



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL KÖPÜK MALZEMELERİN ÜRETİM SONRASI
KESME VE BİRLEŞTİRME İŞLEMLERİNİN DENEYSEL
VERİLERDEN YARARLANARAK MODELLENMESİ

Tayfun SİĞİRTMAÇ

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL KÖPÜK MALZEMELERİN ÜRETİM SONRASI
KESME VE BİRLEŞTİRME İŞLEMLERİNİN DENEYSEL
VERİLERDEN YARARLANARAK MODELLENMESİ

Tayfun SİĞİRTMAÇ

Prof. Dr. Agah UĞUZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL KÖPÜK MALZEMELERİN ÜRETİM SONRASI
KESME VE BİRLEŞTİRME İŞLEMLERİNİN
DENEYSEL VERİLERDEN YARARLANARAK
MODELLENMESİ

Tayfun SİĞİRTMAÇ

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez/....../2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Agah UĞUZ

Danışman

.....

ÖZET

Bu çalışmada, alüminyum köpük malzemelerin ikincil işlemleri incelenmiştir. Köpük metallerin üretim teknolojileri araştırılmış, birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Kapalı hücre ve sandviç yapılı numuneler CO₂ lazer kesme teknolojisi, tel erezyonla kesim (EDM) yöntemi ve mekanik dairesel döner testere ile kesilmiş, işlenebilirliği incelenmiştir. Sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmış ve taramalı elektron mikroskopundan (SEM) elde edilen görüntüler yardımı ile kesme yüzeyleri ve yapısal değişim incelenmiştir. Köpük malzemeler sahip oldukları gözenekli yapı nedeniyle cıvata bağlantısında bazı kısıtlar ve mukavemet problemleri oluşturmaktadır. Sandviç yapılı alüminyum köpük malzeme numuneleri farklı bir metot (metal dolgulu epoksi ilavesi) kullanılarak birbirlerine vidalama yöntemi ile bağlanmıştır. Cıvata bağlantısı ile birbirlerine bağlanan sandviç yapılı alüminyum köpük malzemeler çekme deneyine tabi tutularak kullanılan yeni yöntemin mukavemet değerleri incelenmiştir. Metal dolgulu cıvata bağlantılı alüminyum sandviç köpük yapı ile köpük metalin kendi çekme dayanımı karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen değerler, köpük malzemenin çekme mukavemeti formülleri ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar ile analiz yönteminde numuneler üç boyutlu olarak modellenmiş, gerilme ve gerinme – şekil değişikliği değerleri hesaplanmış, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Köpük Metaller, İkincil İşlemler, Cıvata bağlantısı, Tel Erezyonla Kesim, CO₂ Lazer ile Kesme, Sandviç Köpük Malzemeler, Çekme Deneyi, Sonlu Elemanlar ile Analiz

ABSTRACT

In this study, the secondary operations of aluminium foam metals are investigated. Production technology of foam metals are examined and considered between each other according to their positive and negative points. Closed cell structured foam materials samples are cut by CO₂ laser cutting technology, EDM (Electrical Discharge Machining) and mechanical rotary circular saw and investigated according to machinability of aluminium foam materials. The results are compared between each other and the cutting surfaces and the structural changes examined by the view of scanning electron microscope (SEM). Due to the porous structure of foam materials, some constrains and strength problems are occurred with screw connection methods. Sandwich structured aluminium foam metal samples are joined each other with different method (metal filling epoxy). Sandwich structured aluminium foam metals are joined each other with screw connections and the strenght of this method is investigated by using tensile strenght test. The tensile strenght of the metal filled screw joined aluminium sandwich foam structure and one-piece aluminum sandwich structure are compared. The values obtained from experimental studies are compared with the foam materials tensile strenght formulas and with the result of finite element analysis. Samples are modelled as 3D structure and stres – strain values are calculated with finite element analysis and compared with experimental results.

Key Words: Aluminium Foam Materials, Secondary Operations, Joining Fastener, EDM, CO₂ Laser Cutting, Sandwich Foam Materials, Tensile Test, Analysis by Finite Element Method

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAY SAYFASI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	xiv
GİRİŞ	1
1.KURAMSAL TEMELLER	7
1.1.Genel Özellikler ve Kullanım Alanları	7
1.1.1.Darbe Enerjisini Sönümleyebilme Yeteneği	14
1.1.2. Elektro Manyetik Kalkan	16
1.1.3.Titreşim Sönümleme	17
1.1.4.Termal ve Elektrik İletkenlik	18
1.2.Köpük Malzeme Üretimi	19
1.2.1.Direk Köpüklendirme	19
1.2.2.Endirekt Köpüklendirme	21
1.2.3.Köpüklendirme Önmalzemesi Üretimi	23
1.2.4.Üretim Parametreleri	23
1.2.5.Köpüğün Stabilitesi	23
1.3.İkincil İşlemler	25
1.3.1.Cıvata Çağlantısı	26

1.3.2.Lazer Kesme	27
1.3.3.Tel Erezyonla Kesim (EDM)	28
2.MATERYAL VE YÖNTEM	30
2.1.Kullanılan Malzeme	30
2.2.Lazerle Kesme Deneyi	30
2.3.Tel Erezyonla Kesme Deneyi	36
2.4.Cıvata Bağlantısı	40
2.5.Cıvata Bağlantı Yönteminin Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi (FEA)	49
2.5.1.Cıvata Bağlantısı Deney 1 Modelleme ve Analiz	50
2.5.2.Cıvata Bağlantısı Deney 2 Modelleme ve Analiz	51
2.5.3.Cıvata Bağlantısı Deney 3 Modelleme ve Analiz	51
3.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	53
3.1.Lazerle Kesme ve Tel Erezyonla Kesme İşlemleri	53
3.2.SEM ile Farklı Tip Kesme İşlemlerinde Elde Edilen Yüzeylerin İncelenmesi	57
3.3.Köpük Malzemelerin Cıvata Bağlantısı Sonuçlarının Değerlendirilmesi	64
3.4.Cıvata Bağlantılı Köpük Malzeme Yapısının Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	65
3.4.1.Sandviç Yapılı Köpük Malzeme Analizi	65
3.4.2.Cıvata Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzemeler Analizi	66
3.4.3.Sapma Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzeme Analizi	68
4.TARTIŞMA VE SONUÇ	71

KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	78
TEŞEKKÜR	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Bazı Malzemelerin Özellikleri	15
Çizelge 2.1. Lazer Kesim Parametreleri	32
Çizelge 2.2. Sandviç Köpük Malzeme EDM Kesim Parametreleri	37
Çizelge 2.3. 10 mm Kalınlığında Kapalı Hücre Yapılı Al. Köpük EDM Kesim Parametreleri	37
Çizelge 2.4. Deneylerde Kullanılan Malzeme Özellikleri	50
Çizelge 3.1. Deneysel Sonuçlar ile Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları Karşılaştırma Değerleri	69
Çizelge 3.2. Eşit Yük Altında Uzama Değerleri Karşılaştırma Tablosu	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Kapalı ve Açık Hücre Yapılı Metal Köpük Malzemeler	8
Şekil 1.2. Alüminyum Köpük Malzemenin Otomotiv Sektöründe Kullanım, Hafifletme ve Darbe Sönümleme	8
Şekil 1.3. İçi Köpük Metal ile Doldurulmuş Profil	9
Şekil 1.4. “EURO B25T” Köpük Metal Takviyeli Karma Kolu Desteği	9
Şekil 1.5. Sandviç Köpük Panelden (AFS) Yapılmış Ariane5 Roket Konisi	10
Şekil 1.6. Takım Tezgahında Titreşim Giderme ve Hafif Konstrüksiyon Amaçlı Köpük Metal Kullanımı	10
Şekil 1.7. Almanya Stralsund Teknoloji Üniversitesi Tarafından Üretilen Model Yarış Araba Üzerinde Darbe Koruyucu Olarak Köpük Kullanımı	11
Şekil 1.8. Alüminyum Köpük Malzemedeki Kiriş. Toplam Uzunluk 1900mm, İç kısım Köpük Uzunluğu 1580mm	11
Şekil 1.9. Sandviç Yapılı Alüminyum Köpük Malzemeler	12
Şekil 1.10. Alüminyum Köpük Malzemenin Plato Stresi ve Sıkışma Eğrisi	13
Şekil 1.11. Köpük Metallerin Çarpma Testlerinde Darbe Sönümleyici Olarak Kullanımı	14
Şekil 1.12. Aynı Ağırlıkta Numuneler İçin Frekansın Bir Fonksiyonu Olarak Manyetik Alan Koruma Etkinliği	16
Şekil 1.13. Zaman Yüzey İvmelenme İlişkisi, Vibrasyonu Sönümleme	

	Yeteneği	17
Şekil 1.14.	Yoğunluğa Bağlı Elektrik İletkenliği	18
Şekil 1.15.	Temel Alaşım Elemanı ve Yoğunluğa Bağlı Termal İletkenlik	19
Şekil 1.16.	Direkt Köpürtme Yöntemi	20
Şekil 1.17.	Endirekt Köpürtme Yöntemi	22
Şekil 1.18.	Alternatif Endirekt Köpürtme Yöntemi	22
Şekil 1.19.	Köpüğün Stabilitesini Sınırlayan Farklı Etkiler	24
Şekil 1.20.	Köpürebilir Dolgu ile Cıvata Bağlantısı	27
Şekil 1.21.	Lazer Kesme İşleminin Şematik Gösterimi	28
Şekil 1.22.	Tel Erozyonda Kesim İşleminin Şematik Gösterimi	29
Şekil 2.1.	Hibrid CO ₂ Lazer Kesme Makinesi	31
Şekil 2.2.	Lazerle Kesim Sonucu (Kesim 1)	33
Şekil 2.3.	Lazerle Kesim Sonucu (Kesim 1.1)	33
Şekil 2.4.	Lazerle Kesim Sonucu (Kesim 2)	34
Şekil 2.5.	Lazerle Kesim Sonucu (Kesim 2.1)	34
Şekil 2.6.	Lazerle Kesim Sonucu (Kesim 3)	35
Şekil 2.7.	Lazerle Kesim Sonucu (Kesim 3.1)	35
Şekil 2.8.	Makino EV64 CNC Tel Erozyon Kesim Tezgahı	37
Şekil 2.9.	Tel Erozyonla Kesim Sonucu (Sandviç Yapılı Malzeme)	38
Şekil 2.10.	Tel Erozyonla Kesim Sonucu Oluşan Yapı (Sandviç Yapılı Malzeme)	39
Şekil 2.11.	Tel Erozyonla Kesim Sonucu Oluşan Yapı (Kapalı Hücre Yapılı Köpük Malzeme)	39
Şekil 2.12.	Delinmiş Alüminyum Dolgulu Sandviç Yapılı Köpük Malzeme	41
Şekil 2.13.	Diş Açılmış Alüminyum Dolgulu Sandviç Yapılı Köpük Malzeme	41

Şekil 2.14.	Cıvata Bağlantısı Yapılan Sandviç Yapılı Alüminyum Köpük Malzemeler	42
Şekil 2.15.	Çekme Deneyi Öncesi Alüminyum Plaka Kaynatılmış Köpük Malzeme	42
Şekil 2.16.	Çekme Deneyi Sonrası Alüminyum Plaka Kaynatılmış Köpük Malzeme	43
Şekil 2.17.	Alüminyum Plaka Kaynatılmış Köpük Malzeme Numunesinin Çekme Deneyi Grafiği (Cıvata Bağlantısı Deney 1)	43
Şekil 2.18.	Sandviç Yapılı Köpük Malzemenin Plaka Yutma Yüzeyi	44
Şekil 2.19.	Çekme Deneyi Öncesi Diş Açılmış Köpük Malzeme	45
Şekil 2.20.	Çekme Deneyi Sonrası Diş Açılmış Köpük Malzeme	45
Şekil 2.21.	Diş Açılmış Köpük Malzeme Numunesinin Çekme Deneyi Grafiği (Cıvata Bağlantısı Deney 2)	46
Şekil 2.22.	Çekme Deneyi Öncesi Al. Plaka Kaynaklı ve Saplama Montajlı Numune	47
Şekil 2.23.	Çekme Deneyi Sonrası Al. Plaka Kaynaklı ve Saplama Montajlı Numune	47
Şekil 2.24.	Alüminyum Plaka Kaynaklı ve Saplama Montajlı Köpük Malzeme Numunesinin Çekme Deneyi Grafiği (Cıvata Bağlantısı Deney 3)	48
Şekil 2.25.	Sandviç Yapılı Köpük Malzeme Modeli	50
Şekil 2.26.	Cıvata Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzemeler ve Çekme Analizi Modeli	51
Şekil 2.27.	Saplama Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzeme ve Çekme Analizi Modeli	52
Şekil 3.1.	Tel Erozyon ile Kesilen ve Bekletilen Numunelerde Görülen Oksitlenme	55
Şekil 3.2.	Lazer Kesme (Solda) ve Tel Erozyon Kesmede (Sağda)	

	Elde Edilen Gözenek Yapısı	56
Şekil 3.3.	Manüel Testere ile Kesim X40	57
Şekil 3.4.	Manüel Testere ile Kesim X100	58
Şekil 3.5.	Manüel El Taşı ile Kesim X33	58
Şekil 3.6.	Manüel El Taşı ile Kesim X100	59
Şekil 3.7.	Tel Erozyonla Kesim X40, V=13 mm/dak	59
Şekil 3.8.	Tel Erozyonla Kesim X100, V=13 mm/dak	60
Şekil 3.9.	Tel Erozyonla Kesim X40, V=16 mm/dak	60
Şekil 3.10	Tel Erozyonla Kesim X100, V=16 mm/dak	61
Şekil 3.11.	Tel Erozyonla Kesim X40, V=22 mm/dak	61
Şekil 3.12.	Tel Erozyonla Kesim X100, V=22 mm/dak	62
Şekil 3.13.	Sandviç Yapılı Köpük Malzemenin Köpük-Plaka Metalurjik Bağı	63
Şekil 3.14.	Sandviç Yapılı Köpük Malzeme Gerinme Analiz Sonucu	65
Şekil 3.15.	Sandviç Yapılı Köpük Malzeme Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Kuvvet-Şekil Değişirme Eğrisi	66
Şekil 3.16.	Cıvata Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzemelerin Gerinme Dağılımı	66
Şekil 3.17.	Sandviç Yapılı Cıvata Bağlantılı Köpük Malzemelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Kuvvet-Şekil Değişirme Eğrisi	67

Şekil 3.18.	Saplama Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzemenin Gerinme Dağılımı	68
Şekil 3.19.	Saplama Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzemelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Kuvvet-Şekil Değiştirme Eğrisi	68

SİMGELER DİZİNİ

A	: Alan
d	: Nozul çapı
f	: Odak mesafesi
F	: Uygulanan kuvvet
G	: Gaz tipi
h	: Nozul – sac arası mesafe
P	: Gaz basıncı
V	: Kesme hızı
W	: Kesme gücü
σ_k	: Kopma mukavemeti
ε	: Birim uzama
Δ	: Uzama
[K]	: Rijitlik matrisi
[D]	:Bilinmeyen vektör
[R]	: Bilinen yük vektörü

GİRİŞ

Köpük metaller genelde alüminyum olmak üzere bakır, titanyum, nikel, çelik, çinko gibi metallere oluşabilen, büyük oranda gözenek adı verilen gaz ile dolu boşluklar içeren yapılardır. Metalik köpüklerin birçok mühendislik özellikleri polimer tabanlı köpüklere göre üstündür. Daha rijittirler, daha yüksek sıcaklıklarda stabil durumdadırlar, daha yüksek yanma direnci özelliğine sahiptirler ve yanma sırasında herhangi bir toksit duman oluşturmazlar. Bunlara ilaveten, herhangi bir kirlenme ve kirlilik problemi oluşturmada tamamen geri dönüşümleri mümkündür.

Sahip oldukları gözenekler sayesinde, hacim (dolu) malzemelere göre köpük metaller alıılmamış ve üstün özelliklere sahiptirler. Ezilebilirler, sıkıştırıldıklarında plato stresi özelliği ve deformasyon sırasında poisson oranında değişiklik gösterirler. İyi mekanik özelliklerin (özellikle mukavemet ve rijitlik) ve düşük ağırlığın mükemmel birleşimine sahip olmaları en önemli avantajlarıdır.

Köpük malzemeler darbe yönü fark etmeksizin yüksek darbe enerjisini sönümleme özelliğine sahiptirler. Ses yalıtımında, elektromanyetik koruma ve vibrasyon sönümleme konularında çok etkilidirler. Köpük metaller, aynı anda klasik bir malzemedeki elde edilmesi mümkün olmayan ve genellikle birbiriyle zıt birçok özelliğin benzersiz birleşimini sunarlar. Örneğin; çok düşük yoğunluk, yüksek rijitlik, çarpma enerjisini absorbe etme özelliği, düşük termal iletkenlik, düşük manyetik geçirgenlik ve iyi vibrasyon sönümleme özelliği.

Köpük malzemeler doğadaki gözenekli ve mukavemetli yapıda olan ağaç, kemik yada mercan gibi organik yük/yatak malzemelerine benzer şekilde metallere hücre sel mukavemet kazandırır lar. Böylece önemli bir yük taşıma / hafiflik oranına sahiptirler.

Metalik köpüklerin üretim yöntemlerinin ilk kez patentlenmesinden bu yana çok uzun zaman geçmiş olsa da bu malzemeler henüz ticari olarak büyük ölçüde yaygınlaşmış değillerdir. Bu durum ise, tasarımının uygunsuzluğu, sahip olduğu özelliklerin tekrar üretilebilirliğinin düşük olması, test prosedürlerinin eksikliği, üretim tekniklerinin nispeten karmaşık ve pahalı olması, köpük oluşumu esnasında bazı çıktılar ın (hücre cidar kalınlığı gibi) hala net olarak kontrol altına alınamamış

olmasından kaynaklanmaktadır. Şu anda metal köpükler halen tam olarak karakterize edilmiş ve proses tam olarak anlaşılabilmiş değildir. Bu da, yetersiz kontrol ve buna bağlı olarak değişken birtakım özellikleri beraberinde getirmektedir.

Yukarıda kısaca bahsedilen özellikler ve sunduğu potansiyel avantajlar sayesinde önemi ve kullanım alanı her geçen gün artmakta olan köpük metaller sanayide sahip oldukları yeri güçlendirmekte ve her geçen gün yeni kullanım alanları ve imkanları sunmaktadır.

İlk kez 1948 yılında Benjamin Sosnick cıva ile alüminyum köpüğü üretmeyi denedi. Alüminyum karışımını ve cıvayı kapalı bir kaptaki basınç altında eritti. Alüminyumun ergime noktasında cıvanın buharlaşmasını ve köpük oluşumunu sağlamak için basınç serbest bırakıldı ve köpük metal üretimi başarılı oldu. Sosnick, 20/01/1948 de bu yöntemle “köpük tipi malzeme üretim prosesi” adı altında ilk patenti aldı. (United States Patent 2434775). Daha sonra daha az tehlikeli yöntemler geliştirilecek köpük metaller literatüre girmeye başladı. Fakat o dönemde köpük metallerin üretim zorluğu, ekipman yetersizliği, üretimin pahalı olması ve en önemlisi özelliklerin tekrar edilebilirliği çok zayıf olması nedeniyle bu ürünler 1990’lı yılların başına dek unutuldu yada ihmal edildi. Gelişen sanayi ve teknoloji paralelinde hassas üretimi, üretim yeteneklerini ve üretim yöntemlerindeki hızı arttırdı, maliyeti düşürdü. Bu gelişim ile birlikte tekrar gündeme gelen köpük malzemeler ilk olarak otomotiv sektöründe darbe sönümleyiciler olarak kullanılmaya başlandı ve şu anda hâlihazırda birçok otomotiv firmasının standart malzemesi olarak ambar ve stoklar yerini almaktadır. Fakat bu özel malzemenin kullanımını sadece otomotiv sektöründe darbe sönümleyici olması ile sınırlı değildir.

- Enerji absorbe ederler; güvenliği arttırırlar.
- Hafiftirler ve özellikle aynı ağırlıktaki dolu malzemelere göre eğilme mukavemetleri yüksektir; otomotiv, gemi ve havacılık sektörlerinde enerji sarfiyatını azaltırlar.
- Sesi ve vibrasyonu azaltırlar, yalıtım malzemesi olarak kullanılırlar.
- Temiz teknoloji; zehirli değildirler ve % 100 geri dönüşümleri mümkündür.
- Kullanım oranı yüksek malzemelerdir; 3 boyutlu olarak kalıplanabilirler.
- Kontrollü gözenek boyutları elde edildiğinde yüksek sıcaklık ve kimyasal sıvılarda filtreleme amacıyla kullanılabilirler.

