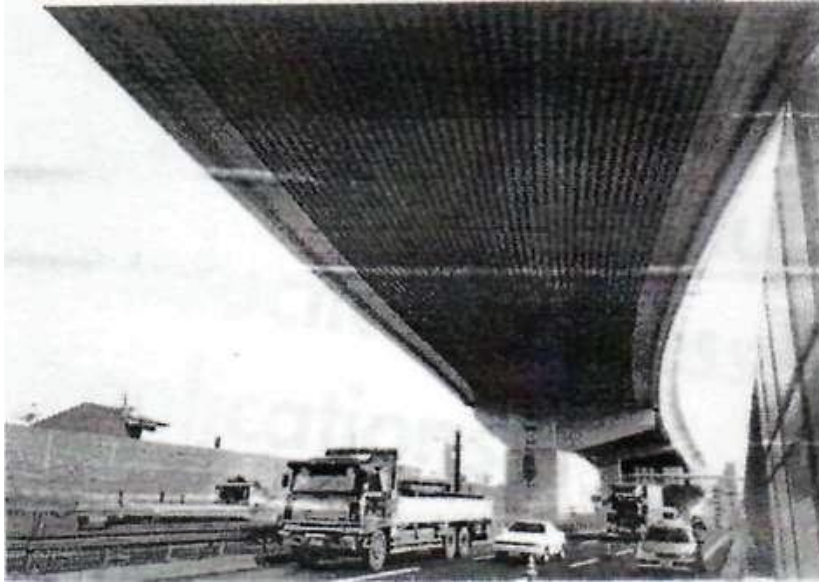


Şekil 3.14. Çarpışma kutuları örnekleri (Kara, 2012)

Araba harici ray sistemlerinde de bu malzemeler enerji emici olarak kullanılmaktadır. tramvay, tren gibi araçlarda yayalara çarpma durumunda altta sürüklenmeyi engellemek için koruma aparatı olmalıdır.

Gürültü izolasyonu

Güvenlik açısından enerji emme ve çarpma önemli bir uygulamadır. Bunun yanı sıra ergonomik açıdan taşıtların ses ve ısı yalıtımı da oldukça önemli kriterlerdir. Köpük sandviç malzemeler yine bu uygulama için önemli bir malzemedir (Miyoshi ve Akiyama, 2000). Örneğin taşıtların geçmiş olduğu viyadüklerde köpük yapılarak kullanılarak ses yalıtımı sağlanmaktadır (şekil 3.15).



Şekil 3.15. Viyadükte kullanılan köpük yapılar (Pelit, 2012)

Havacılık endüstrisi

Havacılık uygulamalarında genellikle kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Ancak maliyetli olduklarından dolayı köpük malzemeler tercih edilebilmektedir. Ama köpük malzemenin havacılıkta asıl tercih edilme sebebi hafifliktir. Bilindiği gibi uçak yapılarında düşük yoğunluk hem güvenlik hem yakıt tasarrufu açısından önemlidir. Bu yüzden bilhassa alüminyum köpük malzemeler bu sektörde kullanılmaktadır. Boeing firması, sandviç formundaki titanyum köpük parçalarını ve alüminyum köpükleri helikopterlerin kuyruk kısmında değerlendirmektedir. Ayrıca uzay teknolojisinde, alüminyum köpükler uzay araçlarının iniş takımlarında çarpma enerjisi soğurma elemanı ve uydularda yük taşıyan yapılara takviye olarak kullanılmaktadır (Banhart, 2001; Güven, 2011; Pelit, 2012).

Gemi endüstrisi

Gemi yapımında hafif ağırlıklı yapılar önem kazanmaktadır. Özellikle alüminyum köpükler, düşük yoğunluğu ve iyi korozyon direnciyle birlikte gemicilik sektörüne önemli avantajlar sunmaktadır. Kaldıraç platformu, yapısal gemi bölmesi, gemi direği platformu ve işaret fişeği dolapları gibi uygulama örnekleri mevcuttur (Banhart, 2000).

Yapı endüstrisi

Alüminyum köpük ve köpük paneller asansörlerin enerji tüketimlerini azaltmak için oldukça yardımcı olmaktadır. Çok hızlı modern asansörlerde düşük yoğunluk oldukça önemlidir. Ayrıca, hafif-ağırlıklı inşa tekniği güvenlik kurallarına uygun olarak uygulanmalıdır. Yangın duvarları ve çıkışları zayıf termal iletkenliği ve yangın direnci olan alüminyum köpük malzemelerle yapılmaktadır. (Pelit, 2012)

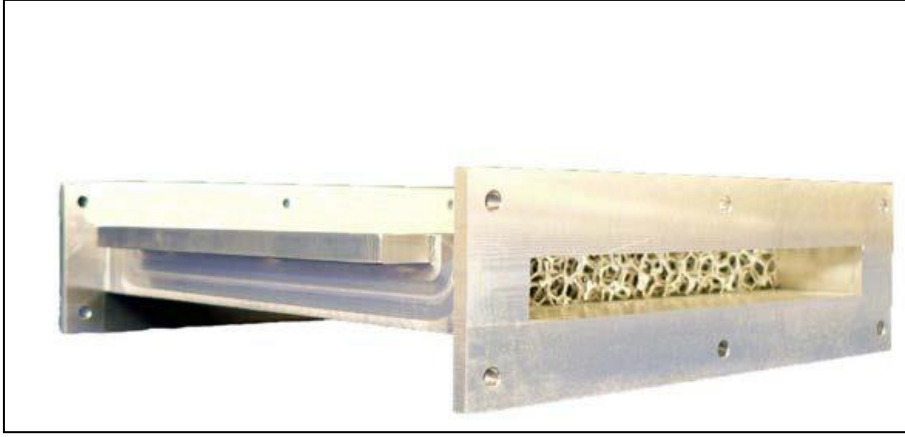
Spor malzemeleri

Spor malzemeleri ayak sağlığı ve güvenliği için önemlidir. Bu yüzden kullanılan malzeme dikkat edilerek üretim yapılmaktadır. Örneğin, futbolcular için kaval kemiği koruyucularda iyi enerji emme kapasitesi olan alüminyum köpüklerden yararlanılmaktadır (Onuklu, 2015).

Fonksiyonel uygulamaları

Isı değiştiriciler

Açık hücreli ve kapalı hücreli olan köpüklerin özelliklerine göre kullanım alanları değişmektedir. Korozyon direnci yüksek, termal iletkenliği iyi olan açık hücreli köpükler ısı değiştirici olarak kullanılmaktadır. Düşük termal iletkenliğinden dolayı kapalı hücreli köpükler ise termal kalkan olarak kullanılmaktadır. Isı değiştiricilerde soğutma ve ısıtma işleminin hızlı bir şekilde gerçekleşmesi beklenir (Ashby ve Evans, 2000; Kara, 2012). Dolayısıyla ısıyı hızlı bir şekilde ileten alüminyum ve bakır köpükler tercih edilmektedir (şekil 3.16, 3.17).



Şekil 3.16. Alüminyum ısı değıştirici (Onuklu, 2015)



Şekil 3.17. Bakır değıştirici (Onuklu, 2015)

Susturucular

Gürültüyü azaltmak için şekil 3.18’de görüldüğü gibi genellikle alüminyumdan yapılan susturucular kullanılmaktadır (Banhart, 2000).



Şekil 3.18. Alüminyum köpükten yapılan susturucu (Kara, 2012)

Su arıtıcılar

Açık hücreli metal köpük yapılar su arıtıcı olarak kullanılmaktadır. Burada su açık hücreli köpüğün içinden akıtılarak suda istenmeyen iyonların ayrışmasını sağlamaktadır (Banhart, 2001).

Filtreleme

Katı parçacıkları gaz veya sıvıdan, veya iki sıvıyı birbirinden ayırmak için, büyük depo hacminden dolayı açık hücreli alüminyum köpük metaller kullanılmaktadır (Pelit, 2012).

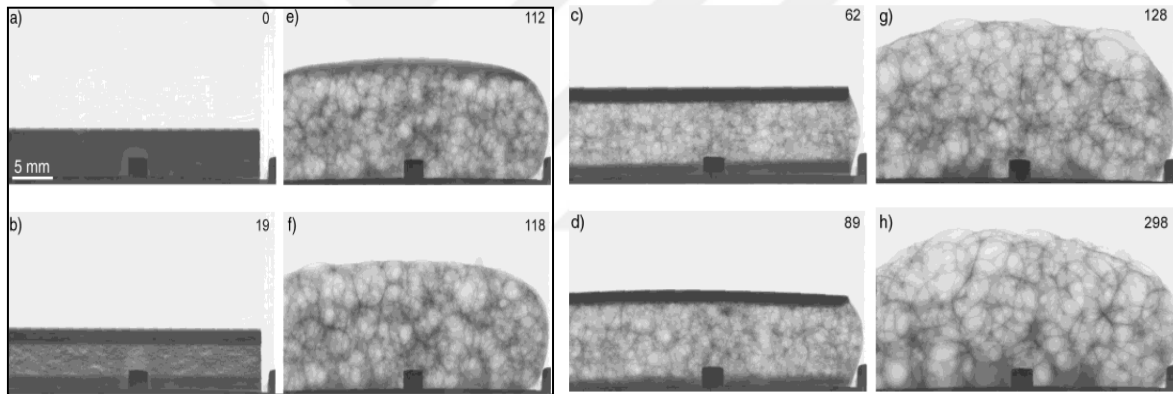
Alev Kesici

Yanıcı gazlarda, alevin ilerleyişini durdurmak için hücre duvar malzemesi yüksek ısı iletkenliğe sahip gözenekli metaller kullanılmaktadır. Açık hücreli metalik köpükler, alev 550m/s hıza kadar bir ilerleyişte bile alev kesici özelliği göstermektedirler (Banhart, 2001).

3.4. Literatür Çalışması

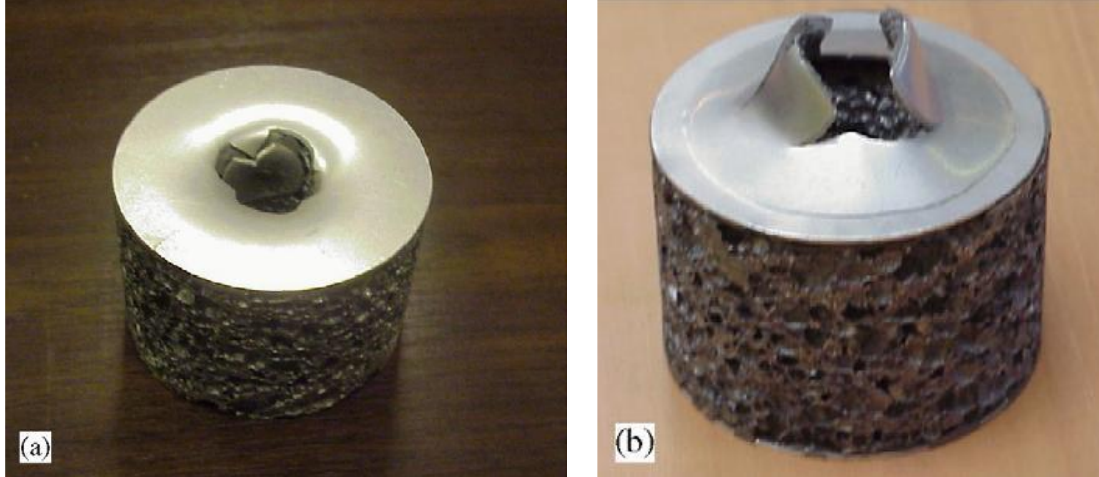
Sandviç köpük kompozit teknolojisi Almanya’da 1994 yılında geliştirilmeye başlanmıştır. Sandviç köpük üretimi için patent çalışmasına bakıldığında bu çalışmayı yapanlar J. Banhart ve J. Baumister’dir ve 1997 yılında bu patenti almışlardır. Daha sonra Slovakya’da Malzeme ve Makine Mekaniği Enstitüsü 1998 yılında, Avusturya şirketi olan MEPURA için alüminyum sandviç köpük üretimini geliştirmiştir (Güler ve Ulay, 2010).

Yapılan birkaç çalışmaya bakıldığında Banhart ve arkadaşları sandviç köpük üretimi için süreyi baz alarak bir çalışma gerçekleştirmiştir ve sonuç olarak köpürtme süresi arttıkça sandviç köpük yapısının gitgide dejenere olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu gözlem sonucu şekil 3.19’da gösterilmiştir.



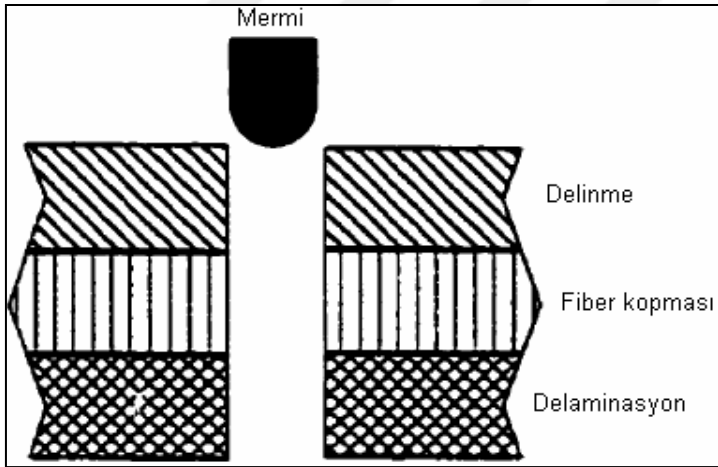
Şekil 3.19. Zamana bağlı olarak sandviç köpük üretiminin radyoskopik görüntüleri (Banhart, 2001)

Bir diğer çalışma Zhao ve çalışma arkadaşları (2007) tarafından sandviç köpükteki dayanım oranını delik mekanizması üzerinden göstererek yapılmıştır. Şekil 3.20’de görüldüğü gibi sandviç köpük yüzeyine belli yükler konularak darbe sağlanmış ve ortaya çıkan delik mekanizması gözlemlenmiştir.



Şekil 3.20. Statik delme (a) üst yüzey (b) alt yüzey (Turan, 2007)

Balistik darbe esnasında sandviç kompozit malzemede genellikle meydana gelen hasarlar delinme, fiber kopması, matris kırılması ve delaminasyondur .Bu hasar türleri birbirleri ile etkileşim halindedir ve en etkili yani en çok hasar vereni delaminasyondur. Şekil 3.21’de bu hasar türlerinin etkileri görülmektedir.



Şekil 3.21. Hasar türleri (Langlie ve Cheng, 1989)

Banhart ve Baumister (1998) adlı iki arkadaş ise yoğunlukları farklı iki kompozit köpük üretmiştir. Köpürme yönünün basma dayanımına olan etkilerini incelemişlerdir. Deney sonucunda basma dayanımının yoğunluk arttıkça arttığını gözlemlemişlerdir.

Fiedler ve Ochsner (2008) hücre tipleri farklı olan sandviç köpüklerin eğme dayanımlarından yola çıkarak malzemede meydana gelen hasar tiplerini incelemiştir.

Sun ve arkadaşları (2016) üç boyutlu kademeli çekirdek yapıda sandviç kompozit üreterek bu malzemelerin eğilme dayanımı ve hasar türlerini incelemişlerdir.

Xu ve arkadaşları (2015) otomatik kesme ve presleme işlemine bağlı olarak üretimini gerçekleştirdikleri kıvrımlı çekirdek sandviç kirişlerin eğilme tutumlarını gözlemlemişlerdir.

J.G Chung ve arkadaşları (2007) kompozit panellerin deformasyon ve tokluğu üzerine araştırma yapmışlardır.

Kesler ve Gibson (2002) köpük ve yüzeyin alüminyumdan oluştuğu sandviç bir kompozit üretmiştir. Boyutları farklı olan kompozitlere eğme testi yapılmıştır. Sonucunda uzunluk, genişlik ve yüksekliğin eğme mukavemetine karşı etkili olduğu görülmüştür.



4. MALZEME VE METOT

4.1. Malzeme

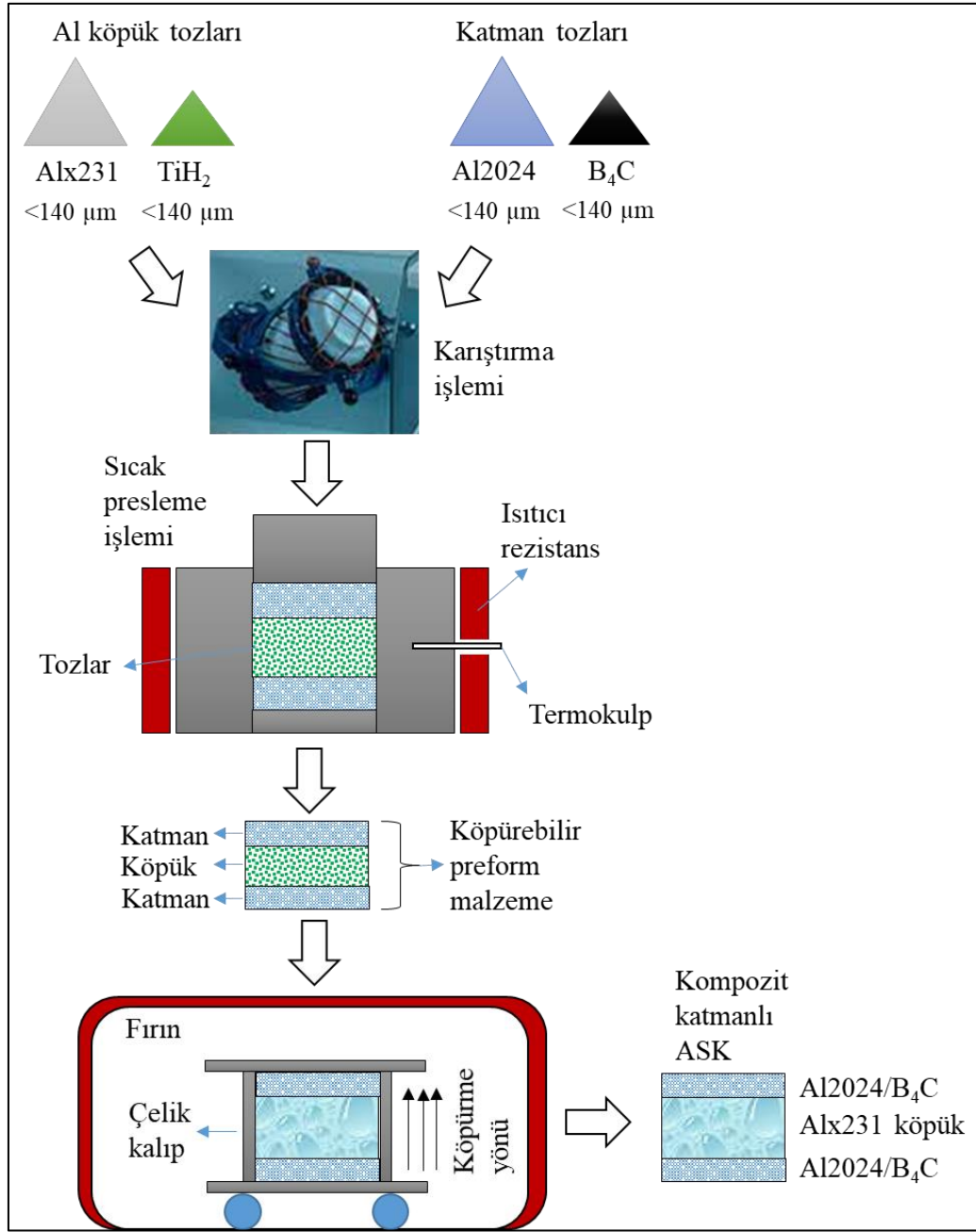
Bu çalışmada metalik köpük üretiminde kullanılan tozların genel özellikleri ve toz boyutları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneyde kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Toz Boyutu (µm)
Alx231	2,68	660	<160
TiH ₂	3,91	450	<45
Al2024	2,78	638	<150
B ₄ C	2,50	2350	<20

4.2. Metot

Alx231 esaslı metalik köpük çekirdekli, yüzeyi Al2024/B₄C kompozit katmanlı ASK malzemeler sıcak presleme yöntemi ile üretildi.. Çalışmanın akış şeması şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Üretim akış şeması

B₄C parçacık katmanlı ASK malzemelerin üretiminde ön alaşımlı Alumix 231 (Al-Cu %2,5-Mg %0,5-Si %14) tozu Ecka Granules firmasından, %98 saflıktaki TiH₂ tozları Aldrich firmasından, ön alaşımlı Al2024 tozları ve B₄C tozları ise Beijing Xing Rong Yuan Technology firmasından temin edildi.

4.3. Tozların Karıştırılması

Sıcak presleme yöntemi ile yüzeyi Al₂O₃/B₄C katmanlı Al₂O₃ çekirdek köpüklü ASK malzemeler olmak üzere birbirinden farklı 5 adet malzeme üretilmiştir. Numunelerden biri sadece Al₂O₃ metalik köpük malzeme olarak üretildi. Diğer numuneler Çizelge 4.2’de verilen oranlarda kompozit ve katmanlı olarak üretilmiştir. Kompozit katmanlara ağırlıkça %0, 5, 10 ve 20 oranında B₄C ilave edilmiştir. Üretilen numuneler ve karışım oranları Çizelge 4. 2’de verilmiştir.

Belirlenen toz miktarları 0,1 mg hassasiyetle Sartorius marka hassas terazide tartıldı. Kabaca harmanlanan tozlar Şekil 4.2’ de resmi görülen Turbula marka üç boyutlu karıştırıcıda 45 dakika boyunca karıştırılmıştır.

Çizelge 4.2. Numune numarası,malzemeler ve karışım oranları

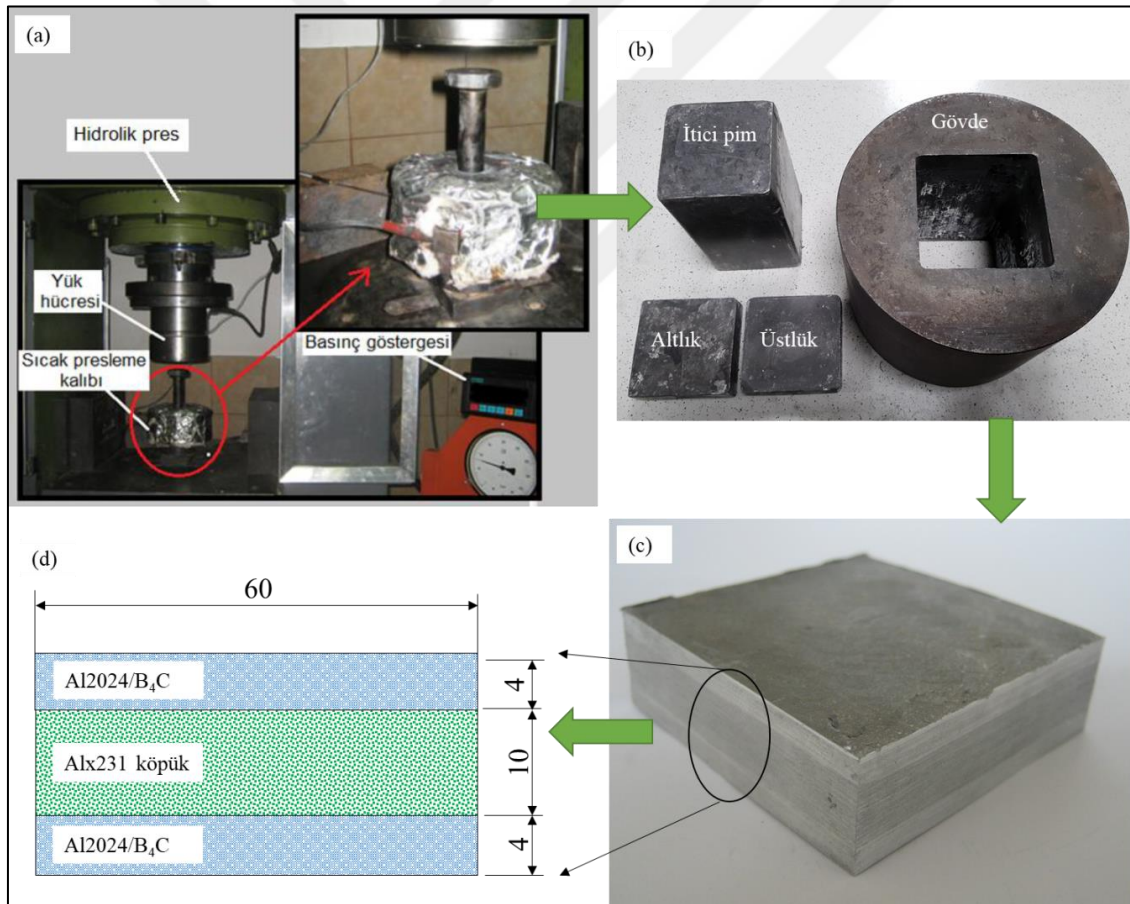
Numune no	Malzemeler	Ağırlıkça % oran			
		Orta köpük		Yüzey katmanları	
		Al ₂ O ₃	TiH ₂	Al ₂ O ₃	B ₄ C
S1	Al ₂ O ₃ köpük	99	1	--	--
S2	2024 katman/ Al ₂ O ₃ köpük	99	1	100	0
S3	2024%5B ₄ C katman/ Al ₂ O ₃ köpük	99	1	95	5
S4	2024%10B ₄ C katman/ Al ₂ O ₃ köpük	99	1	90	10
S5	2024%20B ₄ C katman/ Al ₂ O ₃ köpük	99	1	80	20