Hızlanmış bir nesne polistiren gibi plastik bir köpüğe çarptığında, köpük içindeki milyonlarca hava hücresini parçalamak için gerekli olan iş, nesneyi yavaşlatır. Bundan dolayıdır ki polistiren bisiklet kaskları için ideal bir malzemedir. Alüminyum köpük metallere de sahip oldukları mükemmel rijitlik sayesinde, polimer köpükten daha ince bir kalınlıkta aynı seviyede enerji absorbe edebilirler

90' lı yıllardan sonra makine, otomotiv ve havacılık sektörleri robot, otomasyon, mekatronik gibi kavramlarında bu alana dahil olması ile gelişen elektronik ve bilgi çağına paralel kendini geliştirmeye devam etmiş ve “daha hızlı, daha az enerji ile daha çok iş üretme” şeklindeki beklentilere cevap verecek biçimde yeniden yapılanmıştır. Daha az yakıt harcayan motorlar, daha hızlı giden, daha hafif ve daha güvenli taşıtlar, insansız fabrikalarda, madenler, zor şartlarda daha az enerji çalışan robotlar, daha mukavemetli ve hafif uzay araçları, daha hızlı ivmelenen, yüksek hızlara ulaşan ve daha düşük tork değerli motorlara sahip kesme ve işleme makineleri bunların en basit örnekleridir.

Tüm bu beklentilerin ortasında bazı kısıtlar ve sınırlamalar oluşmaktadır. Mukavemet artışının malzeme artışına ve dolayısıyla da ağırlık artışına sebep olduğu klasik düşünce biçimi artık beklentileri karşılayamaz hale gelmiştir. Ve “hafif konstrüksiyonlar” (lightweight constructions) adı altında ağırlığı az olan ama mukavemetli yapılar üzerinde çalışmalar yoğunluk kazanmaktadır.

İki farklı yapıda köpük metal vardır; açık hücreli ve kapalı hücreli köpük metallere. Özellikle kapalı hücreli yapılar otomotiv, havacılık, tıp, makine ve diğer endüstri uygulamaları için idealdir. Döküm şeklinde kalıplanıp üretilebilirler. Açık hücreli yapılar özellikle pil elektrotları, ısı değiştiriciler ve filtreler için uygundur.

Temel olarak köpük metallere aşağıda belirtildiği şekilde kodlanırlar: metal kompozisyon ve yoğunluk. Özel bir ısıl işlem mevcut ise sona ilave edilir.

Örneğin; AlSiMg - 0,55

Bunun anlamı alaşımda alüminyum, silisyum ve magnezyum bileşenlerinin ve yoğunluğun 0,55 g/cm³ olmasıdır.

Şu anda üzerinde yoğun şekilde çalışılan konular; köpük metallerin üretim parametrelerinin kontrolü, gözenek boyutunun kontrolü, yapının homojen ve izotropik özellik gösterebilmesidir. Belli noktalarda ilerleme kaydedilen bu konuya sanayide de kullanım alanı yaratmak için mutlaka ikincil işlemlerin incelenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde üretilebilirliği olan üstün özelliklerde bir malzeme için darbe ve ses sönmüleme gibi homojenliğin çok ön planda olmadığı birkaç alan dışında kullanma şansı olmayacaktır. Kullanım sahası günden güne artan köpük malzemeler için ikincil operasyonlar son derece önemlidir. Kompleks şekillerin oluşturulması her zaman istenilen şekilde parçayı kalıplamak ile mümkün değildir. Döküm büyük miktarda üretim dikkate alındığında etkili bir yöntem olmasına rağmen az sayıda üretim için oldukça pahalı bir yöntemdir. Ayrıca döküm köpük metal parça üzerinde bir değişiklik öngörüldüğüne bunu sağlama imkânı oldukça zordur. İkincil işlemlerin araştırılması bu noktada ön plana çıkmaktadır. Az sayıda üretim, özel şekilli parçaların cıvata, kaynak vb yöntemlerle birleştirilmeleri ve köpük malzemelerle farklı malzemelerin birleştirilmesi gibi konular bu malzemeleri sanayide kolay kullanılabilir hale getirecek ve kullanım alanlarını arttıracaktır. Arzu edilen şekillerin standart üretilen köpük malzemelerden, kesme, delme, talaşlı imalat, yapıştırma, kaynak, cıvata ile birleştirme gibi yöntemlerle oluşturulabilmesi de gerekir. Aksi halde bu malzemelerin yaygınlaşması söz konusu değildir.

Köpük malzemelerin özellikle endüstride otomotiv, havacılık, demiryolu ve motor teknolojileri alanında kullanımı ön plandadır ve sahip olduğu alev direnci, yapısal sönmüleme ve dekoratif yüzey yapısı gibi özellikler sebebiyle de yeni kullanım alanları oluşmaktadır. İçi köpük metal ile doldurulan standart profiller yada açık profillerde iç kısımlarında köpük malzeme üretilip profil haline getirilen yapılar, taşıyıcılar, destek elemanları gibi yeni kullanımları oluşturmaktadır.

Köpük malzemenin sahip olduğu bazı özellikler üretim sonrası ikincil işlemler için bu malzemeleri pek uygun kılmazlar. Örneğin;

- Yapının sıkıştırılabilir olması nedeniyle form vermeye ve işleme çok müsait değildir.
- Çekme gerilmesine olan yüksek hassasiyeti nedeniyle şekillendirme zordur.

- Hücre duvarlarında ve yüzey tabakadaki hatalar nedeniyle kaplama işlemi zordur.
- Dış yüzey genelde oksit tabakası ile kaplıdır ve bu nedenle kaplama, lehimleme ve kaynak zordur.
- Eriyik stabilizatörü olan seramik partiküllerin varlığı nedeniyle talaşlı imalat zordur.

Talaşlı imalat ikincil işlemler içerisinde, kesme esnasında oluşan kuvvetlerin hücre çeperinin deforme etmesi, oluşan ısının uzaklaştırılmaması, oluşan ısı nedeniyle ergiyen malzemenin takıma ve hücre çeperine yapışması nedeniyle çok tercih edilen bir yöntem değildir. Yine de parçaların işlenmesi ve delinmesi gerekir. Prensipde, köpük malzemeler tüm konvansiyonel yöntemlerle işlenebilirler, ancak iyi bir yüzey kalitesinin elde edilmesi çok zayıf bir ihtimaldir. Normalde eriyik içerisinde sıvı köpüğü stabilize etmesi için seramik partiküller eklenir. Özellikle SiC partikülleri bulunuyorsa, SiC 'ün aşındırıcı etkisi ile takımlarda oluşacak aşırı aşınmaların dikkate alınması gerekir. Konvansiyonel işleme gözenek duvarlarında bükülme ve ezilmelere, kırılğan aşımelerde ise çatlaklara ve yırtılmalara neden olur. Bu, yüzeyde kötü kaliteye ve kötü hassasiyete sebebiyet verir. Kesme düzlemindeki hassasiyet ve kalite, özellikle ince gözenek duvarlarının kısmi ergimesinden ve bunların bir sonraki aşamada oluşan difüzyon ile kesici takıma bağlanmasından etkilenir. Yüksek porozite ve düşük termal iletkenlik ısının taşınması ile etkili şekilde bir soğuma sağlanmasına imkân vermez. Bir diğer taraftan, gözenek duvarlarının ergime ve eğilmesi kesme yüzeyini kuvvetlendirir. Eğilen duvarlar gözeneklere bastırılır ve buradaki yoğunluğu artırır. Bu da takımın daha çok aşınmasına sebebiyet verir.

Köpük malzemeler sıkışabilir ve baskı uygulandığında çarpışma enerjisini plastik deformasyon enerjisine dönüştürüp malzemeyi bu konuda ideal hale getiren plato stresi özelliği gösterirler. Alüminyum ve çelik gibi hacim malzemeler sıkıştırıldığında bu özelliği göstermezler. Çeliğin özgül ağırlığı $7,8\text{g/cm}^3$, alüminyumun $2,7\text{g/cm}^3$, alüminyum köpük metalin ise $0,4-1\text{ g/cm}^3$ tür.

Dış kabuk köpük malzemenin özelliklerini ve görünümünü önemli ölçüde artırır. Bu nedenle fonksiyonellik için gerekmiyorsa kaldırılmasına gerek yoktur ve zaten pahalı bir işlemdir.

Alüminyum köpük malzemeler sanayide kendilerine yer edinmeye çalışan, klasik malzemelere oranla benzersiz özelliklere sahip bir gruptur. Bunların yaygınlaşması için öncelikle mekanik özelliklerinin ve davranışlarının biliniyor olması ve üretim sonrası işlemlere uygunluğu gerekmektedir.

Bu çalışmada Al köpük malzemelerin farklı kesme yöntemleri (lazer, tel erozyon, dairesel testere) ile işlenebilirliği ve farklı yöntemlerle kesilen köpük malzemelerin taramalı elektron mikroskobu ile hücre yapıları ve değişimleri incelenmiştir. Sandviç yapılı köpük malzemeler sökülemeyen kaynak ve sökülebilir cıvata bağlantıları ile birleştirilmiş, çekme testleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

Yapıları gereği sandviç yapılı köpük malzemeler kapalı hücre yapılı köpük malzemelere göre daha mukavemetlidirler. O nedenle eğilme mukavemetinin öne planda olduğu dinamik ve statik yük taşıma, kiriş, konsol gibi uygulamalar için daha uygun malzemelerdir. Sandviç yapılı köpük malzemeleri bahsi geçen uygulamalarda etkin kullanabilmek için geliştirdiğimiz cıvata bağlantı metodu yapılan fiziki testlerin yanında bilgisayar ortamında modellenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. ANSYS programı ile yapılan sonlu elemanlar analizinde önce malzeme 3 boyutlu modellenmiş sonra farklı 3 analiz uygulanmıştır. İlk analizde sandviç yapılı köpük malzemede üst-alt alüminyum plaka ile alüminyum köpük alaşımının birbirlerine olan yapışma kuvvetleri ölçmek için numuneler modellenmiş ve çekme testi ile simüle edilerek elde edilen sonuçlar deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. İkinci analizde birbirlerine cıvata ile bağlanan sandviç yapılı 2 farklı alüminyum köpük metalin birbirlerinden ayrılma kuvvetlerini gösteren çekme deneyi modellenmiştir. Son analizde ise bulunan bağlantı yönteminin mukavemetini sonlu elemanlar metodolojisi ile hesaplamak içine alüminyum esaslı epoksi doldurulup dış açılan sandviç köpük malzeme, bir tarafından dişlere takılan cıvata, diğer tarafından sandviç plakadan tutularak yapılan çekme deneyi modellenmiş ve simüle edilmiş. Tüm bilgisayar destekli sonlu elemanlar çalışmalarında elde edilen analiz sonuçları yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve farklılıklar incelenmiştir.

1. KURAMSAL TEMELLER

1.1. Genel Özellikler ve Kullanım Alanları

Köpük malzemeler hücresel mukavemetini metallere taşır. Bunu doğanın organik yük taşıyıcılarını (ağaç, kemik ve mercan gibi) taklit ederek gerçekleştirir. Sahip olduğu eşsiz özellikler, bunları geniş bir alanda ağır yükler için ideal malzeme türü yapar. Köpük metaller, otomotiv, transport, havacılık, askeri ve yapı konstrüksiyon alanlarını içeren birçok alanda ve uygulamalarda ağır metallerin yerlerini alacak potansiyele sahiptir.

Yeni araba konseptleri ve elektronik ekipmanlar arabaların sürüş keyfini artırırken bunları ağırlaştırır. Bu da yakıt sarfiyatını direkt etkiler. Otomotiv üreticileri güvenlikten ödün vermeden arabalarını daha hafifletmeye çalışırlar. Örneğin, köpük metal ürünü olarak kapılarda kullanım kapı başına 3,18 kg (7 pound) hafifleme ve daha iyi performans sağlar. İlave olarak, Avrupa'da Avrupa Birliği, üreticilerinden tüm araç modellerinde gelecekte yaya güvenliğinin sağlanması standartlarını talep etmektedir. Böylece örneğin araba kaportasında yayaları sert motor bloğundan korumak için köpük metal kullanımı değerlendirilmektedir (Metcomb 2009).

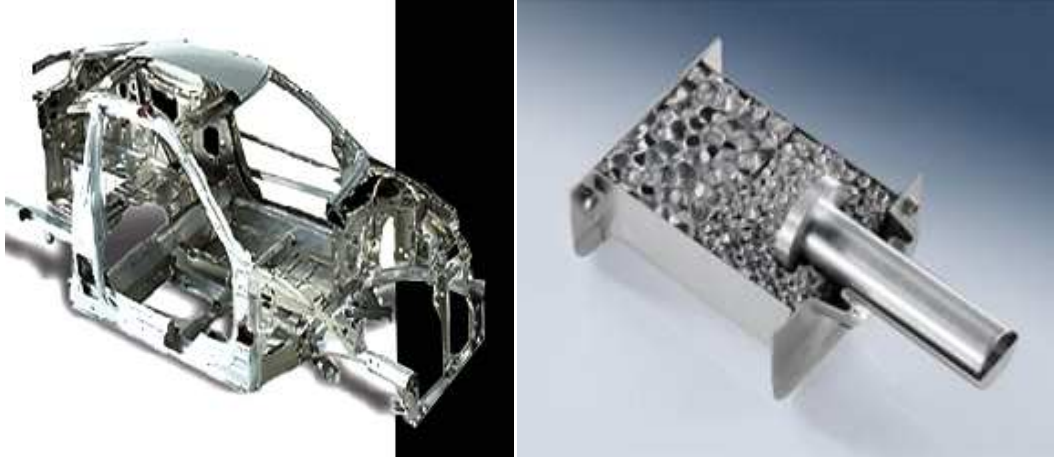
Köpük metali pazarını günümüz şartlarında tahmin etmek son derece güçtür. Gerek yeni kullanım alanları gerekse mevcut kullanım alanlarının yaygınlaşması nedeniyle önemli artışlar öngörülmektedir. Sadece otomotiv pazarı için iki rakamlı büyüme oranı ile 2010 yılı için 6-7 milyar dolar potansiyel Pazar görülmektedir. İlave olarak, Ulusal Bilim Kurumu, nano teknoloji ilişkili ürün ve servisler için 2015 yılında, bu alanda 1 trilyon dolar Pazar öngörülmektedir (Metcomb 2009).

Açık ve kapalı hücre yapılı olmak üzere iki tip köpük malzeme vardır. Şekil 1.1' de açık ve kapalı hücre yapılı malzeme örnekleri gösterilmiştir. Kapalı hücre yapılı alüminyum köpük malzemeler herhangi bir şekilde kalıplanabilirler. Bu da onu endüstrideki mukavemet gerektiren uygulamalarda ağır metallerin yerini alabilecek bir alternatif malzeme grubu yapar. Örneğin hafifliği ve enerji sönmeme yetenekleri ile kapalı hücre yapılı alüminyum köpükler, yakıt verimliliğini arttırmaktadırlar. Ayrıca,

arabadaki titreşimi sönümlemede kullanmakta ve aracın güvenliğini arttırmaktadırlar (Şekil 1.2).



Şekil 1.1. - Kapalı ve Açık Hücre Yapılı Metal Köpük Malzemeler (Alulight 2006)



Şekil 1.2 - Alüminyum Köpük Malzemenin Otomotiv Sektöründe Kullanım, Hafifletme ve Darbe Sönümleme (Alulight 2006)



Şekil 1.3 - İçi Köpük Metal ile Doldurulmuş Profil (Hanssen 2003)

Şekil 1.3’ de görülen içi köpük metal ile doldurulan standart profiller yada açık profiller ve profil içerisinde köpürtme yöntemi üretilen metal köpük dolgulu profiller genelde taşıyıcılar, destek elemanları gibi yeni alanlarda kullanılmaya başlamıştır.



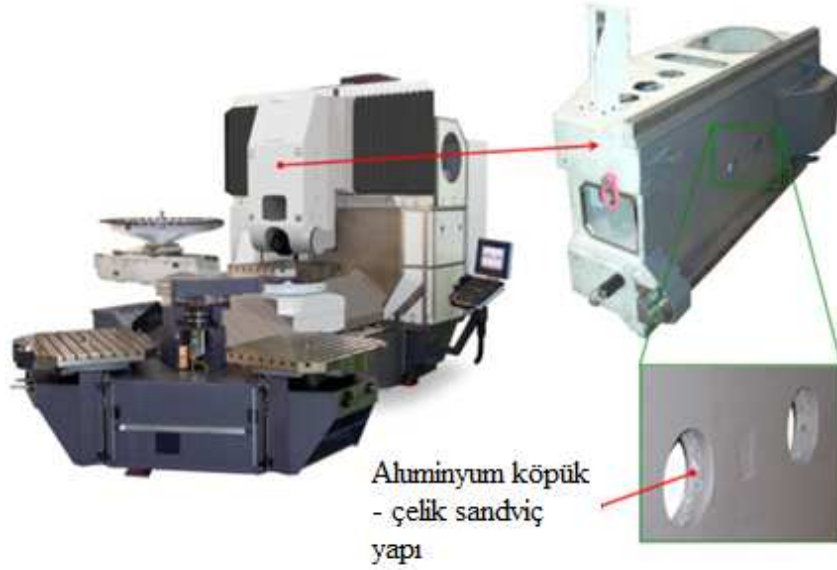
Şekil 1.4 - “EURO B25T” Köpük Metal Takviyeli Karma Kolu Desteği (Banhart 2008)

Şekil 1.4’ de görülen teleskop kollu vinçte kaldırma kolları sandviç köpük malzemedен yapılarak ağırlık toplam araç ağırlığı 3500 kg’ın altında tutulmuştur. Böylece araç hem mevcutlarına göre daha hafif bir konstrüksiyona sahip olmuş hem de Euro B kategorisinde sürücü ehliyeti olan birisine aracı kullanım imkânı sunulmuştur (Banhart 2008).



Şekil 1.5 - Sandviç Köpük Panelden (AFS) Yapılmış Ariane5 Roket Konisi (Banhart 2008)

Şekil 1.5’ de görülen Ariane 5 roketinde füze yüklerini destekleyen konik yapı mevcutta pahalı yöntemlerle üretilen bal peteği şeklinde alüminyum alaşım. Bu mevcut yapı, daha ucuz ve üretimi kolay sandviç köpük plakalarla değiştirilmiş ve yeni sandviç yapı gerekli yükleri taşıyacak mukavemete sahip halde tasarlanmıştır (Banhart 2008).

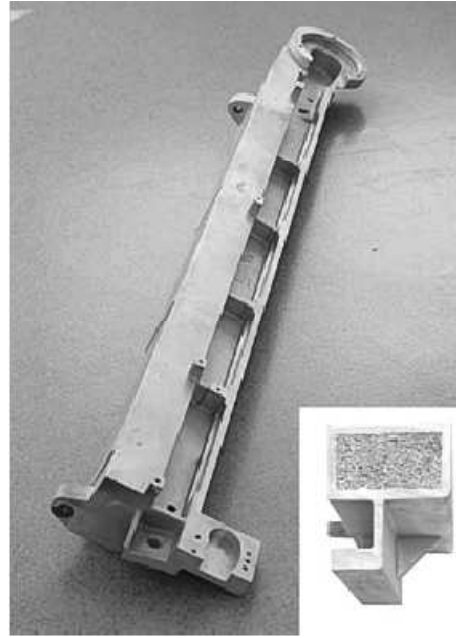


Şekil 1.6 - Takım Tezgahında Titreşim Giderme ve Hafif Konstrüksiyon Amaçlı Köpük Metal Kullanımı (Fraunhofer 2009)

Şekil 1.6' da görülen değişebilir tablalı CNC işleme merkezi gövdesi, işleme esnasında oluşan titreşimlerin sönümlenmesi ve daha hafif yapılı bir konstrüksiyon amacı ile sandviç yapılı çelik köpük malzemeden üretilmiştir (Fraunhofer 2008). Şekil 1.7 ve Şekil 1.8' de alüminyum köpük malzemenin güncel kullanımları ile ilgili örnekler verilmiştir. Bunlar, model yarış aracı darbe sönümleyicisi ve metal köpük dolgulu kiriş uygulamalarıdır.