Şekil 4.2. Toz karıştırma işlemi

4.3.1. Sıcak presleme

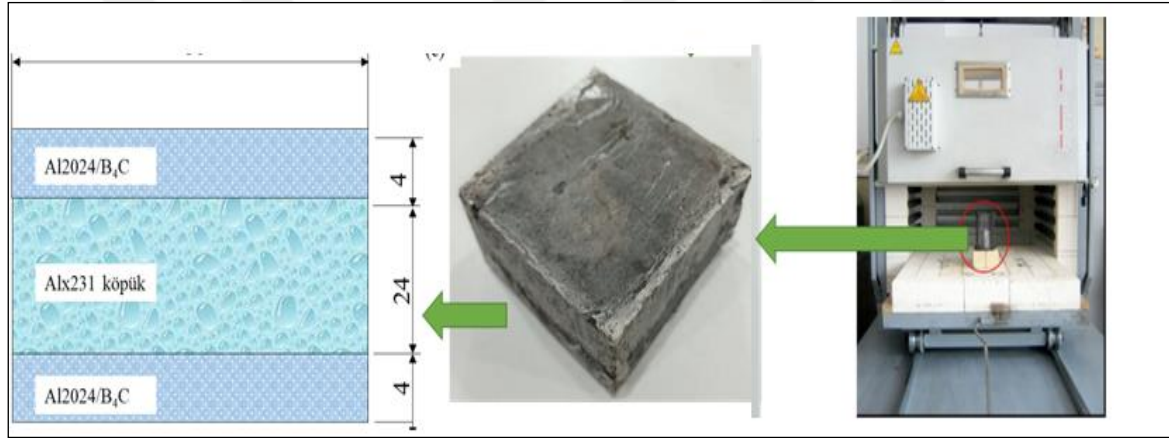
Karışım tozlar 260 ton basma kapasitesine sahip hidrolik prese yerleştirilen özel olarak tasarlanmış ısıtılı sıcak presleme ünitesinde preslenmiştir. Presleme işleminde 2344 serisi sıcak iş takım çeliğinden yapılan sıcak presleme kalıbı kullanılmıştır (Şekil 4.3a). 60x60 mm² kesit alanına sahip olan presleme kalıbına (Şekil 4.3b) tozlar katman sırasına göre doldurulduktan sonra önce 25 MPa basınç altında soğuk olarak preslenmiştir. Soğuk olarak preslenen numuneler kalıpla birlikte dakikada 10 °C/min ısıtma hızında 550 °C'a kadar ısıtıldı. Bu sıcaklıkta 30 dakika boyunca bekletilen tozlar 200 MPa basınç altında sıcak olarak preslenmiştir. Presleme sonrası kalıp oda sıcaklığına soğutulmuş ve köpürebilir preform bloklar (Şekil 4.3c) kalıp içerisinden çıkarılmıştır.



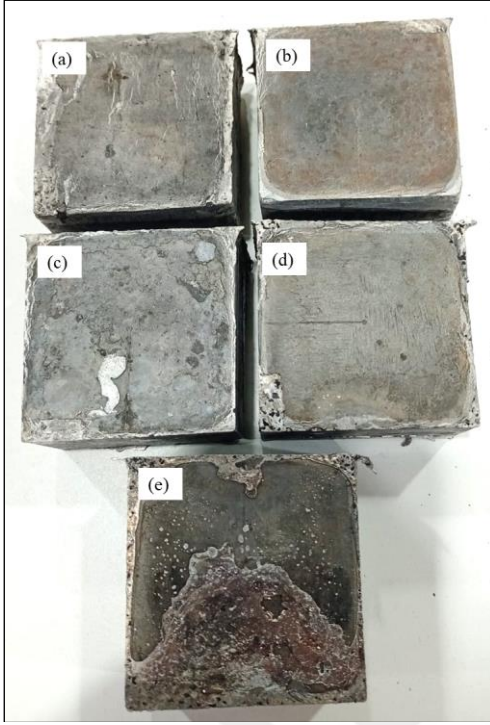
Şekil 4.3. Sıcak presleme ünitesi; (a) hidrolik pres ve sıcak presleme ünitesi (b) sıcak presleme kalıbı (c) sıcak preslenmiş köpürebilir preform malzeme (d) köpürebilir preform blok malzemenin presleme sonrası ölçüleri.

4.3.2. Köpürtme işlemi

60x60x18 mm boyutlarına sahip köpürebilir preform malzemeler çelik sacdan yapılmış kalıp içerisine yerleştirildikten sonra Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölüm laboratuvarlarında bulunan 1000 °C kapasiteli Protherm marka fırın (Şekil 4.4) içerisinde köpürtme işlemine tabi tutuldu. 750 °C ön ısıtılmış fırın içerisine yerleştirilen köpürtme kalıbı içerisindeki köpük malzeme yine aynı sıcaklıkta 10 dakika süre boyunca köpürtme işlemine tabi tutuldu ve fırın içerisinden çıkarılarak fan yardımı ile oda sıcaklığına soğutulmuştur. Köpürtme sonrası elde edilen B₄C katmanlı ASK malzemeler Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Fırın içerisinde köpürme işlemi



Şekil 4.5. 60x60x32 mm ölçülerine sahip köpürtülmüş numuneler (a) Alx231 metalik köpük (b) Al2024 tabakalı ASK (c) Al2024%5B₄C tabakalı ASK (d) Al2024%10B₄C tabakalı ASK (e) Al2024%20B₄C tabakalı ASK

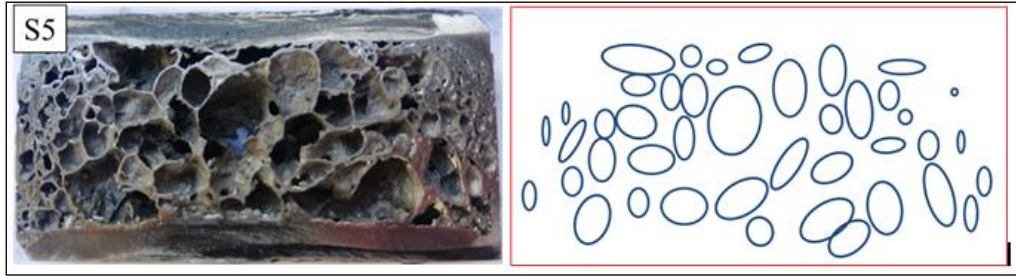
4.4. Karakterizasyon Testleri

4.4.1. Yoğunluk ölçümü hesaplanması

Köpürtme öncesi köpürebilir preform malzemeden ve köpürtme sonrası köpürtülen malzemeden hassas terazi ile yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin yoğunlukları havada ve su içerisinde tartılarak Arşimet prensibine göre belirlenmiştir.

4.4.2. Gözenek boyutları ve küresellik faktörünün hesaplanması

Köpürtülen numuneler kesit şeklinde elde edilerek resim 4. 6'daki gibi bir görüntü elde edilmiştir. Bu numunelere yapılan hesaplamalar ile gözenek boyutu ve küresellik faktörü hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar eşitlik 4. 7 ve 4. 8'te verilen hesaplamalara göre yapılmıştır. Bu eşitlikte L_1 ve L_2 sırasıyla gözenek boyutunun enine ve boyuna uzunluğunu göstermektedir.



Resim 4.1. Al2024%20B4C ASK malzemenin gözenek yapısı

$$\text{Küresellik faktörü} = 1 - (L_1/L_2) \quad (4.7)$$

$$\text{Gözenek boyutu} = (L_1 + L_2) / 2 \quad (4.8)$$

4.4.3. Mikroyapı analizleri

Mikroyapı analizleri için üretilen kompozitlerden Şekil 4.6’da verilen hassas kesici ile numuneler kesilmiştir.



Şekil 4.6. Hassas kesici

Kesilen numuneler sıcak bakalite alma işlemine tabi tutulmuştur. Bakalite alınan numuneler önce 120 ve 320 mesh zımparalar ile otomatik olarak zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Ardından 9 ve 6 μm elmas pasta ile parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatılan numuneler çizelge 4.3’te içeriği verilen Keller dağlayıcısı ile dağlanmıştır.

Çizelge 4.3. Keller dağılayıcısı içeriği

Keller dağılayıcısı kompozisyonu	
Kompozisyonun adı	Miktar
HNO ₃ (Nitrik asit)	5 ml
HCl(Hidroklorik asit)	3 ml
HF(Hidroflorik asit)	2 ml
Saf su	190 ml

Numuneler Teknoloji fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde bulunan optik mikroskop (Şekil 4.7) ile mikro yapı analizlerine ve haritalama işlemlerine tabii tutulmuştur.



Şekil 4.7. Optik mikroskop

4.4.4. Basma deneyleri

Sandviç köpük malzemelerin basma deneyleri Gazi üniversitesi Teknoloji fakültesi metalurji ve malzeme mühendisliği bölüm laboratuvarında bulunan 10 ton kapasiteli Intron marka basma/çekme cihazı ile yapılmıştır (şekil 4.8). Basma deneyi için ASTM C 363-03 standardına göre numuneler hazırlandı ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 4.8. Basma deneyi yapılan cihaz çeneleri

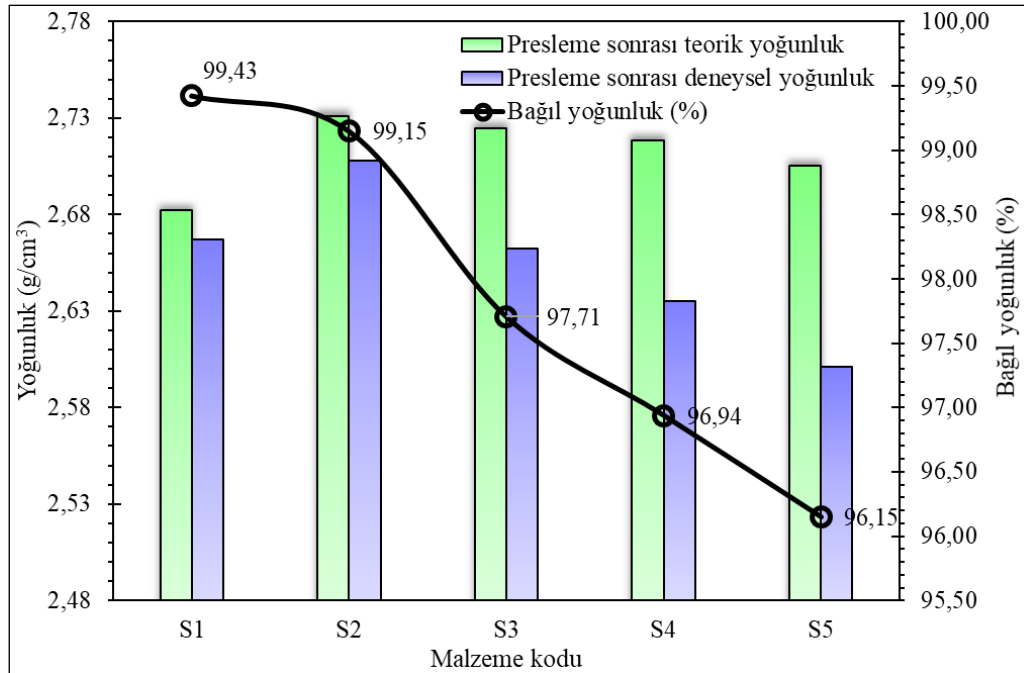


5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Malzemelerdeki Yoğunluk Değişimi

Elde edilen gözenekli ASK malzemelerin teorik yoğunlukları, sıcak presleme sonrası deneysel yoğunlukları ve bağıl yoğunluk değerleri Şekil 5.1’ de verilmiştir.

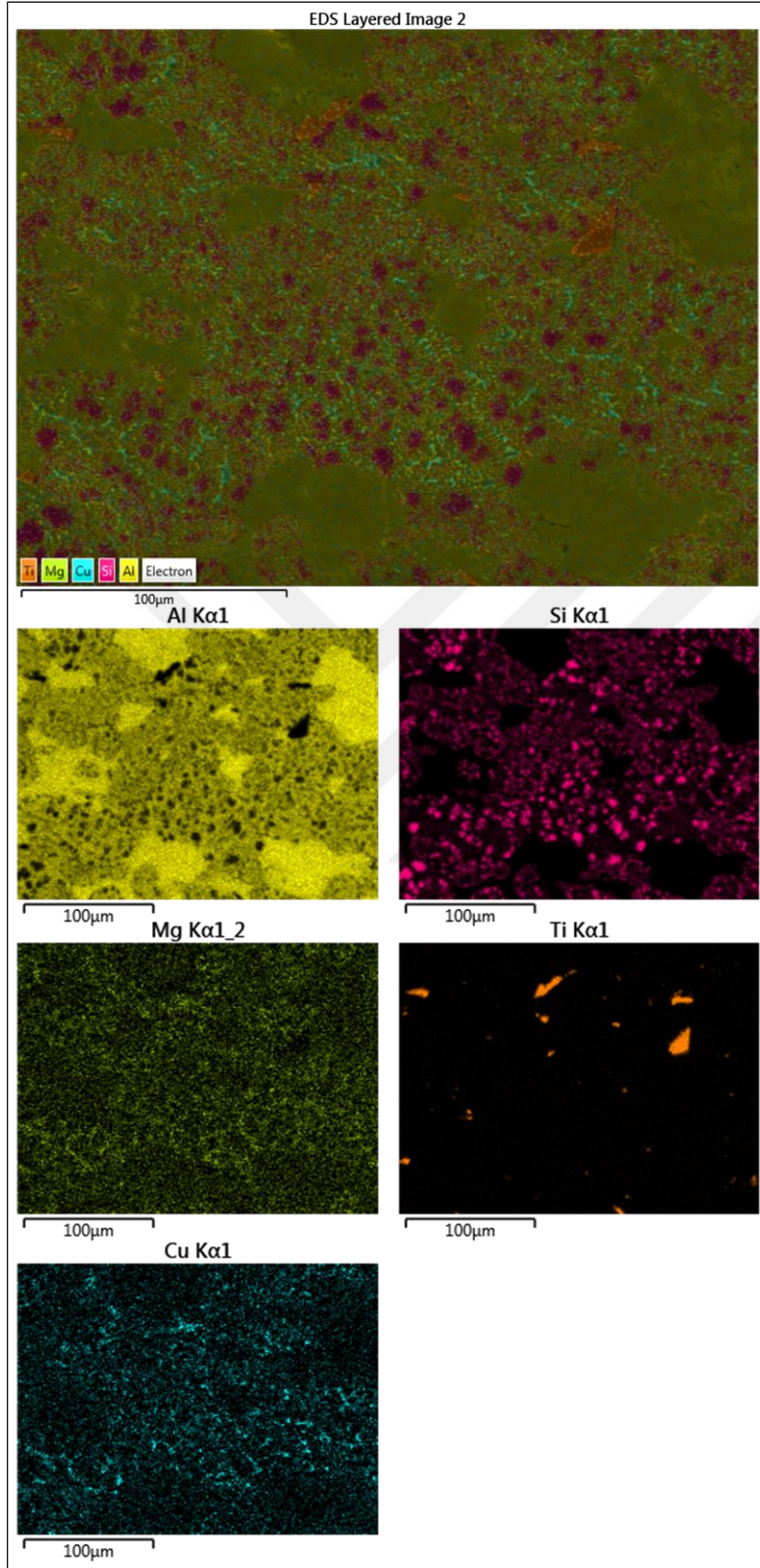
Köpürebilir preform malzemelerin sıcak preslenme sonrası bağıl deneysel yoğunlukları incelendiğinde en yüksek yoğunluk değeri Alx231 alaşımında (%99,43) meydana gelirken en düşük bağıl yoğunluk ise Al2024%20 B₄C katmanlı kompozit malzemede meydana gelmiştir. A2024 alaşımı ve Al2024/B₄C kompozit katmanlı ASK malzemelerin bağıl yoğunlukları kendi içlerinde mukayese edildiğinde en yüksek bağıl yoğunluk %99,15 ile Al2024 alaşımında olurken B₄C miktarının artmasına bağlı olarak bağıl yoğunlukların düştüğü görülmüştür. B₄C parçacık ilaveli kompozit malzemelerde B₄C miktarına bağlı olarak sıkıştırılabilirliğin azaldığı, topaklanmaların meydana geldiği bilinmektedir (Çinici, 2012). Bu sebeplerden dolayı Al matrisli kompozit malzemelerde B₄C miktarına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde düşüş yaşanmıştır.



Şekil 5.1. Katmanlı ASK malzemelerin köpürtme öncesi yoğunluk değişimleri

5.2. Malzemelerdeki Mikroyapı Değişimi

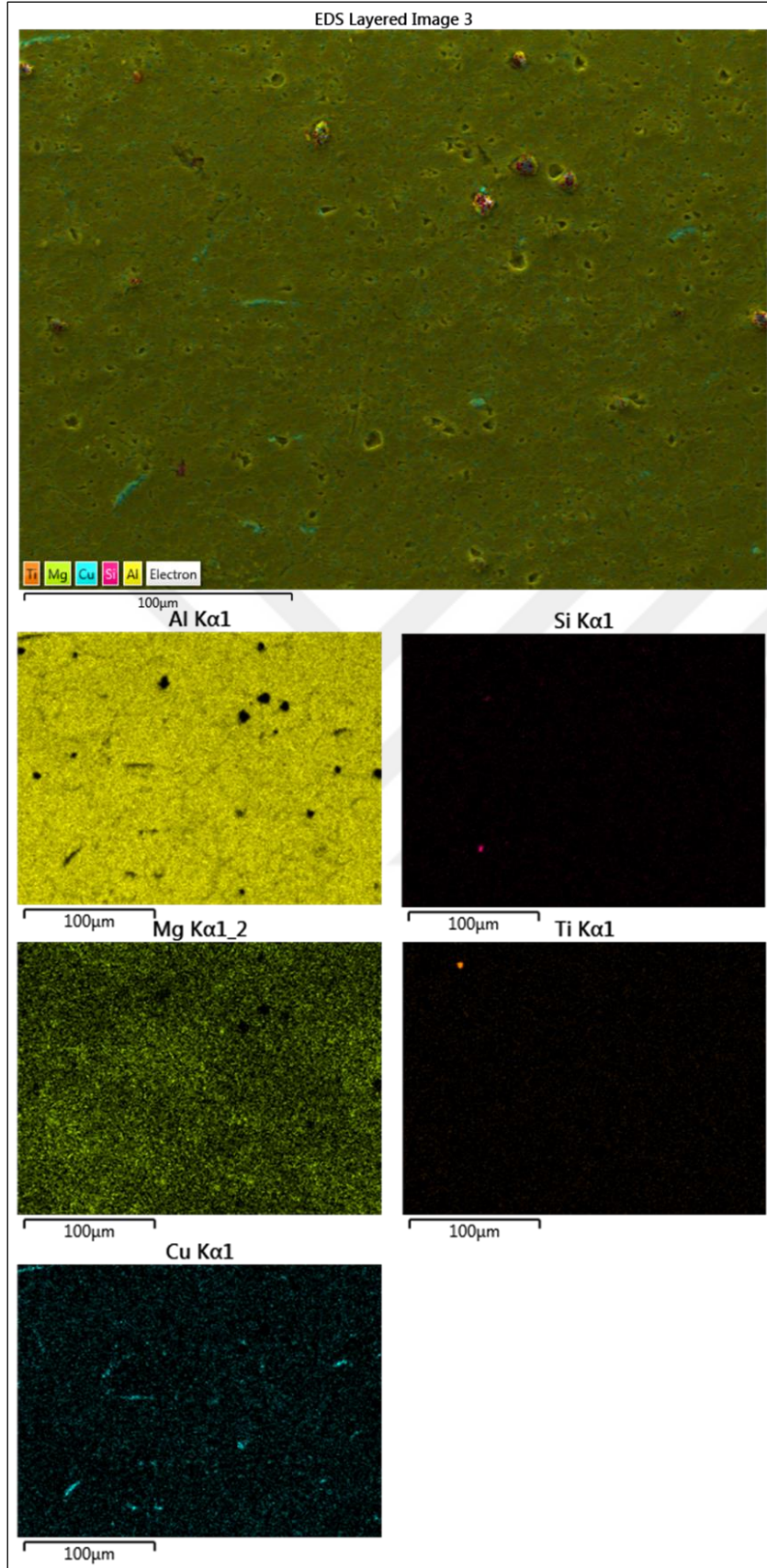
Resim 5.1’te sıcak presleme sonrası Alx231 köpürebilir preform malzemenin SEM element haritalama görüntüleri verilmiştir. Görüntüde her bir elemente ait olan renk dağılım değişkenleri verilmiştir. Buna göre Si-Mg ve Cu elementlerinin yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilediği görülmektedir. Yapı içerisindeki ötektit silisyum sarı renkli Al alaşım elementi içinde de görülmektedir. Literatürde alüminyum içerisine katılan TiH_2 parçacıklarının Al alaşımı tarafından çevrenmesi ve aynı zamanda gözeneklerin minimize edilmesi gerekmektedir (Kısasöz, 2018). Paulin ve ark., yapmış oldukları çalışmada alüminyum alaşımını ikincil işlemlerden geçirerek yoğunluklarını artırmaya çalışmışlardır. Bu çalışmada ise presleme basıncı ve sıcaklığı mümkün olduğu kadar yüksek tutularak tozların yoğunlaştırılması sağlanmıştır. Resime bakıldığında ağırlıkça %1 oranında katılan TiH_2 parçacıklarının turuncu renk ile gösterilen Ti alaşım elementi varlığından anlaşılmaktadır. Mikroyapıda gözeneklerin neredeyse yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Bu durum yoğunluk grafiğinde de ortaya konulmuştur (Kısasöz, 2018).



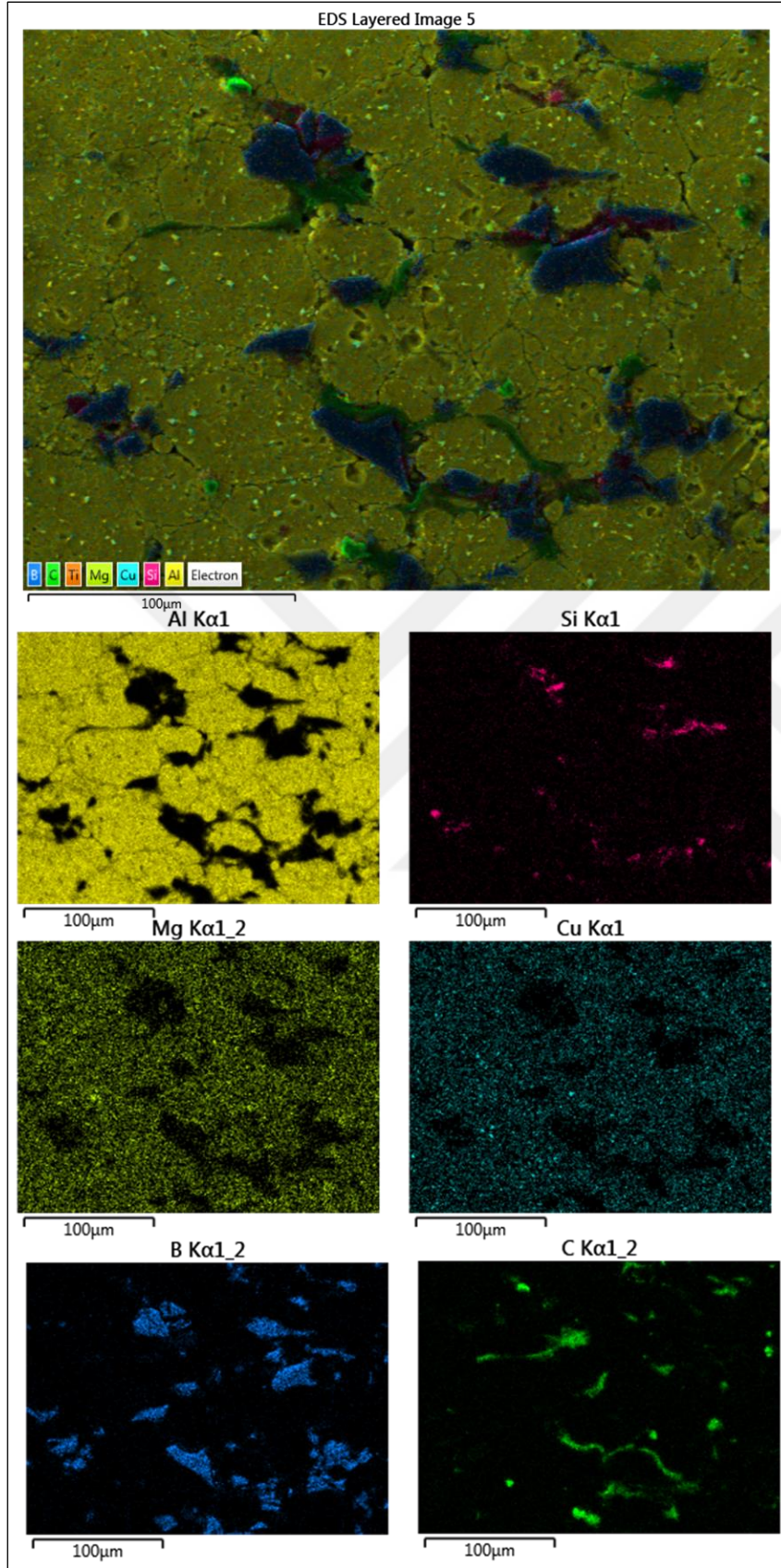
Resim 5.1. Köpürebilir Alx231 metalik köpük malzemesinin sıcak presleme sonrası SEM haritalama görüntüsü