Şekil 1.7 - Almanya Stralsund Teknoloji Üniversitesi Tarafından Üretilen Model Yarış Araba Üzerinde Darbe Koruyucu Olarak Köpük Kullanımı (Lefebvre 2008)



Şekil 1.8 - Alüminyum Köpük Malzemedeki Kiriş. Toplam Uzunluk 1900 mm, İç Kısım Köpük Uzunluğu 1580 mm (Lefebvre 2008)

Köpükler yapıları gereği nispeten yüksek rijitlik ile düşük yoğunluk özelliklerini, kendilerini oluşturan dolu ana malzemelerden daha iyi birleştirirler. Eğer sadece direkt mukavemet dikkate alınırsa, köpükler aynı ağırlıkta katı malzeme ile çok az daha düşük performans gösterirler. Köpüklerin avantajları bükülme gerilmeleri ağırlığın bir fonksiyonu olarak dikkate alındığında görünür hale gelir. Hücresel yapılarıdaki kütle dağılımı benzer ağırlıktaki dolu malzemeye göre köpük malzemelerde yüksek atalet momentini ve oldukça yüksek belirli bükme rijitliğini ve mukavemetini verir. Bu da, köpükleri yüksek mukavemetli, düşük yoğunluklu yük taşıma komponentleri olarak otomotiv ve havacılık uygulamalarında faydalı hale getirir. Bu direkt yük taşıma komponentleri olabileceği gibi genel kullanım, köpüğün ortada olduğu metal sac ile kaplandığı sandviç yapılı bağlantılı yeni formlardır (Şekil 1.9). Sandviç yapılar, köpüğün bal peteği tipi malzemesi gibi davranarak, katı dış plakalar arasına konarak üretilir. Tipik bal peteği malzemeler ile karşılaştırıldığında, bunlar seri üretime daha uygundur ve köpükleri izotropik doğaları gereği daha yüksek kesme mukavemetine sahiptirler. Bazı üretim metotları, düzensiz şekilleri ve kalıpları doldurmaya imkan verir. Örneğin kompleks şekiller yapılarak, profiller ve borular köpük malzeme ile doldurularak ağırlığı fazla arttırmadan rijitlikte önemli artışlar sağlanır (Curran 2008).



Şekil 1.9 Sandviç Yapılı Alüminyum Köpük Malzemeler

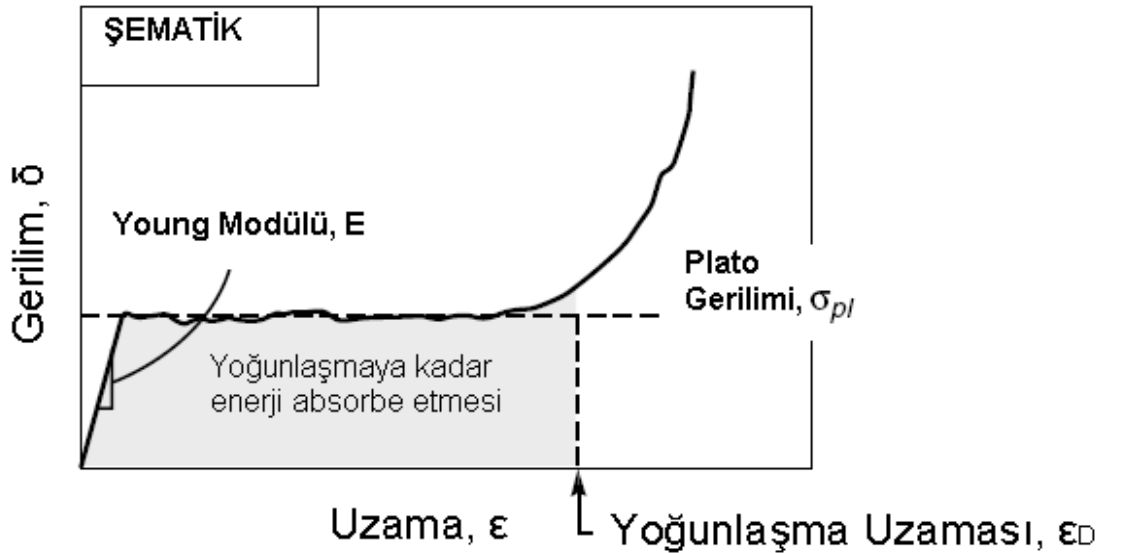
Nano teknolojinin gelişimi ile artık günümüzde Entegre Nano Yapı Kontrol Prosesi (Integrated Nanostructure Control Proses) ismi ile geliştirilmiş benzer yeni teknikler şu özelliklere sahip alüminyum köpük üretimini taahhüt etmektedir;

- Tam olarak belirlenmemiş gözenek boyutu

- Homojen gözenek yapısı
- Tekrar üretilebilir ve kararlı kalite

Böylece, köpük malzemeler otomotiv, transport, askeri, yapı ve havacılık gibi geniş bir alanda tahmin edilebilir performans ile özelleştirilen çözümler sunabilirler.

Bu proses kararlı üniform kapalı-hücre çıktısı oluşturabilmek için nano teknolojiyi kullanmaktadır. Entegre edilmiş nano yapı kontrolü, farklı boyutlarda fakat homojen hücre ölçüleri elde etmeye imkân veren bir prostestir. Farklı ölçüdeki hücrelerin anlamı, köpük metal özelleştirilebilir çünkü köpük metalin özellikleri büyük ölçüde gözenek/hücre boyutuna bağlıdır. Böylece istenilen özellikler portföyü, yoğunluk değiştirerek elde edilebilir. Bu da, köpük metali çeşitli uygulamalar için çok uygun yapar. Çünkü hücre ölçüleri kontrol edilebilir, köpük metal kullanılan uygulamalar test edilip ölçülebilir, araç güvenliği gibi kritik olan konularda tahmin edilebilir çıktılar sunabilir. Nano teknoloji, genelde 1-100 nanometre içerisindeki malzeme kullanımını içeren proses ya da ürünleri tarif eder. (Örneğin, kırmızı kan hücresi 7,000 nanometre genişliğindedir.) Her hücre ya da baloncuk Entegre Nano Yapı Kontrol işlemi sırasında elde edilen gazdan oluşan oksit tabaka yüzey ile korunur. Bu oksit tabaka 10-90 nm kalınlığındadır ve hücrelerin stabilitesini korumak için kritiktir (Baron, 2007).



Şekil 1.10 - Alüminyum Köpük Malzemenin Plato Stresi ve Sıkışma Eğrisi (Ashby 2000)

Köpük malzemeler plato stresi özelliği gösteren sıkışabilir malzemelerdir. Böylece üzerlerine gelen yükü, darbe enerjisini plastik deformasyona, şekil değiştirmeye dönüştürerek sönümlerler. (Şekil 1.10). Plato stresi özelliği malzemenin aldığı yük ile deforme olması ve yoğunlaşmaya kadar Gerilme (δ) - Uzama (ϵ) diyagramında yatay bir eğri oluşturması anlamına gelmektedir. Böylece absorbe ettiği enerji miktarı önemli ölçüde artmaktadır. Dolu malzemeler (Al, çelik, vb) sıkıştırıldığında bu özelliği göstermezler. Çeliğin özgül ağırlığı $7,8\text{g/cm}^3$, alüminyumun $2,7\text{g/cm}^3$, alüminyum köpük metalin ise $0,4-1\text{ g/cm}^3$ tür (Ashby 2000).

Köpük malzemelerin genel özellikleri:

- Ultra düşük yoğunluk
- Yüksek mukavemet
- Darbe enerjisini sönümlenemeyebilme yeteneğini
- Düşük termal iletkenlik
- Düşük manyetik geçirgenlik
- İyi vibrasyon geçirgenlik
- Ses sönümleme
- Elektro manyetik koruma (Ashby 2000).

1.1.1. Darbe Enerjisini Sönümlenemeyebilme Yeteneğini



Şekil 1.11 - Köpük Metallerin Çarpma Testlerinde Darbe Sönümleyici Olarak Kullanımı (Alulight 2006)

Yolcu ve yük taşıma araçlarında ön planda olan bu özellik herhangi bir çarpışma esnasında ani darbe etkisi ile oluşan büyük miktarda enerjinin sönümlenmesini ifade eder. Alüminyum köpük malzemeler içerisinde bulunan içi hava dolu çok sayıda gözenek ortaya çıkan bu darbe enerji etkisi ile şekil değiştirmeye ve büzölmeye başlar. Alüminyum, plastik tabanlı köpük malzemelere göre çok daha mukavim bir malzeme olduğu için aynı şiddetteki enerjiyi sönümlemek için 5-6 kat daha ince malzeme kullanımı yeterlidir. Plastik deformasyon enerjisi böylece darbe enerjisine dönüştürölerek, zarara sebep olabilecek etkiler ortadan kaldırılır. Şekil 1.11' de görüldüğü şekilde çarpışma testleri ile bu özellik otomotiv üreticileri tarafından incelenmektedir. Mükemmel darbe sönümleme özellikleri nedeniyle alüminyum köpükleri şimdiden, birçok otomotiv üreticisi tarafından, tampon bölgelerine yerleştirilerek kullanılmaya başlanmıştır (Amsterdam 2005).

Çizelge 1.1. - Bazı Malzemelerin Özellikleri (Alulight 2006)

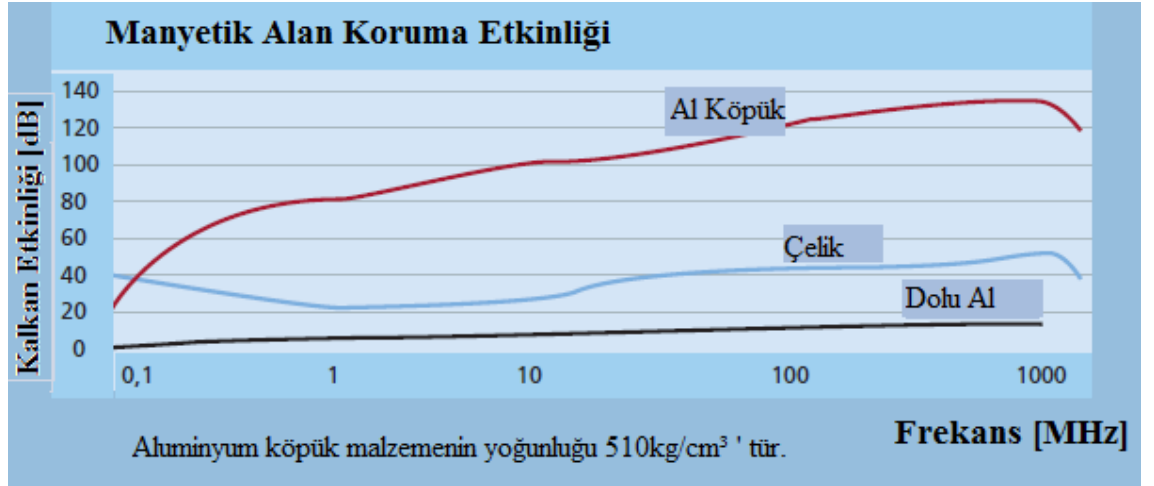
MALZEME	YOĞUNLUK [kg/m ³]	Elastisite Modülü [GPa]	E/ρ² [10 ⁻⁵ GPa.kg ² /m ⁶]
Aluminyum köpük malzeme	500	5	2
Epoksi	1300	3	0,3
Çelik	7800	210	0,4
Aluminyum	2700	69	1
Cam	2500	70	1,1
Beton	2500	50	0,8

Köpük malzemenin elastisite modülü diğer malzemeler gibi gerilme şekil değiştirme eğrisinin eğiminden elde edilemez. Bunun nedeni gerilmenin ilk fazlarından itibaren plastik şekil değişikliği oluşturmasıdır. Bundan dolayı elastik vibrasyon yükleme daha uygun bir metottür. Çubuk şekilli numune uzun eksen boyunca bir darbe çekici ile salınım yaptırılır. Test için farklı yoğunlukta ve farklı temel alaşım kompozisyonlarında

çubuk şekilli örnekler kullanılır. Örneğin 17 mm çapında ve minimum 300 mm uzunluğunda numuneler.

1.1.2. Elektromanyetik Kalkan

Elektromanyetik dalgalar, çeşitli elektronik aletlerde bozukluklara sebep olabilir. Aynı zamanda insan sağlığı için olan negatif etkileri de incelenmektedir. Elektromanyetik dalga koruması, elektronik aletleri ve iç mekanları elektromanyetik dalgalardan korumak için kullanılmalıdır. Şekil 1.12’ de alüminyum köpük, çelik ve dolu alüminyum malzemelerin manyetik alan etkinlikleri karşılaştırılmıştır. KEC test metodu (KVAR Energy Controller) ile elektrik ve manyetik koruma testi yapılmış olan köpük malzemeler, dolu malzeme çelik ve alüminyuma göre özellikle yüksek frekansta önemli avantajlar sağlamışlardır (Şekil 1.12). KEC elektromanyetik yük faktörü optimizasyon cihazıdır. Motorun İndüktif sargılarının etrafında elektromanyetik alan oluşturmak için reaktif gücü depolar. Motor çalıştığında, reaktif güç KEC’den motor ile saniyede 60 kez itilir ve çekilir (Alulight 2006).

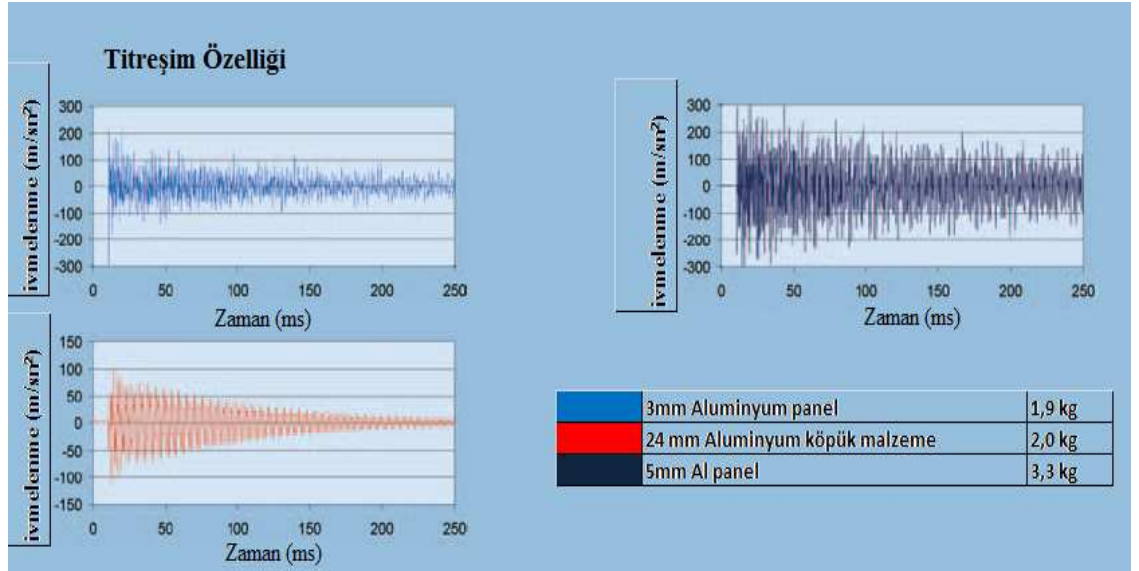


Şekil 1.12 - Aynı Ağırlıkta Numuneler İçin Frekansın Bir Fonksiyonu Olarak Manyetik Alan Koruma Etkinliği (Alulight 2006)

1.1.3. Titreşim Sönümlenme

Titreşim sönümlenme bir diğer önemli özelliktir. Yapısal sönümlenme, malzemenin titreşim enerjisini ısıya dönüştürerek iç sürtünmenin bir etkisi ile sönümlenmesidir. Şekil 1.13' de farklı kalınlıklarda alüminyum sac paneller ile alüminyum köpük malzemenin titreşim sönümlenme yetenekleri karşılaştırılmıştır. Alüminyum köpük malzemeler aşırı sesi ve titreşimi ısıya dönüştürerek azaltır ve bu ısıyı etrafında çevrili olan alana yayar. Hücresel yapıdaki titreşim enerjisi, gözenekleri ayıran ince duvarların hafif plastik deformasyonu ile dağıtılır. Ayrıca bu titreşim, hücre duvarlarında oluşan çatlak yüzeyleri arasındaki sürtünme ile de azalır (Ashby 2000, Alulight 2006).

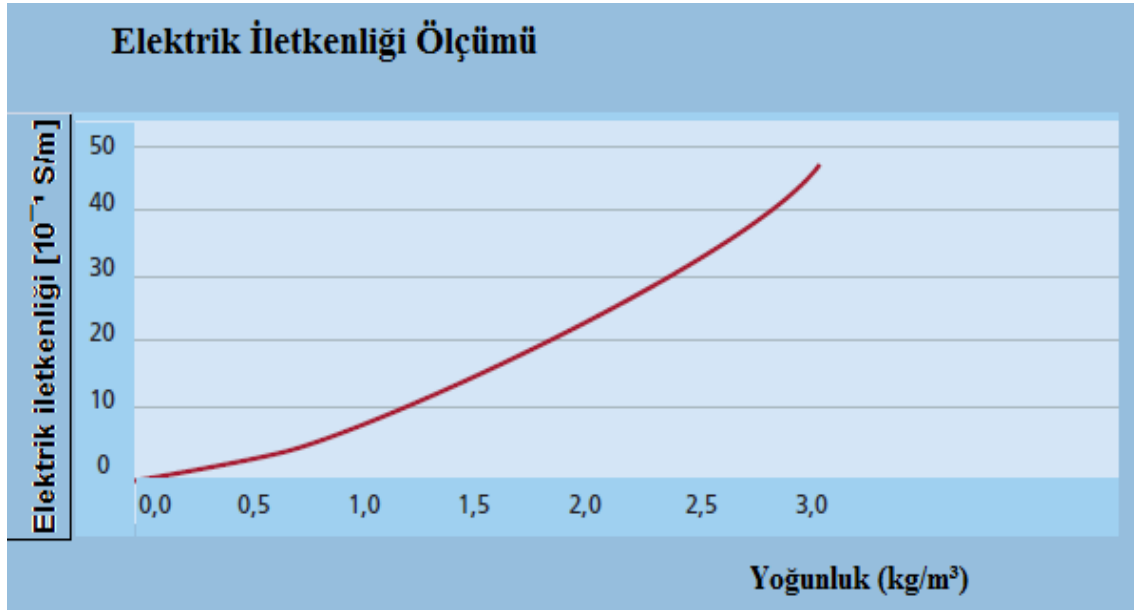
Mekanik titreşimden etkilenen farklı amaçlar için kullanılan dişli kutuları ya da kapakları ve sönümlenme malzemeleri bu alan için önemli kullanım alanlarıdır.



Şekil 1.13 - Zaman Yüzey İvmelenme İlişkisi, Vibrasyonu Sönümlenme Yeteneği (Alulight 2006)

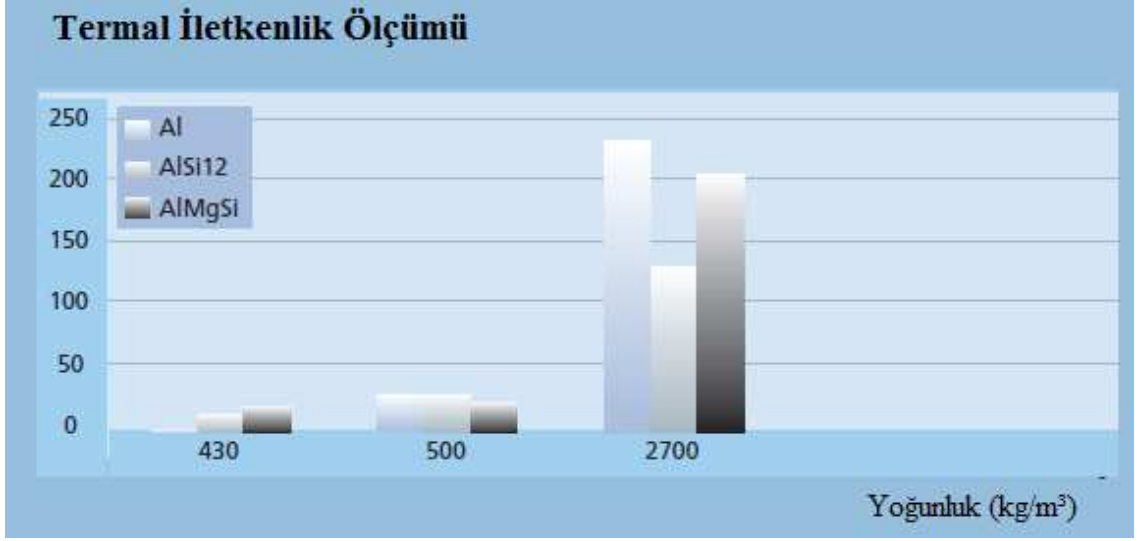
1.1.4. Termal ve Elektrik İletkenlik

Köpük metal malzemenin kesit alanının sadece küçük bir kısmı iletkenidir. Bunlar temel alaşım elemanının iletkenlik değerini taşıyan hücre duvarlarıdır. Hücre duvarları sürekli olarak iletken olmayan alumina ile kaplıdır. Kesit alanının önemli bir bölümü gözeneklerin içerisinde bulunan iletken olmayan havadan oluşur. Bundan dolayı köpük malzemeler dolu malzemelerden çok daha az iletkenliğe sahiptirler (Hutzler 1997, Ashby 2000).