Resim 5.2’ de Al2024 alaşım katmanlı ASK malzemenin sıcak presleme sonrası SEM-haritalama görüntüsü verilmiştir. Görüntüde sadece Al2024 alaşım tarafından elementel görüntüleme alınmıştır. Resim incelendiğinde mikro gözeneklerin oluştuğu görülmektedir. Al2024 içinde ana alaşım elementi olarak Cu kullanılmaktadır. Renk haritasına bakıldığında Cu elementinin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı g r lm ştir. Resim 5.3’de ise Al2024%20 B₄C katman malzemesin SEM-haritalama görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde mavi renkli paracıkların B₄C parçacıklar olduğu tespit edilmiştir. Bu durum yeşil renkli olan C elementinin varlığı ile de desteklenmektedir.





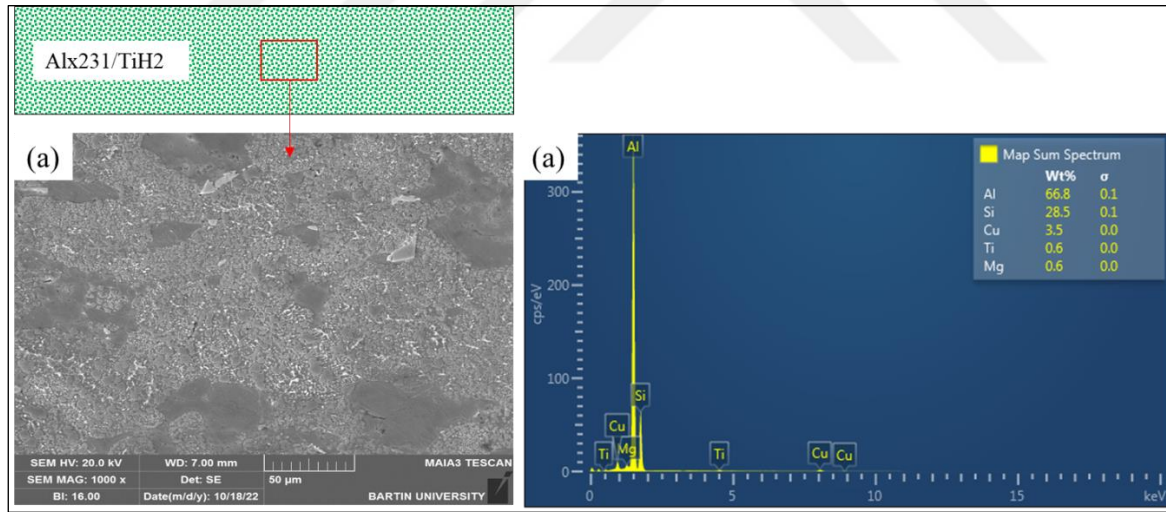
Resim 5.2. Al2024 alaşım tabakasının sıcak presleme sonrası SEM haritalama görüntüsü



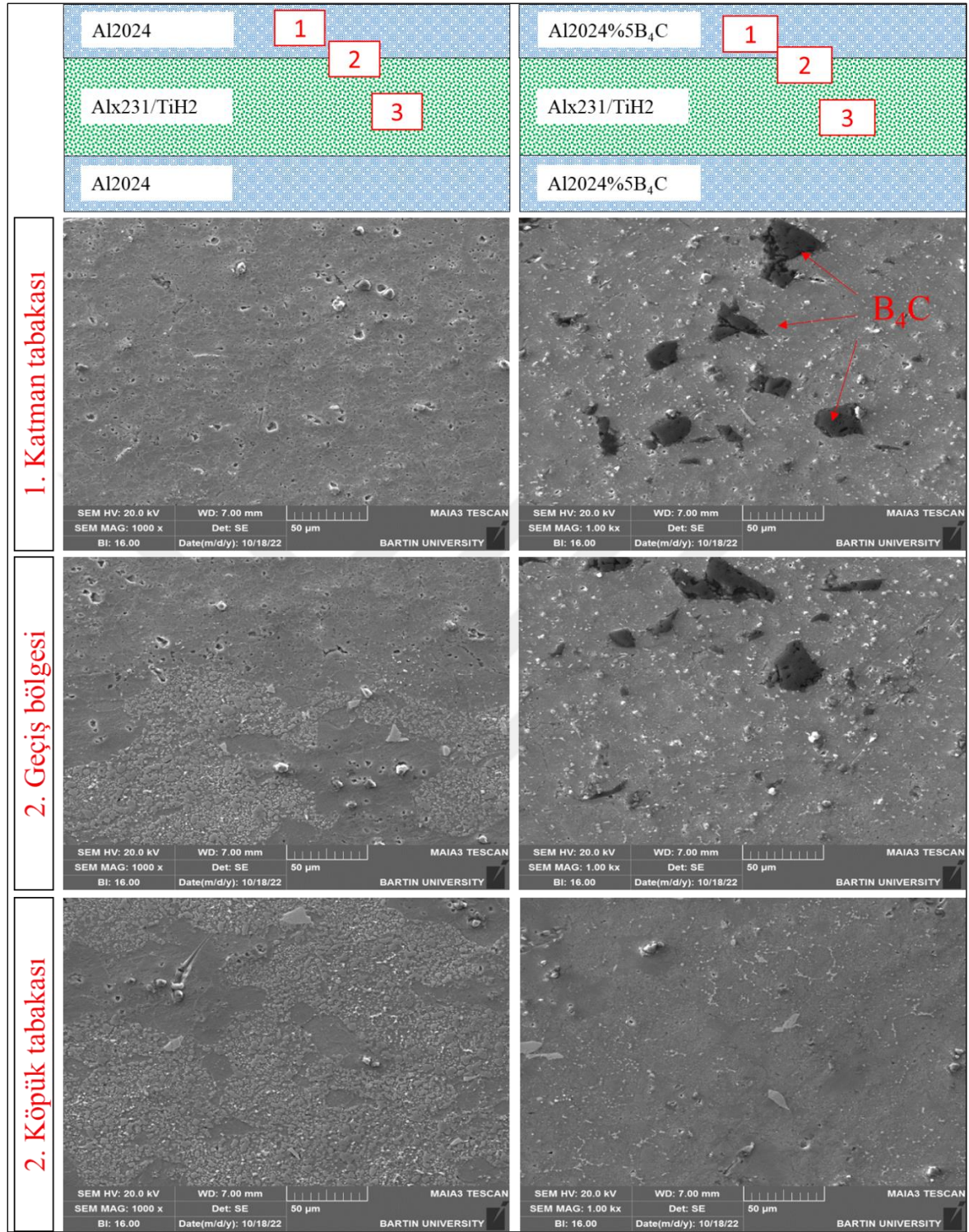
Resim 5.3. Al₂O₃/20 B₄C kompozit tabakasının sıcak presleme sonrası SEM haritalama görüntüsü.

Resim 5.4’de Alx 231 malzemesinin SEM resmi ve EDS analiz sonucu verilmiştir. Resimlere bakıldığında gözeneklerin meydana gelmediği görülmektedir. Resim 5.5’de Al2024 alaşım katmanlı ve Al2024%5B₄C katmanlı ASK malzemelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Resimlere bakıldığında B₄C içermeyen numunelerde TiH₂ ve Si parçacıklarının çevresinde gözeneklere rastlanmaktadır. Resim 5.6’da Al2024%10B₄C ve Al2024%20 B₄C katmanlı ASK numunelere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Resimlere bakıldığında B₄C içermeyen numunelerin yapısında bulunan TiH₂ ve Si parçacıklarının çevresinde preslenmiş numunelerde olduğu kadar gözeneğe rastlanmamaktadır (Resim 5.6). Özellikle Si parçacıklarının matris ile ara yüzey uyumunun yeterli düzeyde olduğu söylenebilir.

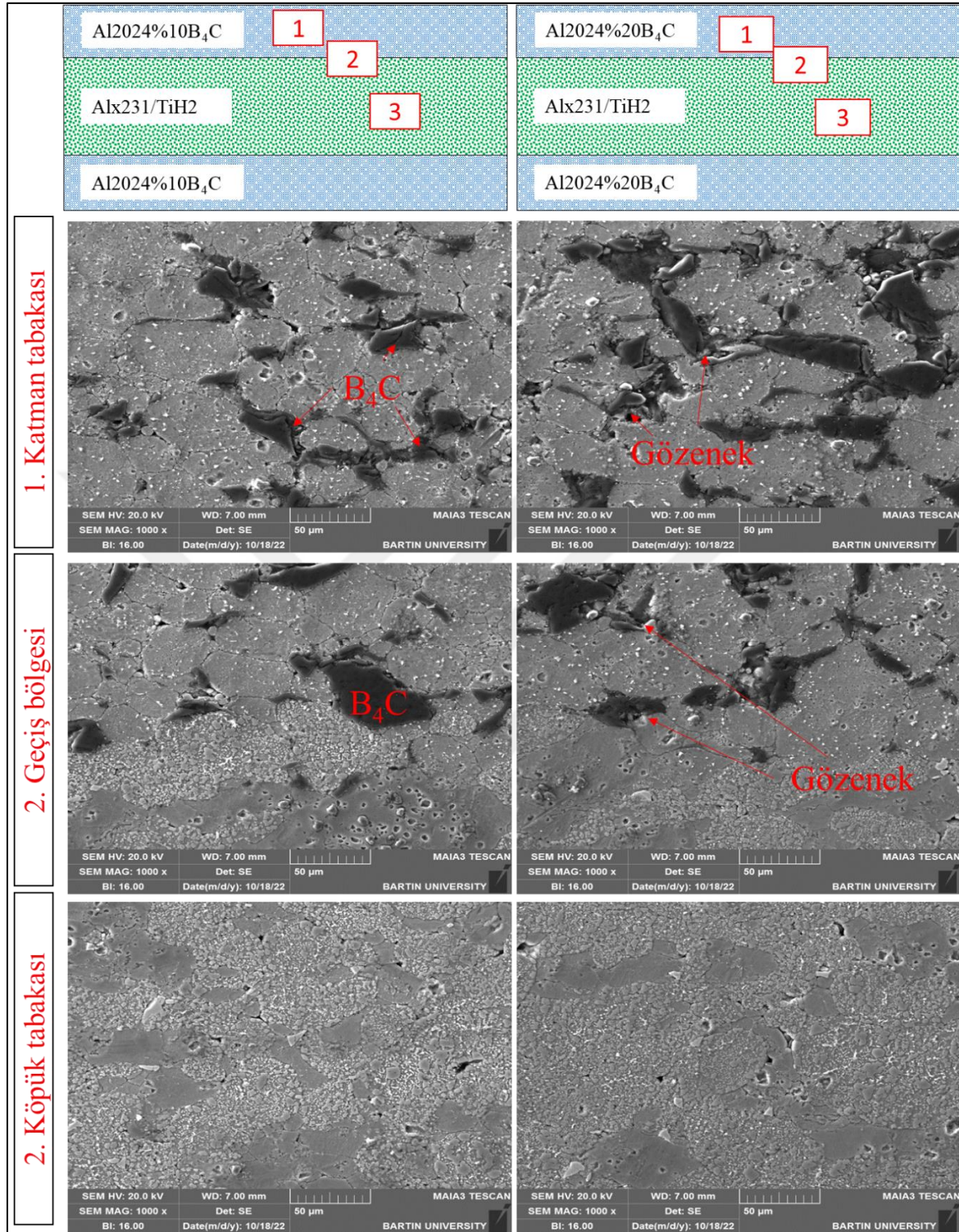
Alx231 katmansız, Al2024 katmanlı ve Al2024/B₄C katmanlı kompozit malzemelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ağırlıkça B₄C oranının artması ile birlikte B₄C parçacıklarında topaklanma görülmektedir. Aynı zamanda Al alaşımı ile B₄C parçacıkları arasındaki ıslatılabilirliğin yetersiz olmasından dolayı Al alaşımı ile B₄C parçacıkları arasında uyumsuzlukların olduğu görülmektedir.



Resim 5.4. Alx231 metalik köpük malzemesinin (a) SEM resmi, (b) genel EDS pikleri



Resim 5.5. Al2024 katmanlı Alx231 metalik köpük malzemesinin (a) SEM resmi



Resim 5.6. Al₂₀₂₄%20B₄C katmanlı Al_x231 metalik köpük malzemesinin (a) SEM resmi

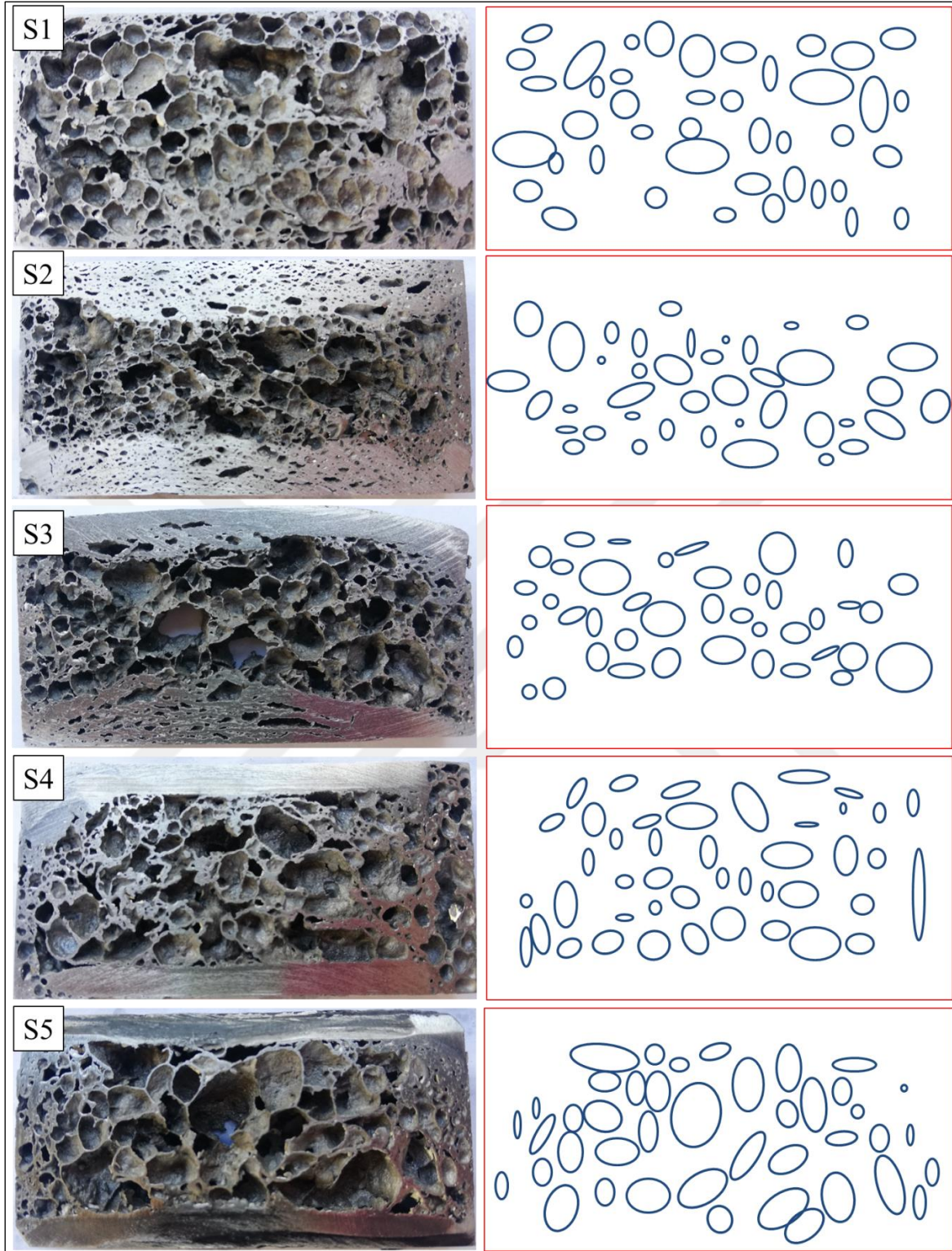
5.3. Köpüklerin Gözenek Yapısı ve Dağılımı

Resim 5.7' de sabit sıcaklıkta (750 °C) köpürtülmüş malzemelerin kesitlerinden alınan gözenek yapıları gösterilmektedir. Resimlere bakıldığında, en homojen ve küresele yakın

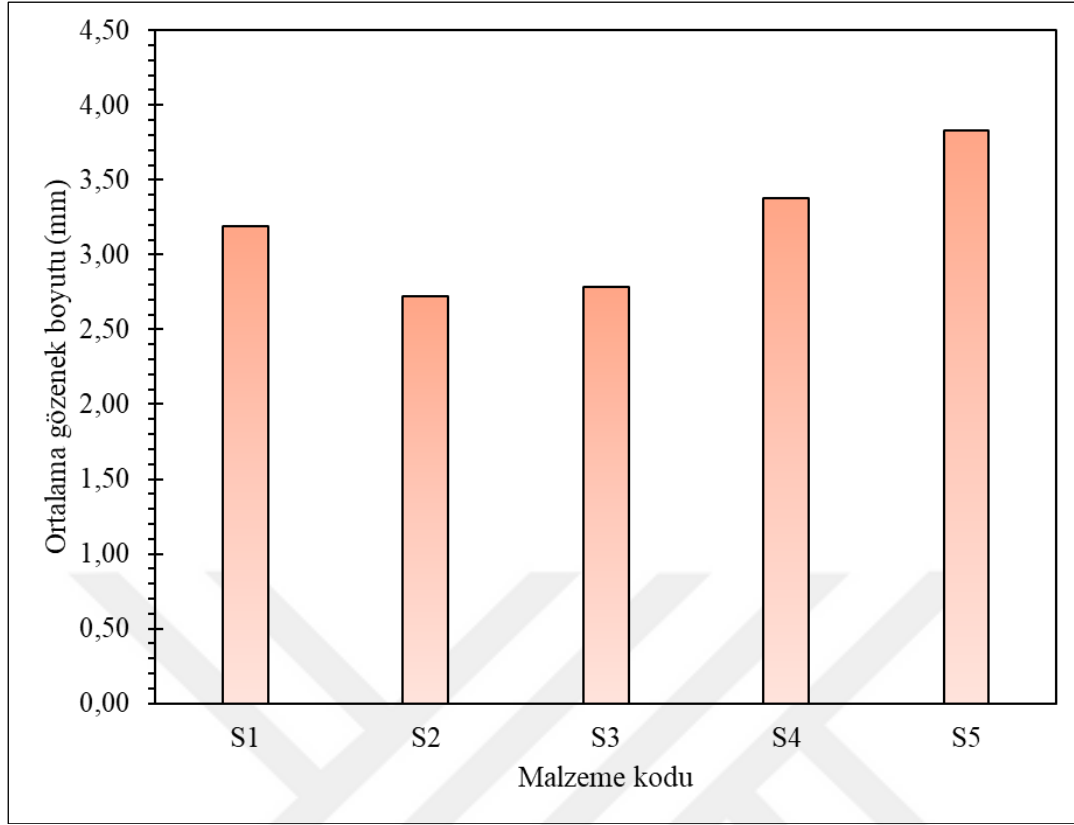
olan gözeneklerin Alx231 malzemesinde olduğu görülmektedir (Resim 5.7-S1). Diğerlerinde ise köpük malzemelerin küreselliğinin bozulduğu ve gözeneklerin büyüdüğü görülmektedir. Eşitlik 4. 7'ye göre küresellik faktörü 1'e yaklaştıkça artmaktadır. Buna göre Alx 231 metalik köpüğün küresellik faktörü 0,80 olarak hesaplandı ve küreselliğe en yakın malzeme olduğu görüldü. Al%20B₄C ASK malzemenin ise küresellik faktörü 0,44 hesaplanarak en az küreselliğe sahip malzeme olarak görüldü. Al2024 katmanlı ASK malzemelerde çekirdekte meydana gelen köpürmenin katman tarafına da yansıdığı görülmektedir. Bu durumun sıcaklığın etkisi ile içerideki çözünen H₂ gazının dışarıya çıkmak istemesi ile oluştuğu düşünülmektedir. Katmanın içinde gaz kabarcıklarının oluşma durumu Al2024%5 B₄C katmanında da kısmen olduğu görülürken ağırlıkça %10 ve %20 oranında B₄C içerenlerde oluşmadığı görülmüştür. Bu durumun ağırlıkça B₄C oranının artması ile birlikte gözeneklerin ve kılcal boşlukların artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İçeride oluşan H₂ gazı bu boşluklardan dışarıya çıkarak katman tabakasının içerisindeki kabarcıkların oluşumunu etkilemektedir.

Köpük malzemelerin gözenek morfolojileri incelendiğinde ağırlıkça B₄C oranının artması ile birlikte gözeneklerin boyutunun arttığı görülmüştür. Eşitlik 4. 8 'e göre gözeneklerin L₁ ve L₂ enine ve boyuna boyutları baz alınarak gözenek boyutları hesaplandı. Bunun sonucunda en yüksek gözenek boyutu Al2024%20B₄C katmanlı ASK malzemedede 3.77 mm hesaplanırken en düşük gözenek boyutu ise 2.69 mm olarak Al2024 katmanlı ASK numunede hesaplandı.

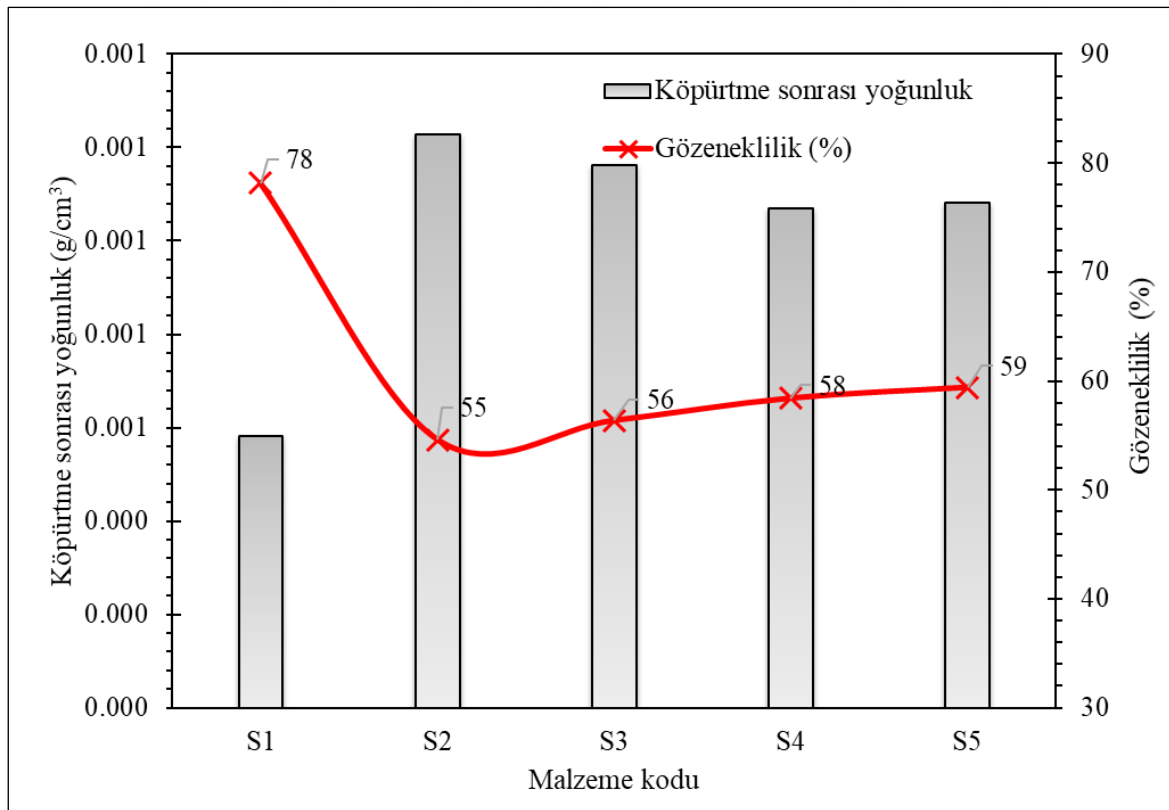
Katmansız ve katmanlı ASK malzemelerin köpürtme sonrası yoğunlukları incelendiğinde en düşük yoğunluğun Alx231 köpük malzemesinde 0.583 g/cm³ olduğu görülürken en yüksek yoğunluğun ise Al2024 katmanlı ASK malzemesinde 1.229 g/cm³ olduğu görülmüştür. Katmanlı ASK malzemelerde ağırlıkça B₄C oranının artması ile birlikte yoğunluk miktarında düşüş yaşandığı ve Al2024%10B₄C ile Al2024%20B₄C deki yoğunlukların birbirine yaklaştığı görülmüştür.