Şekil 1.14 - Yoğunluğa Bağlı Elektrik İletkenliği (Alulight 2006)

Elektrik iletkenliği, köpük metalin yoğunluğu ile azalır. Köpük malzemenin elektrik iletkenliği yoğunluğun bir fonksiyonu olarak nonlineerdir. Şekil 1.14 ve Şekil 1.15' de yoğunluğa bağlı olarak malzemelerin elektrik ve termal iletkenlikleri verilmiştir.



Şekil 1.15 - Temel Alaşım Elemanı ve Yoğunluğa Bağlı Termal İletkenlik (Alulight 2006)

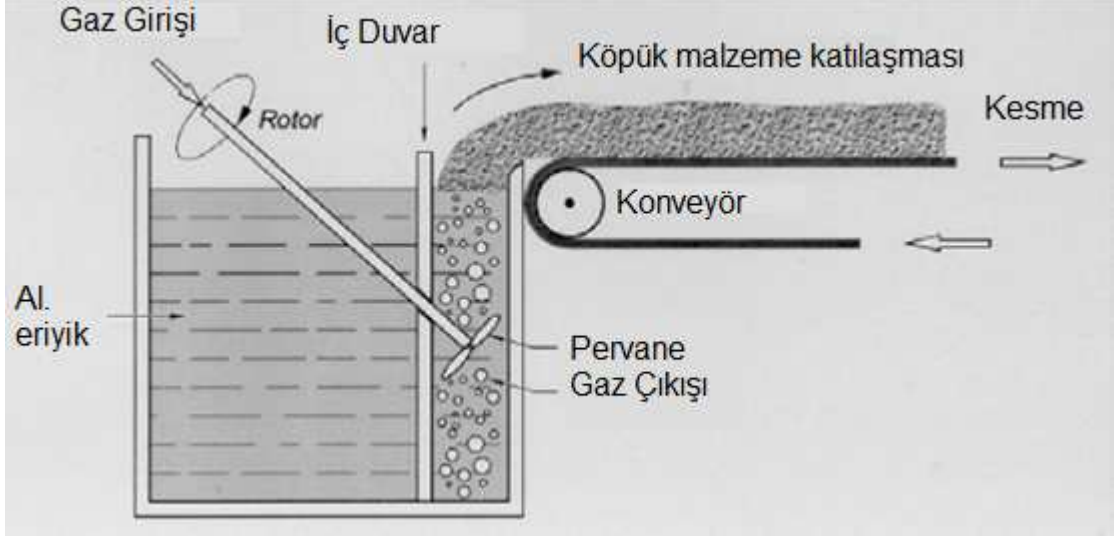
Termal iletkenlik de köpük malzemelerde dolu malzemelere göre yüzey alanı azaldığı için düşüktür. Bu özelliklerin (termal / elektrik iletkenliği) ön planda olduğu uygulamalar; geri dönüşümlü ısı kalkanları, elektromanyetik ve darbe sönümleyicilerin önemli olduğu elektronik aletler için kutulardır.

1.2. Köpük Malzeme Üretimi

Alüminyum köpük metal üretmek için iki temel strateji vardır: Direkt ve endirekt köpürtme.

1.2.1. Direkt Köpürtme

Direkt köpürtme, uniform olarak dağıtılmış partiküller içeren erimiş metalin içine gaz enjekte edilerek köpük oluşturulması şeklindedir. Alternatif olarak, daha sonra ayrılan ve aynı köpürme özelliği gösteren titanyum hidrür ilave edilebilir.



Şekil 1.16 - Direkt Köpürtme Yöntemi

Genel üretim sistematığı şu şekildedir;

- Alaşımın ergitilmesi
- Alaşımın köpürebilir yapılması
- Gaz baloncuklarının oluşturulması
- Köpüklerin toplanması
- Köpüklerin katılaştırılması

Direk köpürtmede silisyum karbür, alüminyum oksit ve diğer seramik partiküller alüminyum alaşımları köpürebilirliğe uygun hale getirmek için kullanılabilirler. Gaz enjeksiyonu sırasında gaz baloncukları köpüğün yüzeyine çıkarlar. Eriyik içinde bulunan partiküller (SiC, Al₂O₃...) yükselen kabarcıklarla tutulurlar, toplanırlar. Metal gaz ara yüzü oluştururlar ve baloncuklar yüzeye ulaştığında patlamalarını önlerler. Bir konveyör kayış tarafından toplanabilecek bir köpük tabakası oluşur. Alternatif olarak da, köpük soğuyup katılaşabileceği bir kalıba yönlendirilir (Şekil 1.16) (Körner 2005).

Alüminyum ya da alüminyum alaşımları gaz enjekte ederek köpürtme zaten ticari alanda kullanımı olan bir yöntemdir. Silisyum karbür, alüminyum oksit yada magnezyum oksit partikülleri köpük stabilitesini arttırmak için kullanılırlar ve alaşımı

köpürebilir yaparlar. Kuvvetlendirme partikülleri oranı %10-20 arası değişir. Gaz enjektisi (genelde hava) özel tasarlanmış dönen pervanelerle ya da titreyen nozullarla yapılır. Oluşan köpük oradan bir konveyörle çekilebilecek bir bölge olan üst yüzeyde toplanır ve hızlı şekilde soğutulur. Bu üretim şeklinin avantajı yüksek hacimli üretimlerin yapılabilmesi ve düşük yoğunluğun elde edilebilmesidir. Geliştirilen yeni konseptte gaz enjekte edilmesi yöntemindeki yenilik ile hücre boyutlarında mükemmel uniformluk sağlanmaktadır. Alüminyum metal köpük, hücre yüzeylerindeki nano ölçekli oksit tabakasını ayarlayarak ve viskozitesi, dolayısıyla baloncuk boyutunu kontrol eden küçük ölçekte partikülleri erimiş alüminyum içine ilave ederek uniform şekilde tutulur. Ayrıca, köpüğü kalıplara dökerek dışı kapalı kabuk şeklinde 3 boyutlu kompleks parçalarda üretilebilir (Degischer 2002, Garcia-Moreno 2005).

1.2.2. Endirekt Köpürtme

Ön malzeme (precursor) tabanlı endirekt köpürtme, içerisinde patlayan partiküller bulunduran metale ısı işlem uygulamasını ifade eder (Şekil 1.17). Köpüren ön malzeme bir çok farklı yöntemle üretilebilir.

Yöntem 1: Alüminyum tozunu ve titanyum hidrür malzemesini karıştırarak ve bu karışımı sıcak pres enjeksiyon ya da toz haddeleme gibi yöntemlerle yoğun bir ön malzemeye sıkıştırarak elde edilir. Eğer alaşımlı köpük isteniyorsa, toz halindeki alaşım elemanları karışıma ilave edilmelidir.

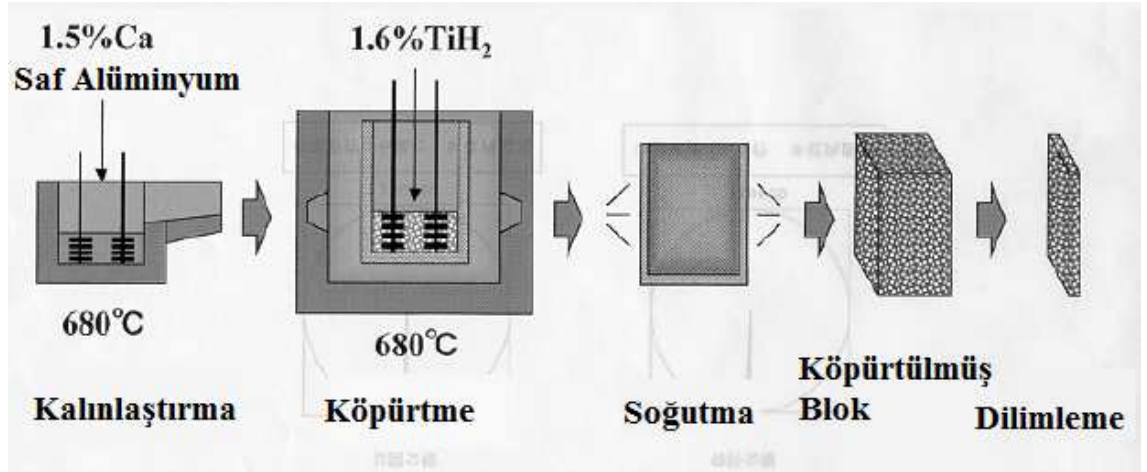
Yöntem 2: Patlayan partikülleri eriyik haldeki alüminyum alaşımına ilave ederek ve daha sonra soğutarak ön malzeme elde edilir. Bu işlem kalıp döküm makinesinde yada standart bir potada gerçekleştirilebilir. Fakat patlayan partiküllerin tozları, önceden ayrışmalarını engellemek için ön ısıtmaya tabi tutulmalıdır.

Yöntem 3: Sıvı alüminyum üreterek ve ajanların karışım içerisinde çökmesine imkan vererek ön malzeme elde edilebilir (Banhart 2006).

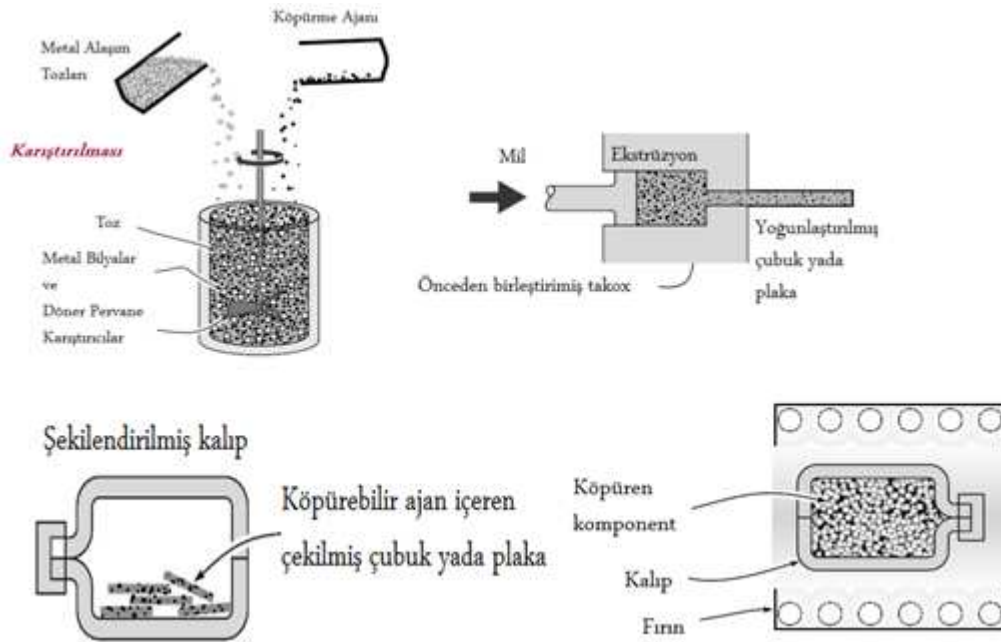
Endirekt köpürtme yöntemi katı ön malzeme üretimi ile başlar. Üniform olarak dağıtılmış genelde titanyum hidrür olan köpürme partikülleri içeren alüminyum matriks yapılı katı ön malzeme üretilmesinde şu aşamalar izlenir (Şekil 1.17, 1.18).

- Köpürebilir ön karışımın hazırlanması

- Bu ön malzemenin ergitilmesi
- Köpük oluşturulması
- Köpüğün katılaştırılması



Şekil 1.17 - Endirekt Köpürtme Yöntemi (Ashby 2000)



Şekil 1.18 - Alternatif Endirekt Köpürtme Yöntemi (Baron 2007)

Endirekt köpürtme metotlarına dayalı köpük üretimi genelde düşük ölçekli ticari kullanımı olan firmalar tarafından uygulanmaktadır.

1.2.3. Köpürtme Önmalzemesi Üretimi

Köpürtme ön malzemesi birçok şekilde üretilebilir. Alüminyum tozlarını ve titanyum hidrürü karıştırarak ve bu karışımı örneğin sıcak presleme ya da ekstrüzyon ile daha yoğun hale gelecek şekilde birleştirerek elde edilir. Eğer alaşımlı köpük isteniyorsa toz halinde iken metaller sırası ile karışıma ilave edilir. Toz karışım ön sıkıştırma ile çubuk şekline getirilir. Daha sonra bu çubuklar ısıtılarak yarı katı hale getirilir ve şekilli ön malzeme üretilir (Banhart 2007).

1.2.4. Üretim Parametreleri

Toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum bazlı metalik köpüğün üretilmesi için önemli üretim parametreleri; köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi, köpürtücü madde miktarıdır. Endirekt köpürtme yönteminde alüminyum ve titanyum hidrür (TiH_2) tozları değişik oranlarda karıştırılarak kalıp içerisinde sabit basınç altında (300 MPa) preslenerek tabletler haline getirilir. Elde edilen tabletlere fırın 350 °C' de ön ısıtma yapılır. Daha sonra numuneler 680 °C ve 700 °C' de değişik köpürtme sürelerinde köpürtme işlemine tabi tutularak kendi haline atmosferik ortamda soğumaya bırakılır. Isıtma süresince TiH_2 ayrışarak hidrojen gazı açığa çıkmaktadır. Alüminyumun gözenekli bir yapı halini alır (Türker 2009).

Toz metalürjisi yöntemi en çok kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Genel olarak üretimin işleyiş süreci şu şekildedir. Yaklaşık 50 µm boyutlarındaki alüminyum tozları ile köpürme işlemi sağlayacak titanyum hidrür tozları karıştırılır. Soğuk ve sıcak preste yüksek basınç altında ve köpürmeye hazır numune elde edilir. Son aşamada da 750°C sıcaklıkta bu numune köpürtülür. Köpürmeyi sağlayan 500 °C' den itibaren hidrojeni açığa çıkaran titanyum hidrür tozlarıdır. Sonrasından soğutma işlemi yapılır ve gözenek yapılı köpük malzeme elde edilir (Çinici 2004, Ashby 2000).

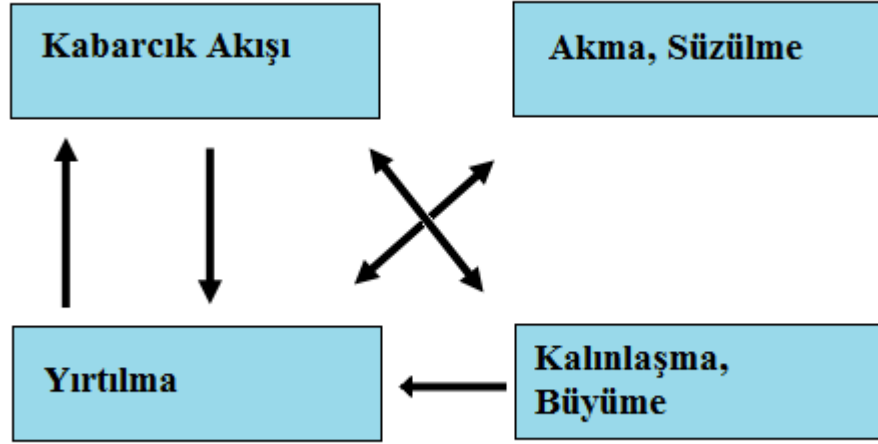
1.2.5. Köpüğün Stabilesi

Köpük oluşumu esnasında farklı kuvvetler köpük üzerine etki ederler. Bu kuvvetler aralarındaki ilişkiler oluşan köpüğün bazı karakteristik özelliklerini belirler.

Köpüğe etkiyen kuvvetler

- Yer çekimi
- Dış atmosferik ve iç gaz basıncı
- Mekanik kuvvetler
- Metalik faz içerisindeki kuvvetler; yüzey gerilimi, kılcak kuvvetler vs.

Bu kuvvetlerdeki herhangi bir dengesizlik köpüğün hareketine neden olur. Köpük morfolojisindeki değişiklikler aşağıdaki şekilde verilen Şekil 1.19 düzenine göre sınıflandırılabilirler.



Şekil 1.19 - Köpüğün Stabilitesini Sınırlayan Farklı Etkiler

Akış, dış kuvvetler ya da köpürme esnasında iç gaz basıncındaki değişimler nedeniyle kabarcıkların birbirine göre hareketidir.

Akma, süzülme, sıvı metalin plato sınırlarına (üç köpük filminin kesişimi) kılcak kuvvetler ve yerçekimi etkisiyle akmasıdır.

Yırtılma, kopma, kırılma, çatlak ya da yapışma tabaka içerisinde oluşan ani bir tutarsızlıktır ve tabakanın kaybolması ile sonuçlanır.

Kalınlaşmak, basınç farkından dolayı küçük baloncuklardan büyüklere doğru yavaş bir gaz difüzyonudur.

Etkiler net olarak bağımsızdır. Köpük büyürken kabarcık akışı örneğin, hücre yırtılmalarını tetikleyebilir. Süzülme tabakaların incelmeye ve yırtılmasına neden olabilir. Metal köpükler üzerine çalışmalar, şeffaf olmadıkları, yüksek proses sıcaklıklarında oluştukları ve sıvı metallerin kimyasal reaktiviteleri nedeniyle oldukça zordur.

1.3. İkincil İşlemler

Kullanım sahası günden güne artan köpük malzemeler için diğer bir önemli nokta ön plana çıkmaktadır, ikincil işlemlerdir. Karmaşık geometrik şekillerin oluşturulmasında her zaman istenilen şekilde parçayı kalıplamak yöntemi ile üretmek mümkün değildir. Ayrıca bu pahalı bir yöntemdir. Kalıpla döküm yöntemi sonrası elde edilen parça üzerinde bazı değişiklikler, bağlantılı eklemeler yapmak, cıvata bağlantısı mümkün olmadığı sürece son derece zordur. Arzu edilen şekillerin standart üretilen köpük malzemelerden, kesme, delme, talaşlı imalat, yapıştırma, kaynak, cıvata ile birleştirme gibi yöntemlerle oluşturulabilmesi yada işlenmesi gerekir. Aksi halde bu malzemelerin yaygınlaşması söz konusu değildir.

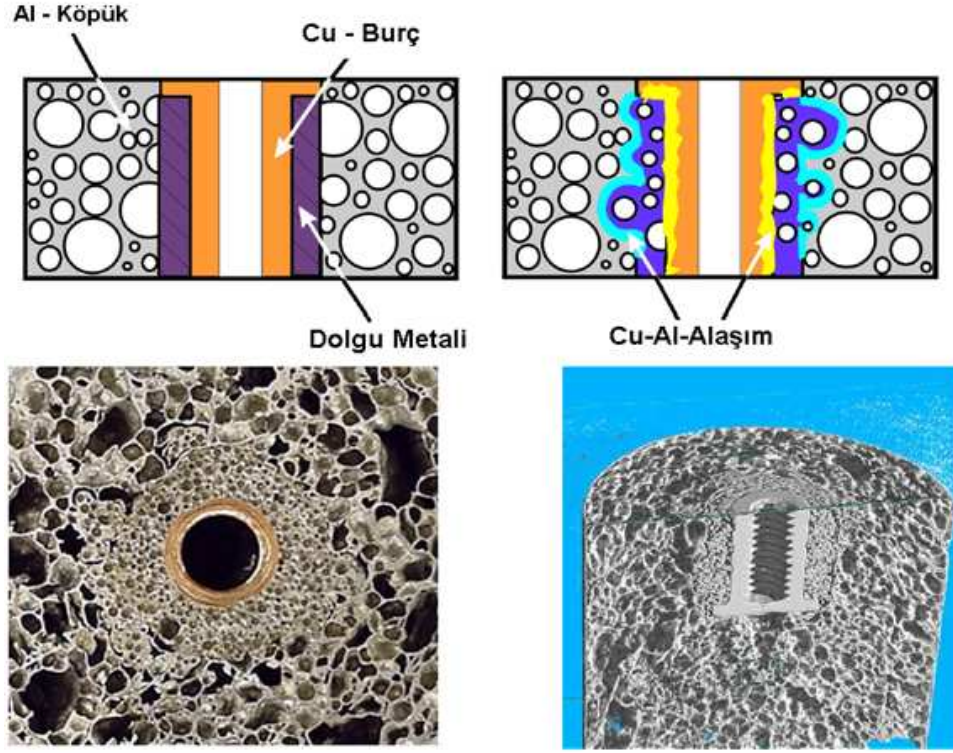
Köpük malzemenin sahip olduğu bazı özellikler üretim sonrası ikincil işlemler için bu malzemeleri pek uygun kılmazlar. Başlıca nedenleri;

- Yapının sıkıştırılabilir olması nedeniyle form vermeye ve işleme çok müsait değildir.
- Çekme gerilmesine olan yüksek hassasiyeti nedeniyle şekillendirme zordur.
- Hücre duvarlarında ve yüzey tabakadaki hatalar nedeniyle kaplama işlemi zordur.
- Dış yüzey genelde oksit tabakası ile kaplıdır ve bu nedenle kaplama, lehimleme ve kaynak zordur.
- Eriyik stabilizatörü olan seramik partiküllerin varlığı nedeniyle talaşlı imalat zordur.

1.3.1. Cıvata Bağlantısı

Metalik köpük malzemeler genelde karmaşık tasarımlara entegre edilmeleri gerekir. Birbirleriyle ya da dolu malzemelerde ve parçalarla uygun teknikler kullanılarak birleştirilmek zorundadırlar. Birbirinden farklı, bilinen bağlama teknolojileri vardır; mekanik bağlantı, lehim, kaynak ve köpüğün üretimi esnasında içine konulan bağlama elemanları kullanılarak.

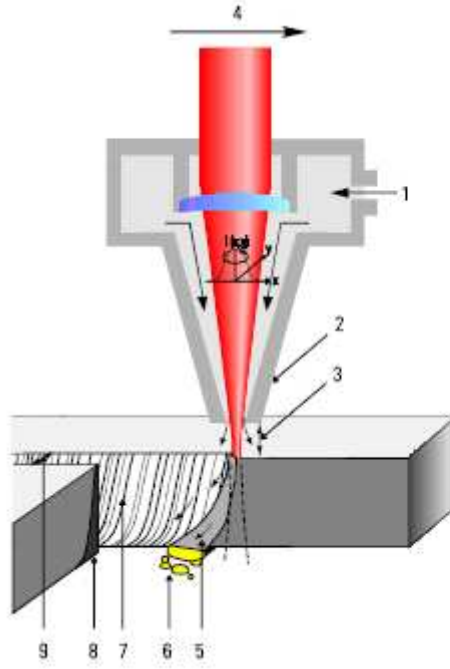
Dortmund Üniversitesinde malzeme mühendisliği enstitüsünde, Prof. Dr. Bach ve ark. özel bir prosedür geliştirdiler. İstenilen birleştirmenin özelliklerinin metal köpüğün özelliklerine eşit olması, birleşmenin bu iki metal köpük arasındaki ara yüzde katılaşması ile elde edilebilir. Geliştirilmiş olan bu teknikte köpürebilir dolgu malzemesi kullanılıyor. Bu dolgu metalinin ergime noktası birleştirilecek elemanlardan daha düşük toz alaşımdan oluşmaktadır. Köpük üretimi esnasında bağlantı elemanlarını köpük malzeme içine yerleştirmek karmaşık ve istenilen kaliteyi garanti etmeyen bir yöntemdir. Bunun alternatifi bir yöntem, bağlantı elemanlarını hazır köpük malzemelerin içine köpürebilir dolgu metal kullanarak yerleştirmektir. Birleştirilen komponentler fırında ısıtılır yada lokal olarak ısıtılır ve bitmiş bir bağlantı elde edilir (Bach ve ark. 2002)(Şekil1.20).



Şekil 1.20. - Köpürebilir Dolgu ile Cıvata Bağlantısı

1.3.2. Lazer Kesme

“Laser “ kelimesi “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” (Uyarılmış Radyasyon Yayımı ile Arttırılmış Işık) kelimelerinin baş harflerinden oluşan bir kısaltmadır. Lazer kesme işlemi kesici takım olarak lazer ışınının kullanıldığı, malzeme üzerine herhangi bir mekanik yük tesir etmeyen, 20 mm çapındaki bir lazer ışınının odaklanarak, 0.1 - 0.2 mm çapa indirgenmesi ile elde edilen yüksek güç ($\sim 10^6$ Watt/cm²) etkisiyle malzemeyi ergiterek + yakarak kesen bir termal kesme işlemidir (Şekil 1.21).



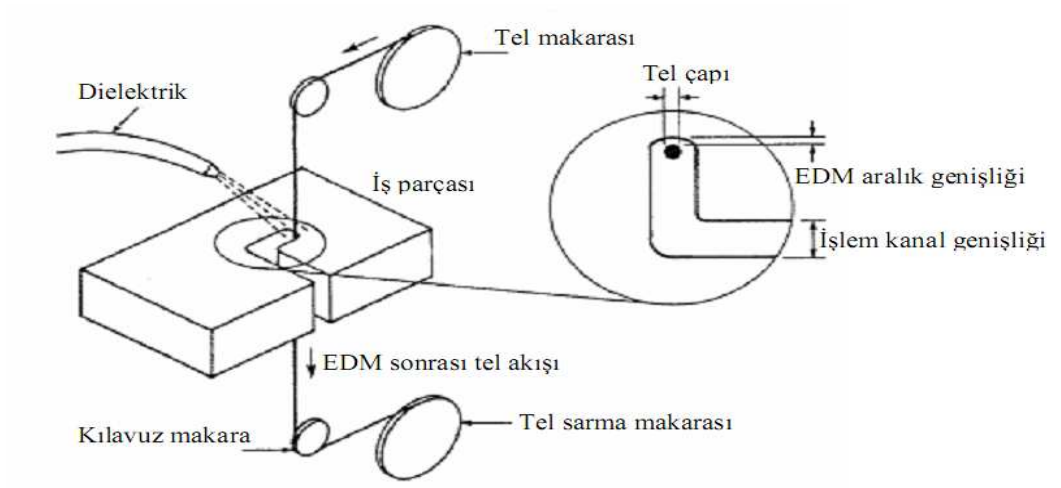
- 1 Kullanılan gaz
- 2 Nozul
- 3 Nozul ile kesilen parça arası mesafe
- 4 Kesim hızı
- 5 Ergimiş madde
- 6 Cüruf
- 7 Kesim esnasında oluşan oluklar
- 8 Isıdan dolayı etkilenen bölge
- 9 Kerf bölgesi

Şekil 1.21. - Lazer Kesme İşleminin Şematik Gösterimi

1.3.3. Tel Erozyonla Kesim (EDM)

Tel Erozyonu, dielektrik sıvı ortamında tel elektrot ve iş parçası arasında meydana gelen ardışık kıvılcımlarla malzemeden talaş kaldırılan elektro-termal bir yöntemdir. Tel Erozyon yöntemiyle kesme işleminin mekaniği, dielektrik sıvı ortamında şiddetli elektron çarpışmaları, yüksek basınç ve ısı gibi faktörlerin de etkisiyle oldukça karmaşık ilişkiler kombinasyonuna dayanmaktadır.

Günümüzde genellikle CNC kontrollü ve çok eksenli tel erozyon tezgahları kullanılmaktadır. Bu tezgahlarda genellikle çapı 0.076 – 0.4 mm arasında değişen pirinç, molibden, tungsten ve bakır teller kullanılmaktadır. Takım elektrotu olan tel, bir makaradan beslenmekte ve iş parçası boyunca hareket etmektedir (Şekil 1.22). İşlem anında uygulama voltajına bağlı olarak, yalıtkan bir sıvı içerisinde (su, gazyağı veya diğer hidrokarbonlar) bulunan iş parçası ve tel arasında seri kıvılcımlar oluşturulmakta, talaş kaldırma oranı her bir kıvılcımdaki enerji miktarına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 1.22. - Tel Erozyonda Kesim İşleminin Şematik Gösterimi

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kullanılan Malzeme

Deney numunesi olarak Alulight ve Alporas firmalarından tedarik edilen iki farklı tipte alüminyum esaslı köpük malzeme kullanılmıştır.

- Kapalı hücre yapılı 10 mm kalınlığında alüminyum köpük metal (AlMgSi).

Yoğunluk; $\rho=500 \text{ gr/cm}^3$, Elastisite Modülü; $E=5 \text{ GPa}$, $E/\rho^2= 10^{-5} \text{ GPa.kg}^2/\text{m}^6$

- 1,2 mm lik alüminyum alaşım plakalar arasına köpük malzeme dökülerek elde edilen toplam 19 mm kalınlığındaki sandviç yapılı köpük malzeme (AlMgSi).

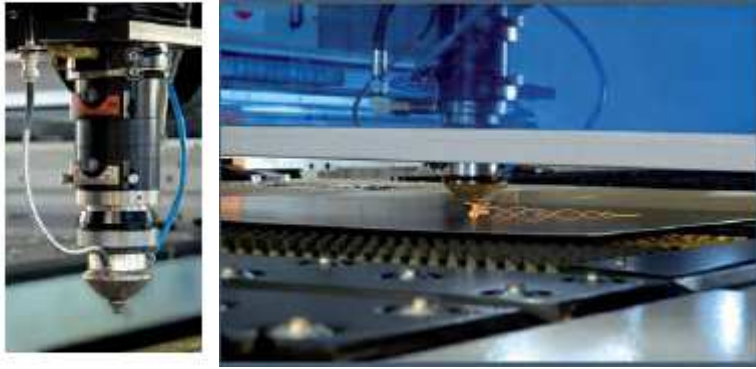
2.2. Lazerle Kesme Deneyi

Lazer kesme işlemi kullanım alanlarına ve oluşan lazer ışın yapısına göre farklılıklar gösterir. Örneğin, kaynak yapmak için oluşturan lazer ışını ile, kalıp yüzeylerinde oluşan empürite ve kirliliklerin temizlenmesi yada tıp alanında kullanılan lazer operasyonları ile sac kesme için kullanılan lazer işlemleri temel parametreler dışında büyük farklılıklar gösterirler. Örneğin oluşan ışının dalga boyları, oluşum yöntemleri aynı değildir. Sanayide sac kesme işlemleri için yirmi yılı aşkın süredir kullanılan CO₂ lazeri, kaynak için ise YAG lazer kullanılmaktadır. Son yıllarda iletişim teknolojisinin gelişime paralel gelişen fiber lazerler de maliyeti nisbi olarak yüksek de olsa yüksek verimliliği sayesinde işletmelerde kullanıma başlanmıştır. Lazer kesme ile çelik, nikel alaşımları, titanyum, krom, paslanmaz çelik, alüminyum ve alaşımları vb. malzemelerin kesme işlemleri yapılabilmektedir. Lazer kesmenin önemli avantajları ise; kesme kalıp ve aparatı gerekmez, kesme hızı yüksektir, iş parçası kesme yüzeyi pürüzsüzdür, daha ucuza maliyet sağlanmaktadır, küçük bir nokta şeklinde yüksek yoğunluklu lazer ışını oluşmaktadır ve ısının etkilediği alan hızlı soğuma nedeniyle minimum düzeydedir.

CO₂ lazer kesme işleminde kesici takım olarak lazer ışının kullanılır. Malzeme üzerine herhangi bir mekanik yük tesir etmeyen, yaklaşık 20mm çapındaki bir lazer ışının odaklanarak 0,1-0,2 mm çapa indirgenmesi ile elde edilen yüksek güç ($\sim 10 \times 10^6$

Watt/cm²) etkisiyle malzemeyi ergiterek ve yakarak kesilir. Yardımcı gaz olarak normal çeliklerde oksijen kullanılır. Çünkü yüksek ısı nedeniyle oluşan yanma reaksiyonunda enerjinin büyük kısmı (%70) oksijenden sağlanır. Bu ekzotermik bir reaksiyondur. Fakat kesme kalitesi ön planda olduğunda (yanma sonucu oluşan oksitler, vs) ve/veya ekzotermik reaksiyon oluşmadığı durumlarda yardımcı gaz olarak azot kullanılmaktadır. Bu durumda ise reaksiyondan ilave bir enerji eldesi mümkün olmadığı için daha fazla güce ihtiyaç vardır. Çünkü tüm enerji odaklanmış lazer ışımından sağlanır. Azot reaksiyona girmeyen inert bir gazdır. Böylece kesme işlemi sadece malzemenin yüksek sıcaklıkta ergimesi esasına göre gerçekleşir.

10 mm kalınlığında kapalı hücre yapılı köpük malzemenin belli parametrelerle lazer kesme denemesi yapılmıştır. CO₂ lazer kesme işlemi uygulanmış ve Durma Hibrid marka, 3,3 kW maksimum gücünde CNC lazer kesme makinesi kullanılmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. - Hibrid CO₂ Lazer Kesme Makinesi

Lazerle kesme işleminde kesme kalitesini belirleyen bazı parametreler vardır. Bunlar; Kesme Hızı (V), Gaz Tipi (G), Gaz Basıncı (P), Kesme Gücü (W) , Odak mesafesi (f), Nozul Çapı (d), Nozul-Sac arası mesafe (h).

Kesme denemelerinde nozul çapı, odak mesafesi, gaz tipi, nozul-sac mesafesi etkilerinin göz ardı edilebileceği için sabit tutulmuştur. Çünkü gaz tipi malzemeye ve istediğiniz kesme şekline göre belirlenen bir parametredir. Alüminyum malzeme kesimlerinde oksijen reaksiyonunun kontrol zorluğu ve kesim kalitesi nedeniyle azot gazı tercih edilir. Nozul çapı, malzeme kalınlığı ile ilgili bir parametredir. Belirli kesme kalınlıklarında ortaya çıkan cürufun atılması ve istenilen gaz akışı için belirli nozul

çapı değerleri mevcuttur. Son olarak nozul-sac mesafesi ise lazer ışının odaklanmasını istediğiniz noktayı belirler ki bu lens seçimi sonrası belirli olan odak noktasının malzemenin hangi bölgesine odaklayacağını ile ilgilidir. Azot ile kesimlerde lazer enerjisini kullanıp bir egzotermik reaksiyon oluşturulmadığı için lazer ışını malzemenin alt yüzeyine odaklanır. Kesim yöntemi ve malzeme tipine göre sabit kabul edilen bu parametre değerleri dışında kesme hızı, gaz basıncı ve güç temel değişken parametreler olarak dikkate alınmıştır. Toplam 3 farklı parametre kombinasyonu ile kesme denemeleri gerçekleştirilmiş ve karşılaştırma kriterleri olarak kesme hızı ve yüzey kalitesi dikkate alınmıştır. Yüksek kesme hızı değeri ile prosesin tamamlanmaması ve düşük kesme hızı ile de aşırı yanma ve eriyiğin ortamdaki uzaklaştırılmaması şeklinde oluşan sorunlar güç ve basınç parametreleri ile optimize edilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 2.1. - Lazer Kesim Parametreleri

PARAMETRELER	KESİM 1	KESİM 2	KESİM 3
NOZUL ÇAPI (mm)	1	1	1
GAZ TİPİ	N ₂	N ₂	N ₂
NOZUL - SAC MESAFESİ (mm)	1	1	1
ODAK MESAFESİ (mm)	5	5	5
KESME HIZI (mm/dak)	5000	1000	3000
KESME GÜCÜ (W)	3300	3000	3000
KESME BASINCI (Bar)	16	17	15

Lazer Kesim 1: Kesme Parametreleri

Nozul Çapı: 1mm Gaz Tipi: Azot, N₂ Nozul-saç arası mesafe:1mm Lens : 5"

Kesme Hızı: 5m/dk Kesme Gücü: 3,3 kW Kesme Basıncı: 16 Bar



Şekil 2.2. - Lazerle Kesim Sonucu (Kesim 1)



Şekil 2.3. - Lazerle Kesim Sonucu (Kesim 1.1)

Lazer Kesim 2: Kesme Parametreleri

Nozul Çapı: 1mm Gaz Tipi: Azot, N₂ Nozul-saç arası mesafe:1mm Lens : 5"

Kesme Hızı: 3m/dk Kesme Gücü: 3 kW Kesme Basıncı: 16 Bar



Şekil 2.4. - Lazerle Kesim Sonucu (Kesim 2)



Şekil 2.5. - Lazerle Kesim Sonucu (Lazer Kesim 2.1)

Lazer Kesim 3: Kesme Parametreleri

Nozul Çapı: 1mm Gaz Tipi: Azot, N₂ Nozul-Saç arası mesafe: 1mm Lens : 5"

Kesme Hızı: 1m/dk Kesme Gücü: 3 kW Kesme Basıncı: 16 Bar



Şekil 2.6. - Lazerle Kesim Sonucu (Kesim 3)



Şekil 2.7. - Lazerle Kesim Sonucu (Kesim 3.1)

2.3. Tel Erozyonla Kesme Deneyi

Genel olarak kesim parametreleri makine üreticileri tarafından belirlenen ve sisteme (CNC) girilen standart değerlerdir. Köpük malzeme kesimleri için belirli bir malzeme tanımı bulunmadığından alüminyum plaka kesim parametreleri ile kesime başlanmıştır. Değişken parametre olarak sadece kesme hızı değiştirilmiştir. Tel erozyon kesme işlemi yapısı gereği hassas yüzey kaliteleri elde etmesine imkân tanıyan fakat diğer kesme işlemlerine göre yavaş bir prostestir. Oluşan kıvılcım ve reaksiyonların malzemedan talaş kaldırabilmesi için belli bir zamana ihtiyacı vardır. Bu da bu prosesin en büyük dezavantajı olarak değerlendirilir.

1,2 mm kalınlığındaki alüminyum plakalar arasına köpük malzeme dökülerek elde edilen toplam 19 mm kalınlığındaki sandviç plakalar ve kapalı hücre yapılı 10mm kalınlığındaki köpük malzeme tel erozyonla, belli ölçülerdeki (30x67mm) parçalara ayırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar makro ve micro seviyede değerlendirilmiştir.

Kesme işlemlerinin hepsinde çekme mukavemeti 900 N/mm^2 olan 0.25 mm çapında CuZn37 Master Brass olarak adlandırılan piring tel kullanılmıştır.

Tel erozyonda kesim için aşağıdaki özelliklerde bir CNC makine kullanıldı (Şekil 2.8).

Makine Tipi: MAKINO EV64

Modeli: 2002

Kapasite (X,Y,Z Eksen Stokları): 600x400x260

Açılı Kesim: $\pm 15^\circ$



Şekil 2.8. - Makino EV64 CNC Tel Erozyon Kesim Tezgahı

Deneyler aşağıdaki kesim parametreleri ile yapılmıştır.

Çizelge 2.2. - Sandviç Köpük Malzeme EDM Kesim Parametreleri

PARAMETRELER	KESİM 4	KESİM 5
TEL ÇAPI (mm)	0,25	0,25
Tel MALZEMESİ	Pirinç	Pirinç
KESME HIZI (mm/dak)	15	22

Çizelge 2.3. - 10 mm Kalınlığında Kapalı Hücre Yapılı Al. Köpük EDM Kesim Parametreleri

PARAMETRELER	KESİM 6	KESİM 7	KESİM 8	KESİM 9
TEL ÇAPI (mm)	0,25	0,25	0,25	0,25
TEL MALZEMESİ	Pirinç	Pirinç	Pirinç	Pirinç
KESME HIZI (mm/dak)	13	16	22	25

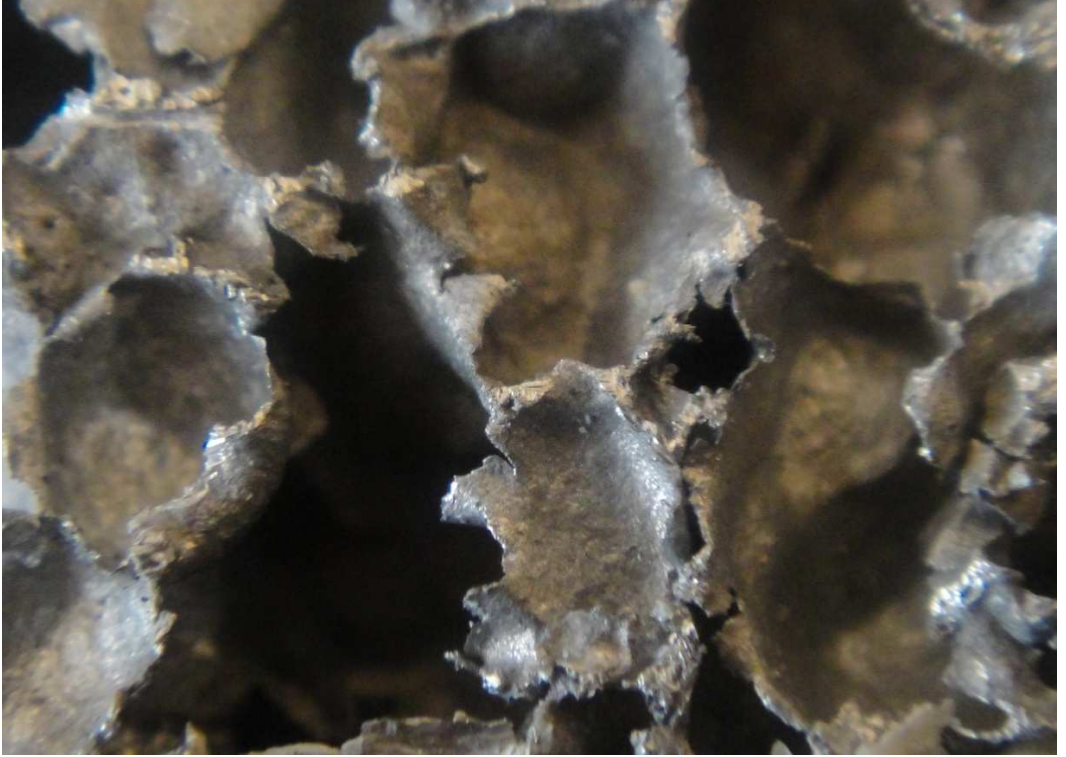
Tel erozyonla kesme işleminde elde edilen yzey kalitesinde değişen parametre değerlerine rağmen herhangi bir bozulma yada farklılık gözlemlenmemiştir. Belli kesme hızları üzerinde tel kopmaları görülmüş ve kesme işlemi tamamlanamamıştır.