Resim 5.7. Köpürtme sonrası gözeneklerin makro resimleri

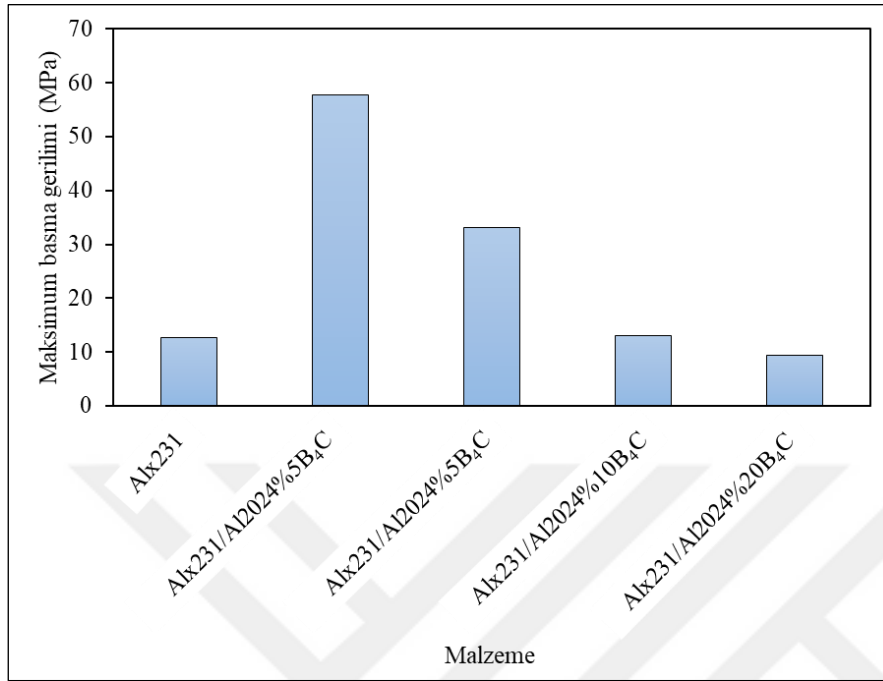


Şekil 5.2. Köpük malzemelerin gözenek boyutları değişim grafiği

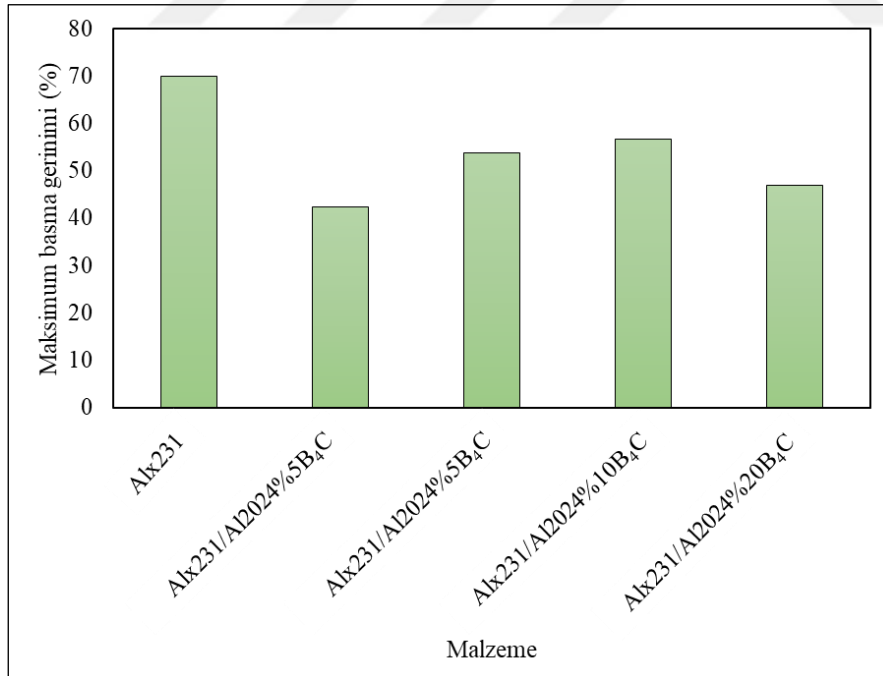


Şekil 5.3. Köpük malzemelerin yoğunluk değişimleri ve gözeneklilik oranları

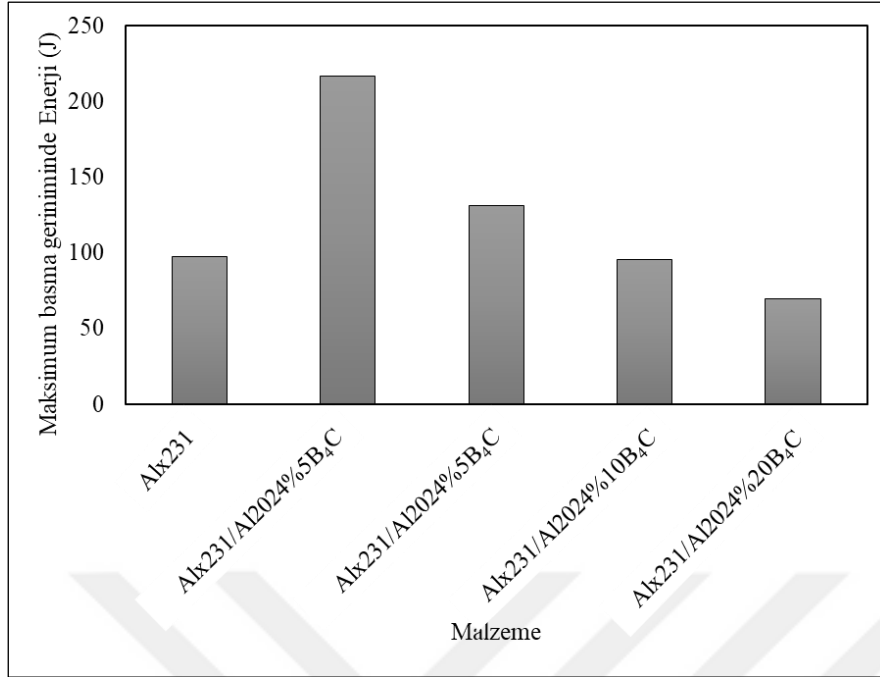
5.5. Malzemelerin Basma Deneyi ve sonuçları



Şekil 5.4. Metalik köpük malzemelerin maksimum basma gerilimi



Şekil 5.5. Metalik köpük malzemelerin maksimum basma gerinimi



Şekil 5.6. Metalik köpük malzemelerin maksimum basma gerinimindeki enerji miktarı

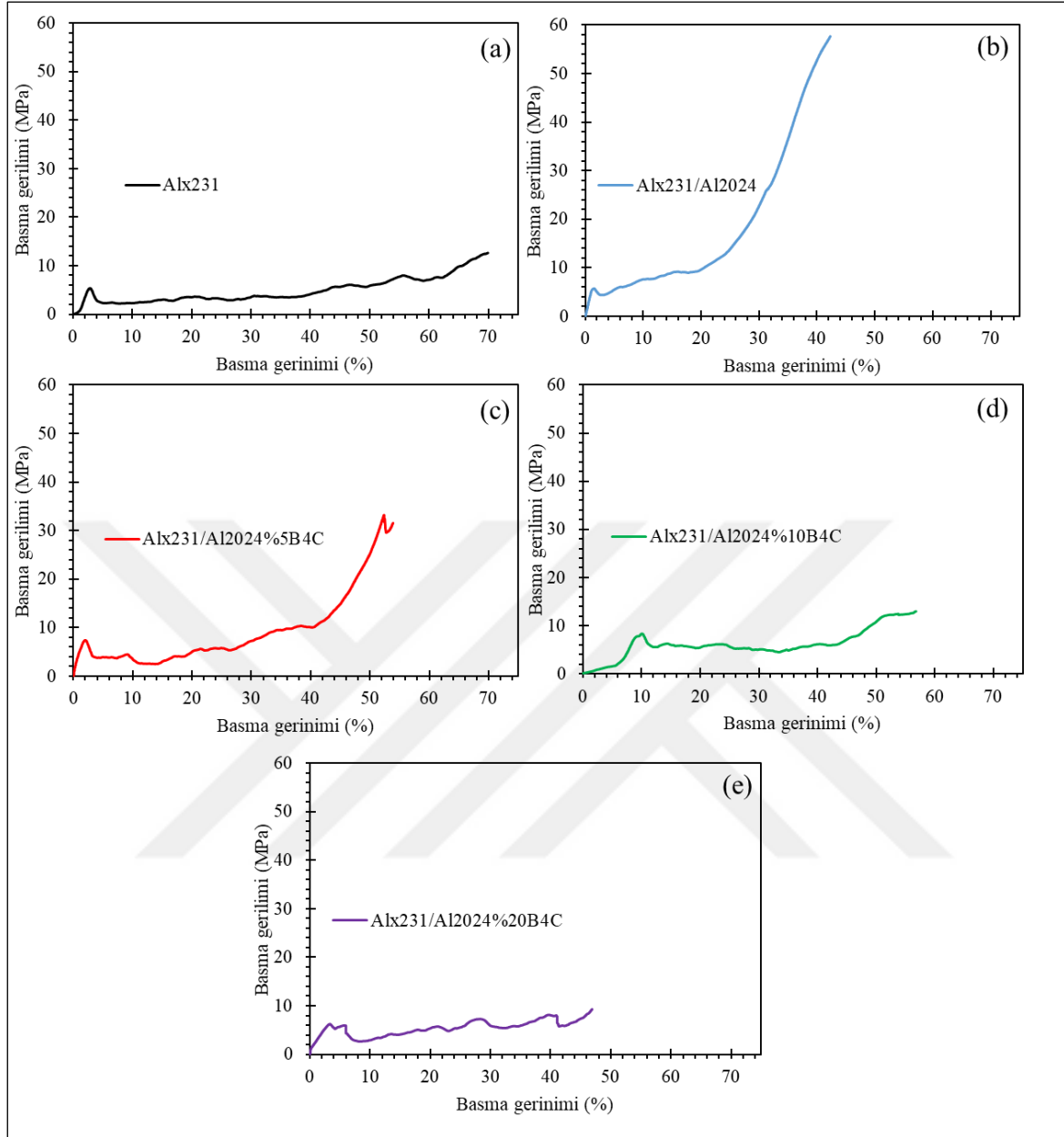
Yapılan basma deneyi sonucu elde edilen gerilim-gerinim değerleri şekil 5.5 ve şekil 5.6'daki gibidir. Grafiklere bakıldığında Alx231 malzemesi için maksimum gerilim 12 MPa ölçülürken maksimum gerinim %69.92 olarak ölçüldü.

Katmanlı fakat takviyesiz Al2024 malzemesinin basma eğrisi grafiğine bakıldığında Al2024 malzemesi için maksimum gerilim 57.67 MPa ölçülürken maksimum gerinim %42.29 olarak ölçüldü.