şekil 2.9.- Tel Erozyonla Kesim Sonucu (Sandviç Yapılı Malzeme)



Şekil 2.10 - Tel Erozyonla Kesim Sonucu Oluşan Yapı (Sandviç Yapılı Malzeme)



Şekil 2.11 - Tel Erozyonla Kesim Sonucu Oluşan Yapı (Kapalı Hücre Yapılı Köpük Malzeme)

Şekil 2.10 ve 2.11’ de sandviç yapılı köpük malzeme ile kapalı hücre yapılı köpük malzemenin tel erozyon ile kesim sonrası kesme yüzeylerindeki değişim görülmektedir. Kesim esnasında hücre çeperleri herhangi bir mekanik yük etkisi altında kalmadığı için hücre yapısında bir bozulma meydana gelmemiştir. Görülen homojen olmayan dağılım ve gözenek boyutu değişkenlikleri üretim esnasında oluşan düzensizliklerdir.

2.4. Cıvata Bağlantısı

İkincil işlemler için önemli konulardan biride çözülebilir bağlama yöntemi yani cıvata bağlantısıdır. Köpük malzemeler doğaları gereği sahip oldukları gözenekli yapı nedeniyle direkt cıvata bağlantısına uygun değildirler. Bu sorunu ortadan kaldırmak yani köpük metalleri birbirine bağlamak için Bölüm 1.3.1’ de bahsettiğimiz bazı çözümler ortaya atılmıştır. Bunlardan bir tanesi bakır burç ve dolgu maddesi ile yapılan çalışmadır. Bir diğer çalışma, döküm esnasında kalıba somun, saplama veya dolu malzeme bırakarak sorunu çözme yöntemidir. Bununda en büyük dezavantajı prototip üretim için uygun olmamaları ve daha sonra ilave edilebilecek herhangi bir bağlantıya imkan vermemeleridir (Duarte ve ark. 2006).

Yapılan çalışmada amaç köpük malzemelerin birbirlerine cıvata bağlantısı ile mukavemetli şekilde bağlanabilmesidir. Mevcut diğer çalışmaların aksine bu yöntemde, köpürtme esnasında köpük içerisine bağlantı malzemesine yada burç ile köpük metal yapışmasını sağlayacak ara köpürebilir ek malzemelerin yüksek sıcaklıkta ısıtılmasına gerek duyulmamaktadır. Geliştirilen yöntemde uygulama, köpük metalin istenilen bölgelerinin delinmesi, kurlaşan sıvı metal dolgu ile doldurulması, bu dolgu bölgelerine dış açılması ve köpük metallerin dış açılan bu bölgelerden cıvata ile bağlanmasına dayanmaktadır.

Yapılan cıvata bağlantısı deneme çalışmalarında kullanılan numuneler, 1,2 mm lik alüminyum plakalar arasına köpük malzeme dökülerek elde edilen toplam 19 mm kalınlığındaki 30x67 mm ölçülerinde sandviç yapılı köpük malzeme numuneleridir. Plakalar ile köpük malzeme arasındaki bağlantı yapıştırma olmayan metalürjik bir bağlantıdır. Bu numune parçalar tel erezyon işlemi ile kesilmişlerdir. Sandviç yapıda

köpük 19mm kalınlığında AlSiMg, üst ve alt plakalar ise 1,2 şer mm kalınlığında Al 6082 (AlMgSi) dır (Şekil 2.9).



Şekil 2.12- Delinmiş Alüminyum Dolgulu Sandviç Yapılı Köpük Malzeme

Yapılan denemelerde sandviç plakaların ortasını 16mm çapında radyal matkap ile delik açıldı. Sıvı yada macun kıvamındaki alüminyum 16mm çapındaki delikten döküldü. İyice yayılması, yan hücrelere geçmesi, köpük malzeme ile arasındaki temas yüzeyi ve bağ arttırılmaya çalışıldı. Sıvı alüminyumun kürleşmesi için 12 saat bekletildi. Sertleşen sıvı alüminyum 6,5mm çapında tekrar delinip M8 diş açıldı. Köpük malzeme üzerinde istenilen bir yere cıvata bağlantısına uygun diş açılmış oldu (Şekil 2.12, 2.13).

Delinip diş açılan köpük malzemeler M8 cıvata ile birbirlerine bağlandı (Şekil 2.14).



Şekil 2.13 - Diş Açılmış Alüminyum Dolgulu Sandviç Yapılı Köpük Malzeme

Kürleşen malzeme Loctite Hysol® 3479™ markalı alüminyum dolgulu iki bileşenli epoksi tabanlı bir dolgudur. $\sigma_{çekme}$:20 N/mm² , σ_{basma} :70 N/mm² mukavemet değerlerine sahiptir.



Şekil 2.14 - Cıvata Bağlantısı Yapılan Sandviç Yapılı Alüminyum Köpük Malzemeler

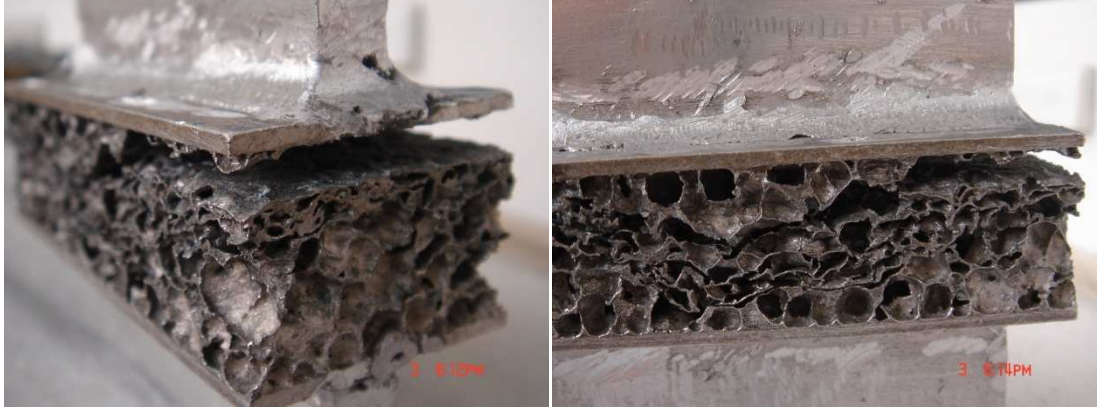
Kullanılan çekme testi cihazı Tofaş firmasında bulunan Zwick/Roell marka ' Ton yükleme kapasitesi ve dijital çıktı imkanı veren bir makinedir.

Cıvata Bağlantısı Deney 1:

Alüminyum sandviç yapının köpük malzeme ile dış plakalar arasındaki bağ mukavemetini ölçmek için dış plakalara dolu alüminyum plakalar kaynatıldı. Ek kaynak yapılan bölgelerden numuneler çekme cihazına bağlanarak çekme testi uygulandı (Şekil 2.15, 2.16).

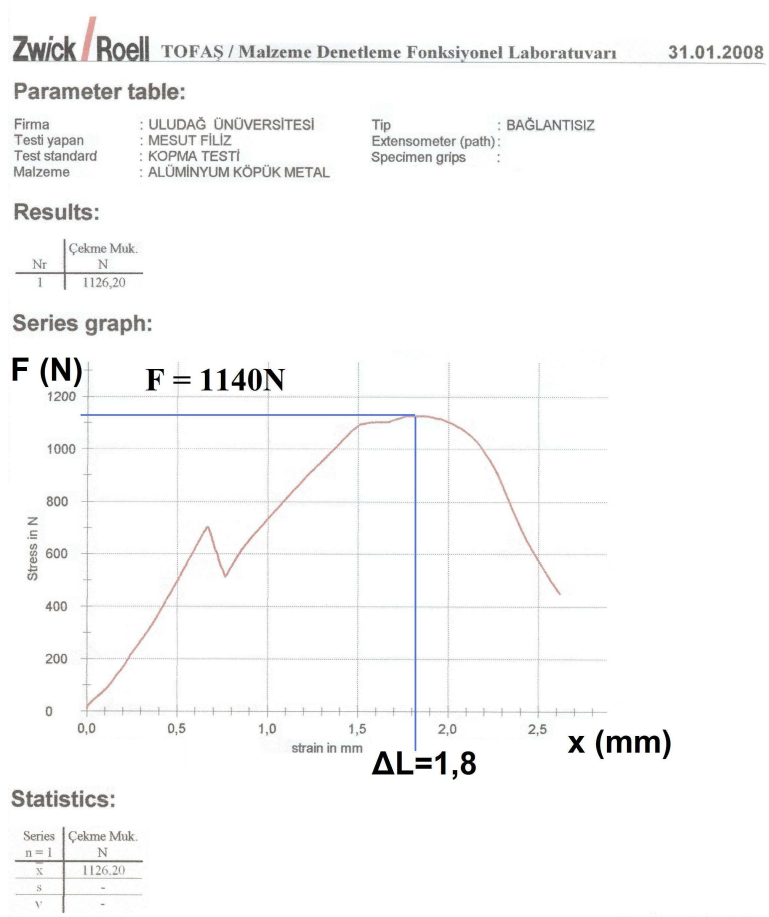


Şekil 2.15 - Çekme Deneyi Öncesi Alüminyum Plaka Kaynatılmış Köpük Malzeme



Şekil 2.16 - Çekme Deneyi Sonrası Alüminyum Plaka Kaynatılmış Köpük Malzeme

Çekme deneyi sonucu çekme cihazından elde edilen grafik Şekil 2.17' de görülmektedir.



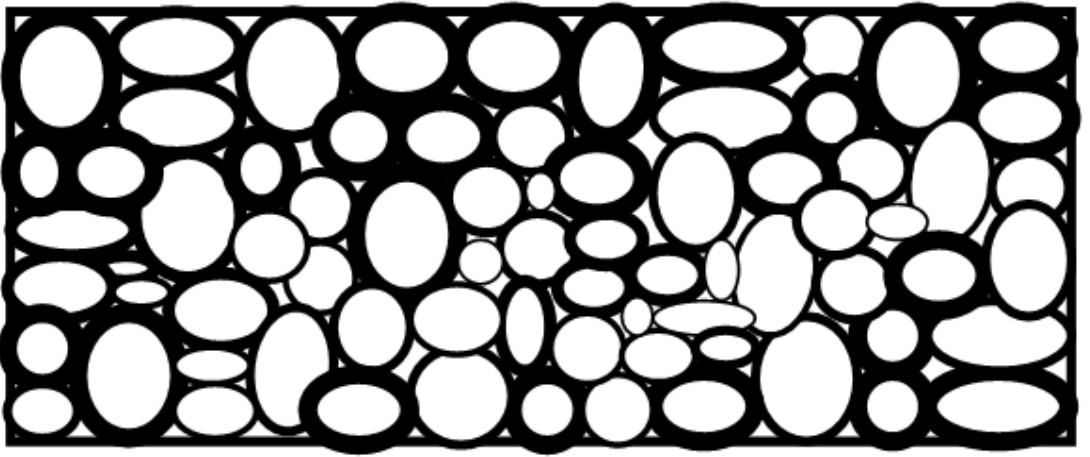
Şekil 2.17 - Alüminyum Plaka Kaynatılmış Köpük Malzeme Numunesinin Çekme Deneyi Grafiği (Cıvata Bağlantısı Deney 1)

Bu noktada ilk olarak alüminyum sandviç plaka (dış plaka) ile köpük malzeme arasındaki bağlar koptu ve plakanın bir kısmından köpük malzeme ayrıldı (Şekil 2.16).

$$\sigma_{k1} = F/A = 1180 / 30 \times 70$$

$$\sigma_{k1} = 0,56 \text{ N/mm}^2$$

Gerilme değeri hesabında alan önemli. Köpük malzeme ile plakanın temas alanı hücre çeperlerinin plakaya tutunduğu alan kadardır. Bu alan Şekil 2.18’de görüldüğü gibi toplam yüzey alanının oldukça altında bir değerdir. Beyaz bölgeler temas etmeyen boş alanları, siyah kısımlar ise hücre çeper kalınlığı nedeniyle alüminyum plaka ile temas alanları göstermektedir. Hücre çeper kalınlığı bu alanın hesabında kullanılır fakat sabit hücre çeper kalınlığı eldesi henüz laboratuvar şartlarında nano teknoloji ile denendiği için elimizdeki numuneler homojen olmayan hücre çeper kalınlıklarına sahiptir ve bu noktada bazı sınır değerleri belirlemek gerekmektedir. Kullandığımız sandviç yapılı köpük malzemede bu alan toplan alanın 20 ile 30’ da biri arasında bir değer olarak tespit edilmiştir Dolayısıyla FEA analizinde temas alanındaki bu farklılığı belirlemediğiniz için ile deney sonuçları birbirinden farklı çıkmaktadır. Oluşan bu farklılık nedeniyle kuvvetin alana bölümü ile elde edilen gerilme değeri bir karşılaştırma kriteri olarak dikkate alınmamıştır.



Şekil 2.18 – Sandviç Yapılı Köpük Malzemenin Plaka Yutma Yüzeyi

Birim uzama “ ϵ ”, uzamanın boya bölünmesi ile elde edilir. Bu değer FEA analizlerinde elde edilen sonuç ile karşılaştırılabilir.

$$\varepsilon_1 = \Delta L / L = 1,8 \text{ mm} / 19 \text{ mm}$$

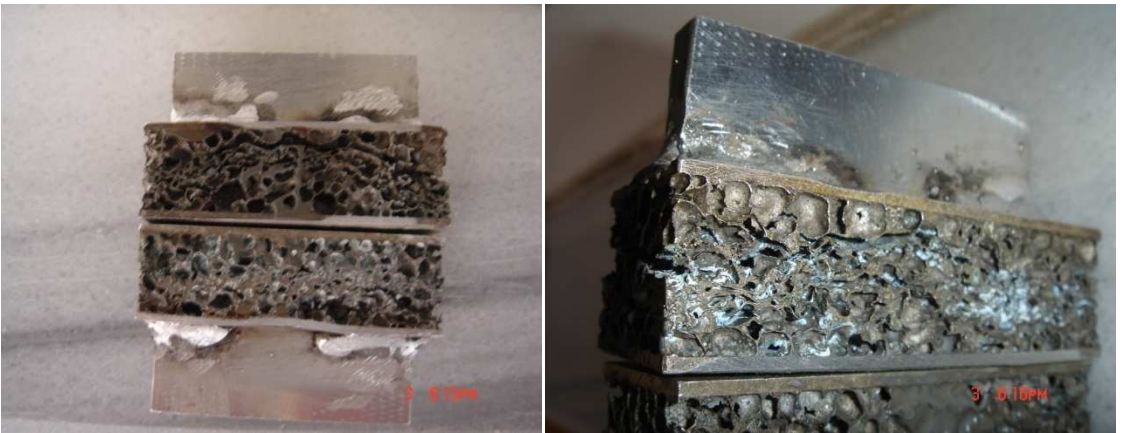
$$\varepsilon_1 = 0,095$$

Civata Bağlantısı Deney 2:

Önceden radyal matkapla \varnothing 16 mm lik delik delinerek k rleŐen metal sıvı dolgu ile doldurup 12 saat bekletilen sandviç yapıdaki köpük malzemelere 6,8mm delik delinip M8 diş çekilmiŐti. Bunların uçlarına çekme cihazına bağlayabilmek ve kopma bölgesini net görebilmek için alüminyum plakalar kaynatıldı. İki numune M8 civata ile birbirlerine bağlanarak uçlarına kaynatılan alüminyum plakalardan çekme testine tabii tutuldular (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. -  ekme Deneyi  ncesi Diş Açılmış Köpük Malzeme



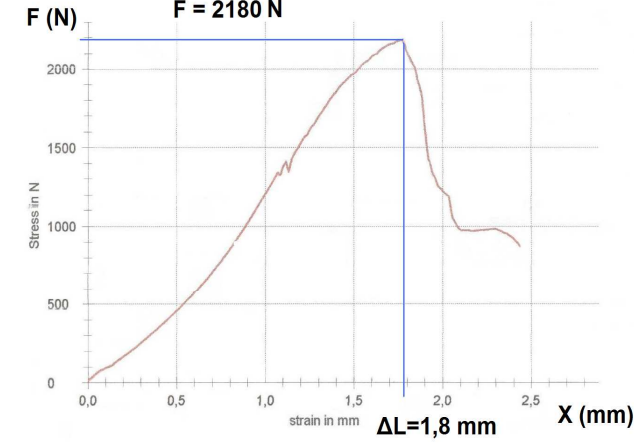
Şekil 2.20.-  ekme Deneyi Sonrası Diş Açılmış Köpük Malzeme

Parameter table:

Firma	: ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ	Tip	: 2 - BAĞLANTILI
Testi yapan	: MESUT FİLİZ	Extensometer (path)	:
Test standard	: KOPMA TESTİ	Specimen grips	:
Malzeme	: ALÜMİNYUM KÖPÜK METAL		

Results:

Nr	Çekme Muk. N
2	2185,89

Series graph:

Statistics:

Series	Çekme Muk. N
n=1	N
x	2185,89
s	-
v	-

Şekil 2.21 - Diş Açılmış Köpük Malzeme Numunesinin Çekme Deneyi Grafiği (Cıvata Bağlantısı Deney 2)

Bu kez alüminyum sandviç plaka (dış plaka) ile köpük malzeme arasındaki bağlardan önce köpük malzeme kendi içerisinde yüzeye yakın bir yerden ayrılarak yüzeye doğru çatlak ilerleme gösterdi (Şekil 2.20). 2200 N da çekme kuvveti düşmeye ve malzeme ayrılmaya başladı (Şekil 2.21).

$$\sigma_{k2} = F/A = 2200 / 30 \times 70$$

$$\sigma_{k2} = 1,05 \text{ N/mm}^2$$

Birim uzama ϵ_2 ,

$$\epsilon_2 = \Delta L / L = 1,80 \text{ mm} / (2 \times 19) \text{ mm}$$

$$\epsilon_2 = 0,047$$

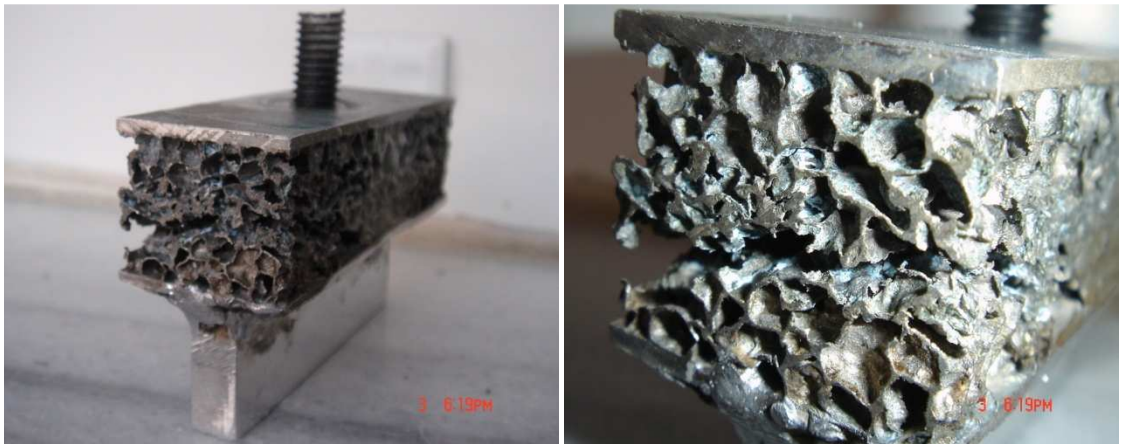
Civata Bağlantısı Deney 3:

Deney 2 de bahsedilen dolgu malzemesini köpük malzeme ile birleşme mukavemetinin yüksek olduğu tezini kuvvetlendirmek için bir deney daha gerçekleştirildi. Bu kez çekme cihazının bir ucu saplamadan diğer ucu da kaynaklı alüminyum plakadan tutturularak çekme testi uygulandı (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 - Çekme Deneyi Öncesi Al. Plaka Kaynaklı ve Saplama Montajlı Numune

Kalıcı uzamanın net görüldüğü a noktası ilk iki deneye yakın değerlerde. Çekmeye devam ettiğimizde kopma noktası daha yukarıda 2500 N' da başlıyor ve plaka köpük malzemeden ayrılıyor (Şekil 2.23, 2.24).



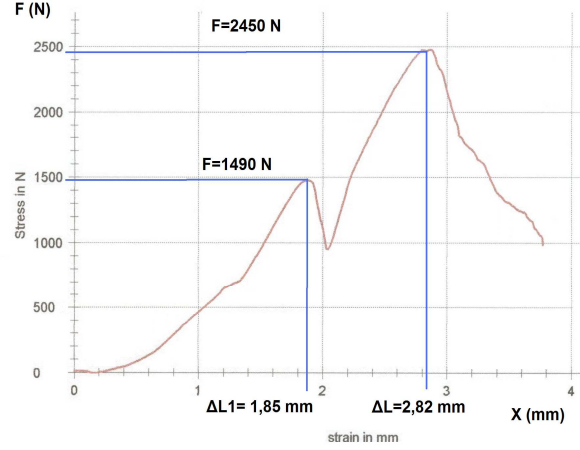
Şekil 2.23 - Çekme Deneyi Sonrası Al. Plaka Kaynaklı ve Saplama Montajlı Numune

Parameter table:

Firma	: ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ	Tip	: TEST 3
Testi yapan	: MESUT FILİZ	Extensometer (path)	:
Test standard	: KOPMA TESTİ	Specimen grips	:
Malzeme	: ALÜMİNYUM KÖPÜK METAL		

Results:

Nr	Çekme Muk. N
1	2476,20

Series graph:

Statistics:

Series	Çekme Muk. N
n = 1	2476,20
\bar{x}	-
s	-
v	-

Şekil 2.24 - Alüminyum Plaka Kaynaklı ve Saplama Montajlı Köpük Malzeme Numunesinin Çekme Deneyi Grafiği (Cıvata Bağlantısı Deney 3)

$$\sigma_{k3A} = F/A = 1500 / 30 \times 70$$

$$\sigma_{k3A} = 0,71 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{k3B} = F/A = 2500 / 30 \times 70$$

$$\sigma_{k3B} = 1,19 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{3A} = \Delta L / L = 1,8 \text{ mm} / 19 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{3A} = 0,094$$

$$\epsilon_{3B} = \Delta L / L = 2,8 \text{ mm} / 19 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{3B} = 0,14$$

2.5. Cıvata Bağlantı Yönteminin Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi (FEA)

Sonlu elemanlar metodu, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal metoddur. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu metodun, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de başarı ile kullanılabileceği anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar metodu ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve günümüzde bir çok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi metodlardan birisi olmuştur. Metodun değişik mühendislik alanının için bu kadar popüler olmasının ana nedenlerinden birisi genel bir bilgisayar programının yalnız giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemin çözümü için kullanılabilmesidir. Sonlu elemanlar metodundaki temel düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır (Arıkan 2005).

Sonlu elemanlar metodunda temel fikir sürekli fonksiyonlar bölgesel fonksiyonlar ile temsil etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün değeri o elemanın nodlarındaki değerler kullanılarak enterpolasyon ile bulunur. Sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler nodlardaki değerlerdir. Belirli bir prensip kullanılarak büyüklük alanının nodlardaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi;

$$[K] \times [D] = [R]$$

Şeklinde dir. Burada [D] büyüklük alanının nodlardaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, [R] bilinen yük vektörü ve [K] ise bilinen sabit matrisidir. Gerilme analizinde [K] rijilik matrisi olarak bilinmektedir. (Oka 2009)

Yapılan modelleme ve analiz çalışmalarında ANSYS LS-DYNA programı kullanılmıştır. ANSYS LS-DYNA teknolojisi; kısa zamanlı, orta-ağır yüklemeli katı-katı dinamik durumlara tam uygunluk gösterir. ANSYS LS-DYNA yazılımı; çarpışma, kanat muhafazası, presleme ve şekil verme gibi zorlu uygulamaları simüle etme alanında idealdir. ANSYS LS-DYNA yazılımı; 2 ve 3 boyutlu eksplisit sonlu elemanlar ile otomatik kontak oluşturmayı da içeren tek-yüzey, yüzey-yüzey ve düğüm noktası (node)-yüzey kontak grubunu destekler. Hızlı çözüm seçenekleri de sunar. Simetrik çoklu işleme (SMP) ve geniş paralel işleme (MMP) metotları; tek CPU zaman aralığında eksplisit simülasyon çözümleri almak için, birden fazla CPU ve çekirdek

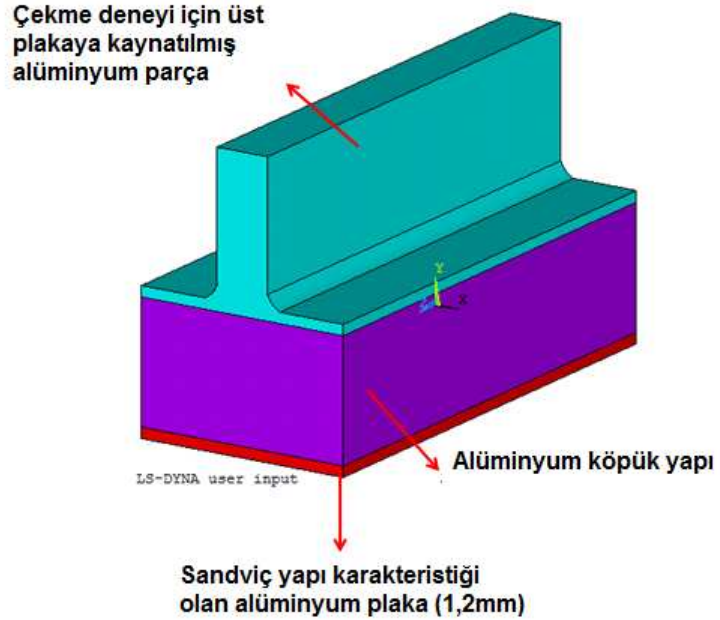
kullanarak yazılımın performansını ayarlar. Bu özellikleri nedeniyle cıvata bağlantılı çekme deneyi simülasyonu ve analizi için bu program seçildi.

Çizelge 2.4 – Deneyselerde Kullanılan Malzeme Özellikleri (Alulight 2006, Ashby 2000,)

MALZEME	Alüminyum Köpük	Alüminyum	Cıvata	Alüminyum Dolgulu Epoksi
Yoğunluk	500 kg/m ³	2,770 kg/m ³	7,850 kg/m ³	1,300 kg/m ³
Elastisite Modülü	5,000 MPa	71,000 MPa	210,000 MPa	8000 MPa
Poison Oranı	0.4	0.33	0.30	0.30

2.5.1. Cıvata Bağlantısı Deney 1 Modelleme ve Analiz

Bu analiz, sandviç yapı köpük malzemenin kendi mukavemet değerlerini sonlu elamanlar yöntemi ile belirlemek için yapıldı.

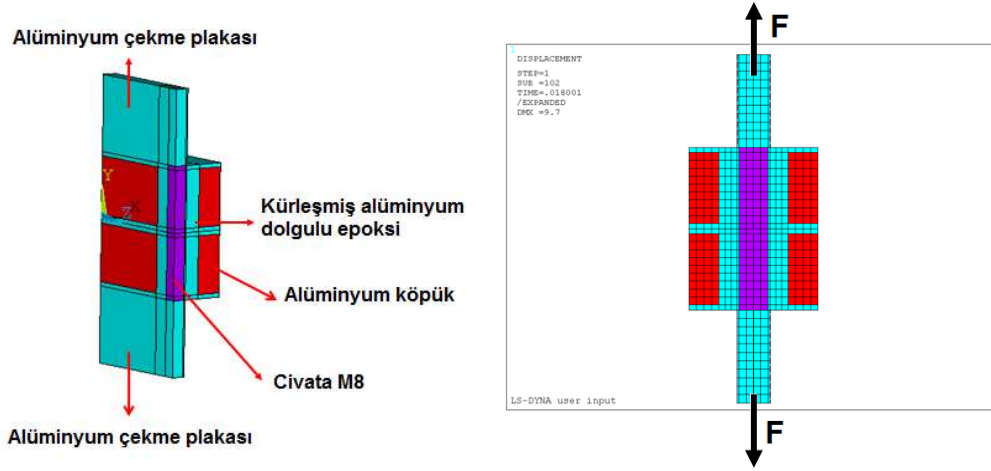


Şekil 2.25 – Sandviç Yapılı Köpük Malzeme Modeli

Şekil 2.25' te görüldüğü gibi üst plakaya çekme cihazı çeneleri tutması için kaynatılan alüminyum plaka modellendi, alt yüzey ise sabit kabul edilerek sisteme tanımlandı. Çekme deneyi analizi, yapılan deneyde belirlenen kuvvet değerinin model değeri olarak belirlenmesi ile gerçekleştirildi

2.5.2. Cıvata Bağlantısı Deney 2 Modelleme ve Analiz

Bu analizde cıvata bağlantılı iki sandviç yapılı köpük malzemenin modellemesi ve analizi gerçekleştirildi.

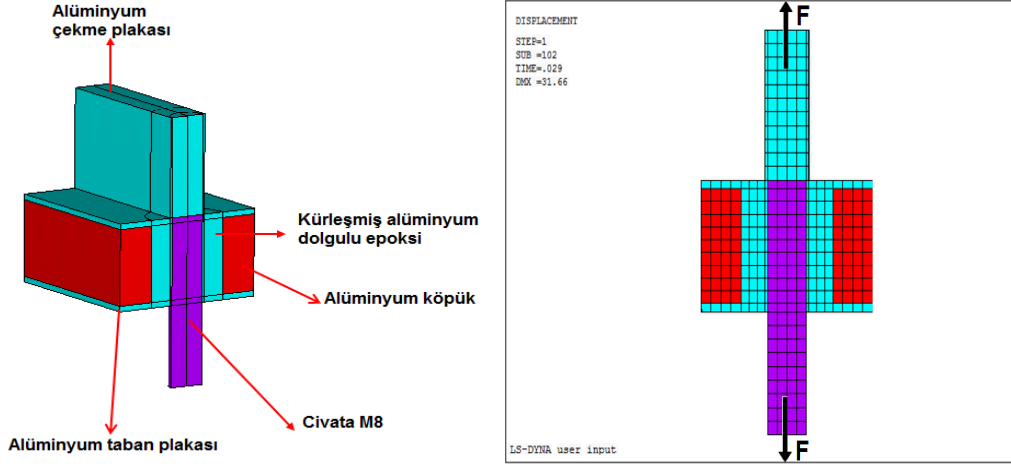


Şekil 2.26 – Cıvata Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzemeler ve Çekme Analizi Modeli

Çekme her iki uçtaki alüminyum çekme plakalarından gerçekleştirildiği için modelleme ve analizde de aynı yaklaşım uygulanmıştır (Şekil 2.26).

2.5.3. Cıvata Bağlantısı Deney 3 Modelleme ve Analiz

Sandviç yapılı köpük malzemenin kendi çekme mukavemet değerleri ve cıvata bağlantılı haldeki çekme mukavemet değerleri hesaplandıktan sonra cıvata bağlantılı yapıda mukavemet artışı gözlemlendi.



Şekil 2.27 – Saplama Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzeme ve Çekme Analizi Modeli

Elde edilen sonuçları doğrulamak ve civata bağlantılı yapıda artan mukavemet artışını tek bir köpük malzeme üzerine saplama monte edip çekme uygulayarak simüle etmek için modelleme ve analiz gerçekleştirildi (Şekil 2.27).

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1. Lazerle Kesme ve Tel Erozyonla Kesme İşlemleri Sonuçları ve Tartışma

Lazer kesme ve tel erozyon ile kesme yöntemlerinde kesim kalitesi açısından standartta referans olarak alınabilecek talaşlı imalatta olduğu şekilde yüzey pürüzlülüğün gibi bir kesme yüzeyi özellik değeri yoktur. Bu nedenle farklı kesme işlemleri sonucu oluşan yüzey kalitesini sınıflandırmak için bir takım kabuller yapıldı. Kesim kalitesi 4 ana grupta sınıflandırılarak değerlendirildi. Gözenek yapısının bozulmadığı, hücre duvarlarının deforme olmadığı, kesimin etkisinin elektron mikroskobu ile dahi belirgin şekilde ölçülmediği yüzey kalitesi birinci derece kaliteli kesim olarak tanımlandı. Kesme işlemi sonucu hücre duvarlarında ve gözenek yapılarında değişimler olduğu fakat bu değişimlerin kesilen iki yüzey birleştirildiğinde bir etki yaratmayacak ölçüde küçük olduğu yani birleşen iki yüzeyin çözülebilir ya da çözülemeyen bağlama elemanları ile bağlanabildiği ve farklı bir yüzeye adezif bağ ile birleştirildiği yüzey kalitesi ikinci derece kaliteli kesim olarak tanımlandı. Hücre duvarlarında ve gözenek yapısında birtakım değişikliklerin olduğu fakat serbest yüzey olarak yada basit çapak alma operasyonları ile yüzey çözülebilir cıvata yada çözülemeyen kaynak bağlantısı şeklinde yüz yüze birleştirilerek kullanılabilir yüzey kalitesi üçüncü derecede kaliteli kesim olarak ifade edildi. Önemli oranda değişimlerin olduğu, yüzeyin düzgünlüğünün artık farklı bir amaç için bu yüzeyin kullanımına imkan vermeyecek yapıya geldiği, sadece görülmeyen bölgelerde serbest yüzey olarak kullanılabilir durumda olduğu ve görsel olarak da deforme olan, ergiyen ve parçalanmış yüzeylerin belirgin görüldüğü ve mutlaka kullanım için önemli oranda ikincil işlem gereksini olan kesme yüzeyleri ise dördüncü derece kaliteli kesim olarak tanımlandı.

Lazerle kesme işleminde ısıdan kaynaklanan eriyik metal hücre çeperlerine yapışmakta ve hücre yapısını bozmaktadır. Bu durumda parametreler daha önemli hale gelmekte ve parametre optimizasyonu gerekmektedir. Yapılan parametre ayarları sonrasında bile lazer ışını köpük metal arasındaki hava boşluğundan geçerken diğer hücre duvarına ulaşana dek karakteristiği bir miktar değiştirmekte ve katmanlar arası homojen olmayan bir kesim sağlanmaktadır. Lazer kesme işleminin en büyük avantajı

yüksek kesme hızlarına (3-5m/dak) ulaşılabilmektedir. Dezavantajları ise dış çeperlerdeki kesilen bölgelerde yüzey kalitesinin kötü olması, eriyik alüminyumun hücre duvarlarına yapışması ve gözenekli yapının bozulmasıdır. Ayrıca kesme kalınlığının da max 20 -30 mm'ye kadar uygulanabilmesi kullanımını sınırlamaktadır.

Lazerle kesim 1' de 5m/dak lık yüksek hızı nedeniyle köpük metalin alt yüzeyinde tam bir ayrışma meydana gelmedi. Çünkü hız nedeniyle malzemenin ergimesi ve ortamdan uzaklaştırılması için gereken zaman yeterli olmadı ve proses tam olarak tamamlanamadı. Dördüncü derece kalitesi kesim (Şekil 2.2).

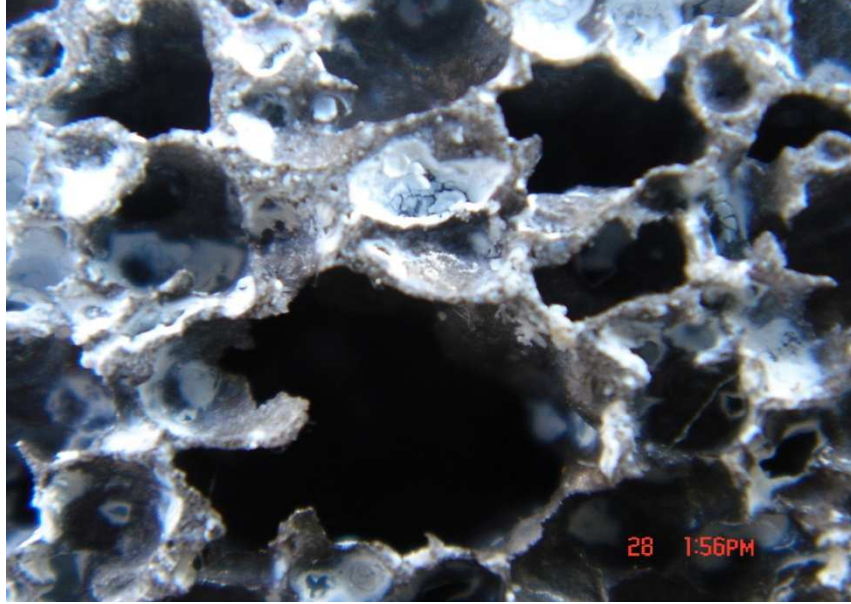
Lazerle kesim 2' de 3m/dak hız değeri ile ilk kesimde görülen proses eksikliği görülmedi ve kesim gerçekleşti. Burada azot basıncı 1 bar düşürüldü ve güç 3KW'a indirildi çünkü hız yavaşladığı için daha az güce ihtiyaç duyuldu ve azot hem ergiyen metali ortamdan uzaklaştırdığı hem de prosesi soğutma görevi gördüğü için 15 bara ayarlandı. Kesim bir miktar çapaklı olsa da kesim kalitesi hassas olmayan uygulamalarda, yüzey-yüzey temas ile montaj yapılmayan serbest yüzeylerde ve fonksiyonel olmayan görülmeyen bölgelerde kullanımına ya da taşlama/ zımpara gibi ikinci bir operasyon sonrası parçanın kullanılabilmesine imkan tanımaktadır. Üçüncü derece kaliteli kesim (Şekil 2.4).

Lazerle kesim 3' de kesme hızı 1m/dak olarak belirlendi ve deneme sonuçlarında ısı yoğunluğunun kesim bölgelerinde yavaş ilerlemesi sonucunda eriyik haldeki alüminyum ortamdan uzaklaştırılmadı. Basıncın yüksek olmasına (17 bar) rağmen ergiyen metal köpük boşluklarına doldu ve yüzey kalitesi oldukça bozuldu. Bu şartlarda köpük malzemenin kesilen yüzeylerden birleştirilmesi ya da kesilen yüzeylerin bir yere temas ettirilerek referans olarak kullanılması mümkün değildir. Ergiyen metal kesme yüzeylerine yapışmış, ortamdan uzaklaştırılmadığı için de soğuyup katılarak yüzeyin düzgünlüğünü bozmuştur. Dördüncü derece kalitesi kesim (Şekil 2.7) .