Al 2024 alaşımlı %5 B₄C takviyeli iki farklı malzemenin basma eğri grafiğine bakıldığında ilk malzemede maksimum gerilim 33.15 MPa iken maksimum gerinim %53.86 olarak hesaplandı. İkinci malzemede ise maksimum gerilim 11.14 olarak ölçülürken maksimum gerinim %51.42 olarak hesaplandı.

Al 2024 alaşımlı %10B₄C katkılı kompozit malzemenin basma eğrisi grafiğine göre maksimum gerilim 12.97 MPa maksimum gerinim ise %56.75 olarak ölçüldü.

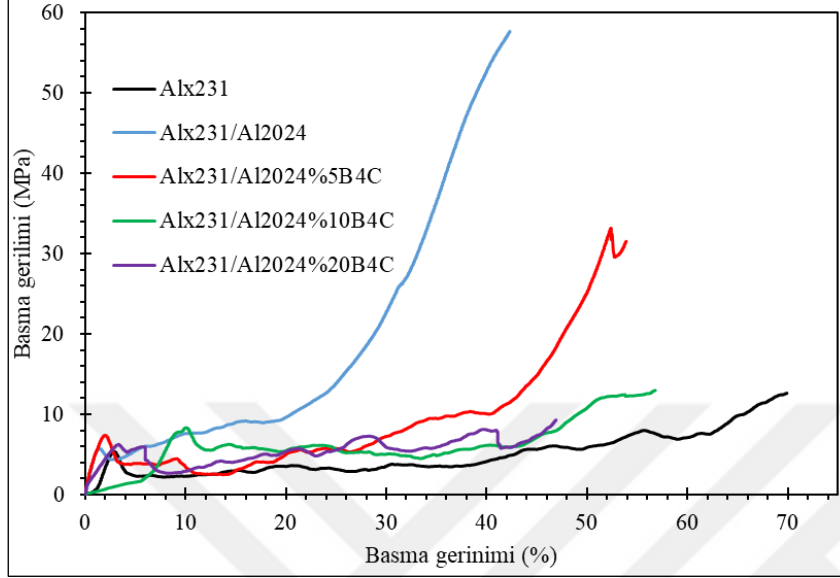
Al2024 alaşımlı %20B₄C katkılı kompozit malzemenin basma eğrisi grafiğine göre maksimum gerilim 9.30 MPa olarak hesaplanırken maksimum gerinim %46.91 olarak ölçüldü.



Şekil 5.7. (a) Alx231 malzemenin, (b) Alx231/Al2024 (c) Al2024%5B₄C (d) Al2024%10B₄C (e) Al2024%20B₄C malzemenin basma testi eğrileri

Şekil 5.7 basma test eğrilerine göre Alx231’de %5 deformasyonda 5 MPa yük altında çökme başladığı görülür. Katmanlı fakat takviyesiz Al2024 malzemesi için %2 deformasyonda 5 MPa yük altında çökme başladığı görülür. Al 2024 alaşımli %5 B₄C takviyeli iki farklı malzemede ilk malzeme için %5 deformasyonda 6 MPa yük altında çökme başladığı görülür. İkinci malzemede ise %7 deformasyonda 5MPa yük altında çökme başladığı görülür. Al 2024 alaşımli %10B₄C katkıli kompozit malzemede ise %10 deformasyonda 8MPa yük altında çökme başladığı görülür. 9.30 MPa olarak hesaplanırken

maksimum gerinim %46.91 olarak ölçüldü. Son olarak Al2024 alaşımlı %20B₄C katkılı malzemede %8 deformasyonda 7MPa yük altında çökme başladığı görülür.



Şekil 5.8. Metalik köpük malzemelerin basma test eğrileri

Basma eğrisi grafiklerine göre (şekil 5.8) basma mukavemeti en fazla olan malzeme Al2024 en az olan malzeme ise Alx231 olarak görülmüştür. Al2024%10B₄C ve Al2024%20B₄C malzemelerinin basma mukavemetlerinin birbirlerinden çok da farkı olmadığı gözlemlenmiştir. B₄C miktarı arttıkça teorik yoğunluk azaldığı için basma deneyi sırasında numunelerin üzerine etki eden kuvvet azalmıştır. Dolayısıyla basma dayanımları artmıştır. Sonuç olarak yoğunluğu en fazla (1.229g/cm³) ve gözenek oranı en az (%58) olan Al2024 alaışımının basma mukavemeti en yüksek iken yoğunluğu en az (0.583g/cm³) ve gözenek oranı en fazla (%78) olan Alx231 malzemesinin basma mukavemeti en düşük çıkmıştır.



Şekil 5.9. Metalik köpük numunelerin basma test deneyleri



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Alumix231 esaslı metalik köpük, Al2024 alaşım katmanlı ASK ve ağırlıkça farklı oranlarda B₄C içeren Al2024/B₄C katmanlı ASK malzemeler sıcak presleme tekniği ile başarılı bir şekilde üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Köpürebilir preform malzemelerin sıcak preslenme sonrası bağıl deneysel yoğunlukları incelendiğinde en yüksek yoğunluk değeri sadece Alx231 alaşımında (%99,43) meydana gelirken en düşük olarak ise Al2024%20 B₄C katmanlı kompozit ASK malzemesinde meydana gelmiştir.
- Al2024 alaşımı ve Al2024/B₄C kompozit katmanlı ASK malzemelerin bağıl yoğunlukları kendi içlerinde mukayese edildiğinde en yüksek bağıl yoğunluk %99,15 ile Al2024 alaşımında olurken B₄C miktarının artmasına bağlı olarak bağıl yoğunlukların düştüğü görülmüştür.
- B₄C parçacık ilaveli kompozit malzemelerde B₄C miktarına bağlı olarak sıkıştırılabilirliğin azaldığı, topaklanmaların meydana geldiği bilinmektedir.
- B₄C içermeyen numunelerde TiH₂ ve Si parçacıklarının çevresinde gözeneklere rastlanmaktadır.
- Al2024%10B₄C ve Al2024%20 B₄C katmanlı ASK numunelere ait SEM görüntüleri verilmiştir.
- B₄C içermeyen numunelerin yapısında bulunan TiH₂ ve Si parçacıklarının çevresinde preslenmiş numunelerde olduğu kadar gözeneğe rastlanmamaktadır.
- Alx231 katmansız, Al2024 katmanlı ve Al2024/B₄C katmanlı kompozit malzemelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ağırlıkça B₄C oranının artması ile birlikte B₄C parçacıklarında topaklanma görülmektedir
- En homojen ve küresele yakın olan gözeneklerin Alx231 malzemesinde olduğu görülmektedir. Diğerlerinde ise köpük malzemelerin küreselliğinin bozulduğu ve gözeneklerin büyüdüğü görülmektedir. Al2024 katmanlı ASK malzemelerde çekirdekte meydana gelen köpürmenin katman tarafına da yansıdığı görülmektedir.
- Köpük malzemelerin gözenek morfolojileri incelendiğinde ağırlıkça B₄C oranının artması ile birlikte gözeneklerin boyutunun arttığı görülmüştür. En yüksek gözenek boyutu Al2024%20B₄C katmanlı ASK malzemedede 3.77 mm olurken en düşük gözenek boyutu ise 2.69 mm olarak Al2024 katmanlı ASK malzemesinde oluşmuştur.

- Alx 231 metalik köpüğün küresellik faktörü 0,80 olarak hesaplanmıştır ve küreselliğe en yakın malzeme olduğu görülmüştür. Al%20B₄C ASK malzemenin ise küresellik faktörü 0,44 hesaplanarak en az küreselliğe sahip malzeme olarak görülmüştür.
- Katmasız ve katmanlı ASK malzemelerin köpürtme sonrası yoğunlukları incelendiğinde en düşük yoğunluğun Alx231 köpük malzemesinde 0.583 g/cm³ olduğu görülürken en yüksek yoğunluğun ise Al2024 katmanlı ASK malzemesinde 1.229 g/cm³ olduğu görülmüştür. Katmanlı ASK malzemelerde ağırlıkça B₄C oranının artması ile birlikte yoğunluk miktarında düşüş yaşandığı ve Al2024%10B₄C ile Al2024%20B₄C deki yoğunlukların birbirine yaklaştığı görülmüştür.
- Katmanlı ve katmansız ASK malzemelerin basma deneyi sonuçlarına bakıldığında Al2024 katmanlı ASK malzemenin basma mukavemetini en fazla olduğu görülmüştür. Alx231 köpük malzemesinin ise en az basma mukavemetine sahip malzeme olduğu görülmüştür. Al2024%10B₄C ile Al2024%20B₄C malzemelerinin basma mukavemetlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca B₄C miktarı arttıkça teorik yoğunluk azaldığı için basma deneyi sırasında numunelerin üzerine etki eden kuvvet azalmıştır. Dolayısıyla basma dayanımları artmıştır.

KAYNAKLAR

- Ashby, M., and Evans, A. (2000). *Metal foams: A design guide*. Butterworth-Heinemann: Elsevier, 150-193.
- Ashby, M. F. and Gibson, N. (2000). *Making metal foams*. Amsterdam: Elsevier, 6-11.
- Banhart, J. (2000). Manufacturing routes for metallic foams. *JOM*, 52, 22-27.
- Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metallic foams. *Progress in Material Science*, 46(6), 559-632.
- Banhart, J. (2003). Aluminium foams for lighter vehicles. *International Journal of Vehicle Design*, 37(2-3), 1-19.
- Banhart, J. (2005). Aluminium foams for lighter vehicles. *International Journal of Vehicle Design*, 37(2-3), 114-125.
- Banhart, J. and Seeliger, H. (2008). Aluminium foam sandwich panels: Manufacture, metallurgy and applications. *Advanced Engineering Materials*, 10(9), 793-802.
- Başer, T. (2012). Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53(635), 51-58.
- Çinici, H. (2012). *Toz metalurjisi yöntemi ile al esaslı parçacık takviyeli sandviç metalik köpük üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Deqing, W., and Ziyuan, S. (2003). Effect of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminum foam. *Materials Science and Engineering: A*, 361(1-2), 45-49.
- Gawdzinska, K. and Gucma, M. (2015). Two criteria analysis of casting technologies of metal and composite foams. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60, 305-308.
- Gökmen, U. (2009). *Toz metalurjisi yöntemi ile al esaslı parçacık takviyeli metalik köpük üretimi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Güler, C., ve Ulay, G. (2009). Petekli kompozit levhalar. *Mobilya Dekorasyon Dergisi*, 90, 78-92.
- Güler, C., ve Ulay, G. (2010). Köpüklü kompozit (sandviç) levhaların bazı teknolojik özellikleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 2, 88-96.
- Güven, Ş. Y. (2011). Toz metalurjisi ve metalik köpükler. *Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), 22-28.
- İnternet: Zor, M. (2018). Kompozit malzemelerle ilgili genel bilgiler. URL: http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel_bilgiler.pdf, Son Erişim tarihi: 22.02.2023.

- Kara, E. (2012). *Çeşitli elyaf dizilimleri ile oluşturulmuş metal köpük çekirdekli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
- Katı, N. S. (2011). *Metal Köpükler*. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 317-320.
- Kırsasöz, A. A. (2018). *Alüminyum matrisli titanyumdiborür in situ takviyeli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Langlie, S. and Cheng, W. (1989). *Numerical Simulation of High Velocity Impact on Fibre-Reinforced Composites*. ASME Pressure Vessels and Piping Conference, USA, 51-64.
- Miyoshi, T., and Akiyama, S. (2000). ALPORAS aluminium foam: Production process, properties and applications. *Advanced Engineering Materials*, 2(4), 179-183.
- Onuklu, E. (2015). *Seramik katkı alüminyum esaslı köpük kompozit üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Özer, G. (2005). *Alüminyum esaslı köpük metal üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pelit, Y. (2012). *Mekanik alaşımlama yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretilebilirliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Surappa, M. (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana*, 28, 319-334.
- Toptan, F., Kumdalı, F., ve Kerti, I. (2006). Al-B₄C kompozitlerinin fren diski olarak kullanılabilirliğine genel bir bakış. *Metallurji*, 145, 11-18.
- Turan, M. (2007). Tabakalı kompozit malzemelerde yüksek hızlı darbe hasarı. *Mühendis ve Makina*, 48(575), 3-8.
- Yavuz, İ. (2010). Metalik köpük malzemeler ve uygulama alanları. *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(1), 49-58.
- Yıldırım, Ç. V. (2018). Metalik köpük malzemelerin üretim yöntemleri, uygulama alanları ve malzeme özellikleri. *İleri Teknoloji Bilimler Dergisi*, 7(2), 100-116.



Gazili olmak ayrıcalıktır...