Tel erozyonla kesme işleminde kesilen yüzeylerde herhangi bir bozulmaya rastlanmadı. Kesim kalitesi diğer kesme yöntemleri ile karşılaştırıldığında hücre çeperlerinin şekilsel yapısını aynen koruduğu ve direkt temas ile montaj yapılabildiği, herhangi bir ikinci operasyona gerek duyulmadığı için "çok iyi" olarak değerlendirilen birinci derece kaliteli kesimdir. En büyük dezavantajı ise kesme hızının lazer kesmeye

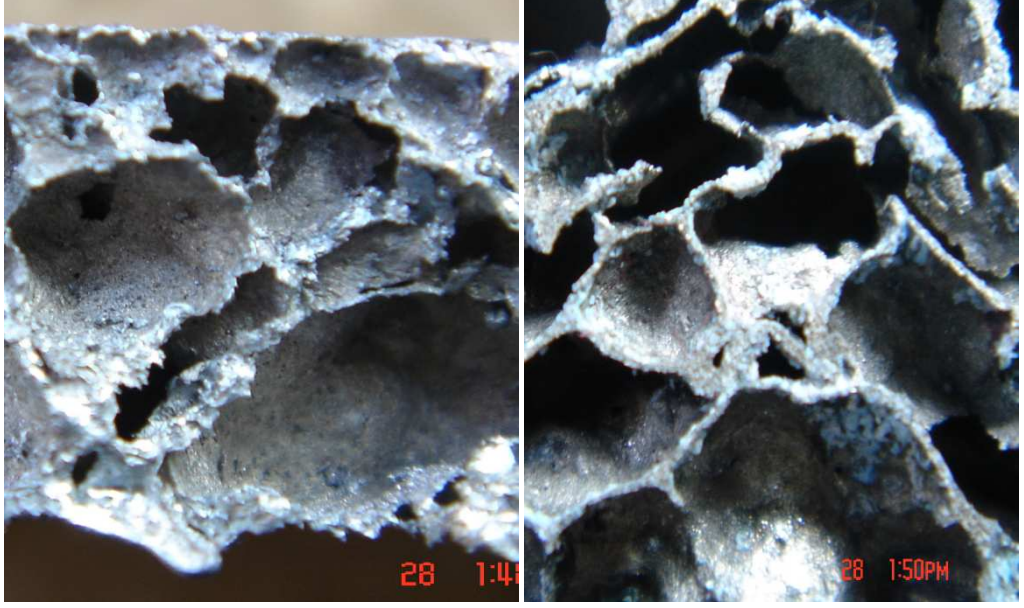
göre yaklaşık 200 kat düşük olmasıdır. Ayrıca tel erozyon işlemi saf su altında gerçekleştiği için bazı numunelerin kurutmadan bekletildiği durumlarda hava ile daha çok temas eden dış yüzey gözenek duvarlarında oksit tabakaları oluşmaktadır ve bir sonraki operasyon için önemli ise ikinci bir operasyonla temizlenmesi gerekmektedir (Şekil 3.1).

Burada önemli nokta; kesme sonrası parçaların kullanılacakları yerin gereksinimleridir. Çok hassas olmayan seri uygulamalarda lazer ya da testere kesimleri, yüzey kalitesi, şekil ve ölçü hassasiyeti gereken yerlerde ise tel erozyon kullanımı uygundur.



Şekil 3.1. - Tel Erozyon ile Kesilen ve Bekletilen Numunelerde Görülen Oksitlenme

Şekil 3.2' de her iki kesme yöntemi ile de hücre yapısındaki değişimler görülmektedir. Lazer kesme ile elde edilen en iyi kesim kalitesi dikkate alındı.



Şekil 3.2 - Lazer Kesme (Solda) ve Tel Erozyon Kesmede (Sağda) Elde Edilen Gözenek Yapısı

Tel erozyonla kesim sonucu birinci derece kaliteli bir kesim sağladı. Hücre yapılarında herhangi bir deformasyon meydana gelmedi. Tel erozyon işleminde, lazer kesme gibi termal bir operasyon sonrası ergiyen metaller olmadığı, testere kesimi gibi hücre çeperlerine mekanik bir kuvvet etki etmediği için çok temiz ve düzgün bir gözenek yapısı elde edildi.

Tel erozyon kesim 4 ve kesim 5' de sandviç yapılı alüminyum köpük numune malzemeler farklı kesme hızları (15 mm/dak ve 22 mm/dak) ile kesildi. Her iki kesme işleminde de herhangi bir problem yaşanmadan kesim işlemi tamamlandı.

Tel erozyon ile kesim 6 (13 mm/dak), kesim 7 (16 mm/dak), kesim 8 (22 mm/dak) işlemleri sonucu kesim yüzeyi çok iyi bir kesim sağladı, hücrelerde herhangi bir deformasyon görülmedi. Kesme işleminde herhangi bir duraksama ya da problem yaşanmadı. Kesme Hızı $V= 13\text{mm/dk}$

Tel erozyon ile kesim 9 esnasında tel koptu ve kesme işlemi durdurulmak zorunda kaldı. Kesme Hızı $V= 25\text{mm/dk}$

Hem elektrot aşınması hem de iş parçasından talaş kaldırma miktarı

- Malzemenin elektrik ve termal iletkenliğine

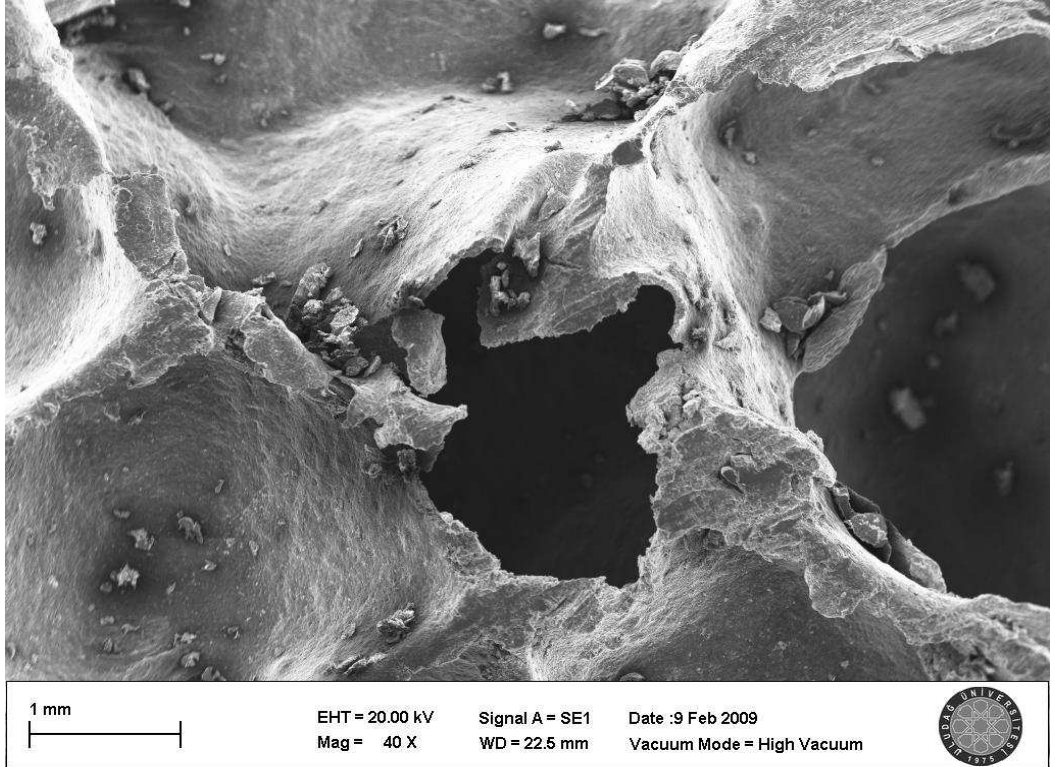
- Malzemenin ergime derecesine
- Elektrik sinyallerinin yavaş ve hızlanmasına bağlıdır.

Bu nedenle, alaşımları ve gözenek yapısı ile elektrik iletkenliği dolu malzemeye göre belli ölçülerde farklılık gösteren köpük alüminyum tel erozyonda kesim işleminde belli bir hızın üzerine çıktığında tel kopması problemi yaşandı. Bu kesilen kalınlık için limit hız değerini ifade etmektedir.

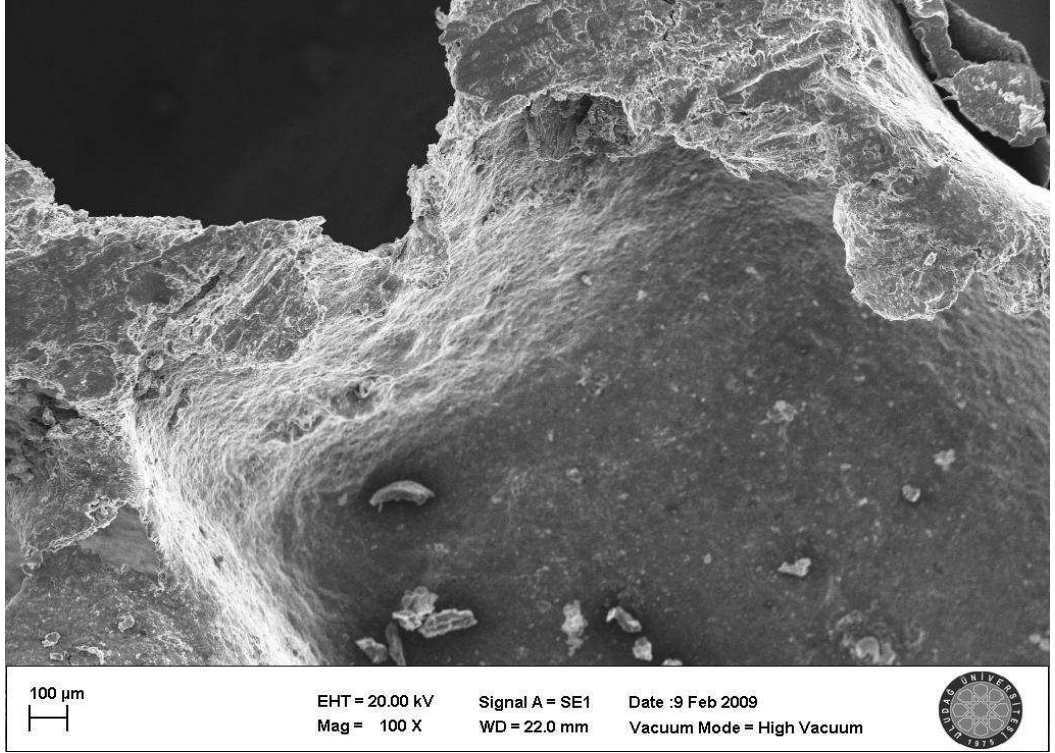
3.2. SEM ile Farklı Tip Kesme İşlemlerinde Elde Edilen Yüzeylerin İncelenmesi

Bu çalışmamızda yapılan farklı kesme işlemleri ile elde edilen yüzeyler incelendi.

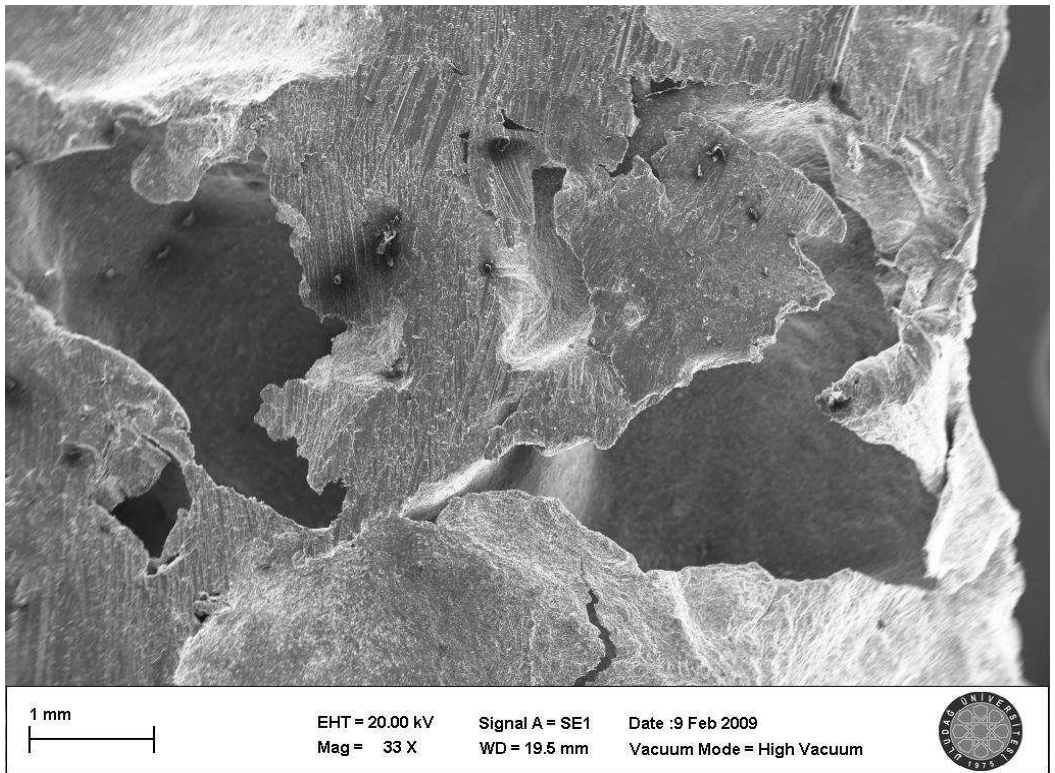
- Manüel Kesim (Testere)
- Manüel El Taşı ile Kesim
- Tel Erozyonla Kesim



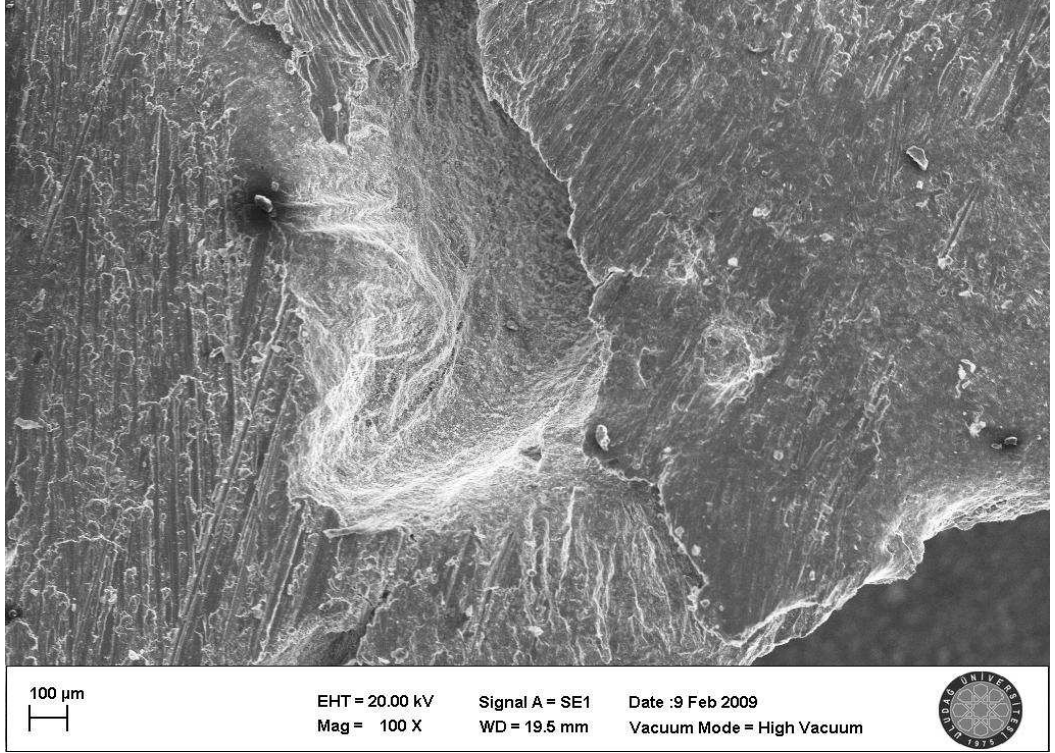
Şekil 3.3. - Manüel Testere ile Kesim X40



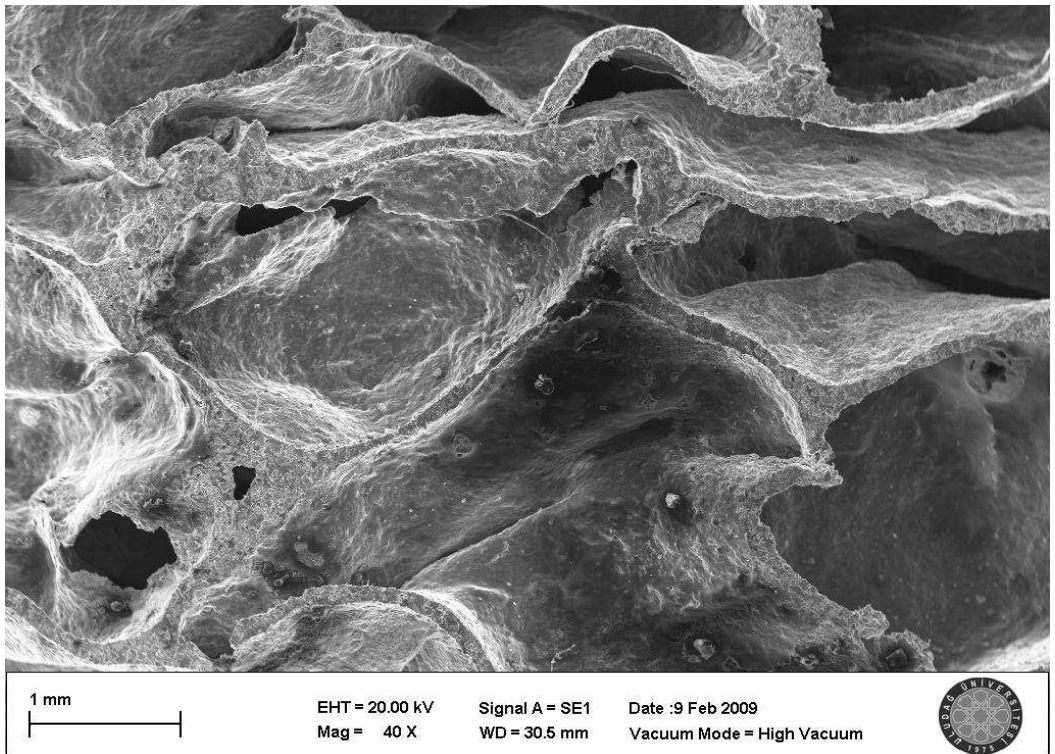
Şekil 3.4 - Manüel Testere ile Kesim X100



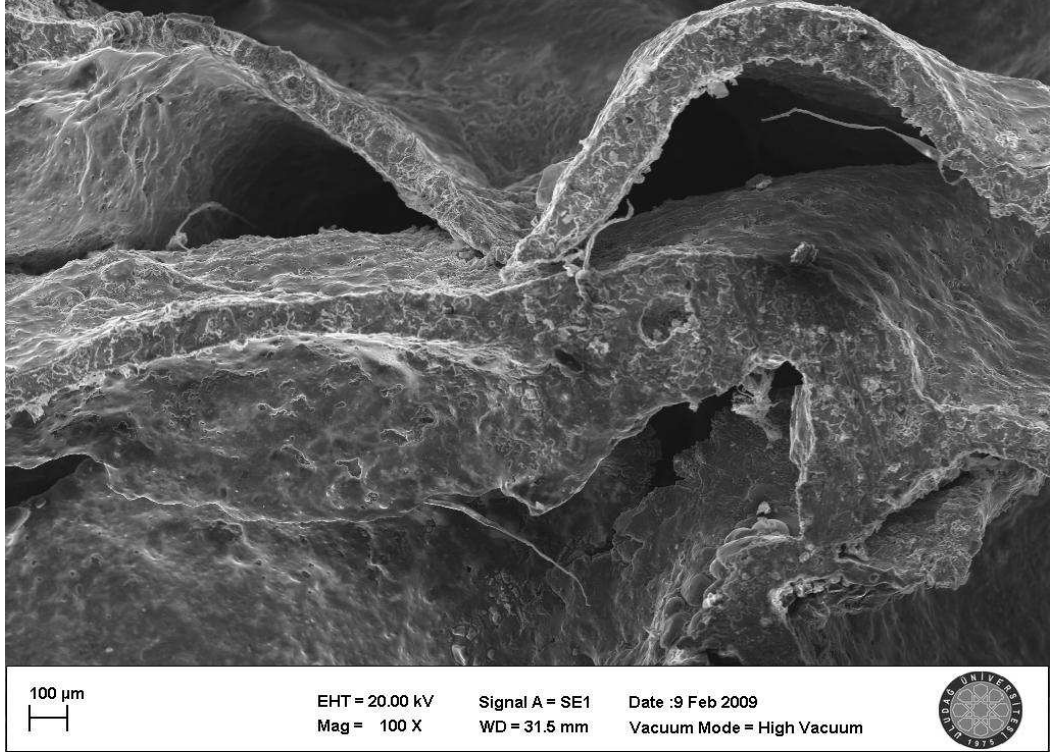
Şekil 3.5 - Manüel El Taşı ile Kesim X33



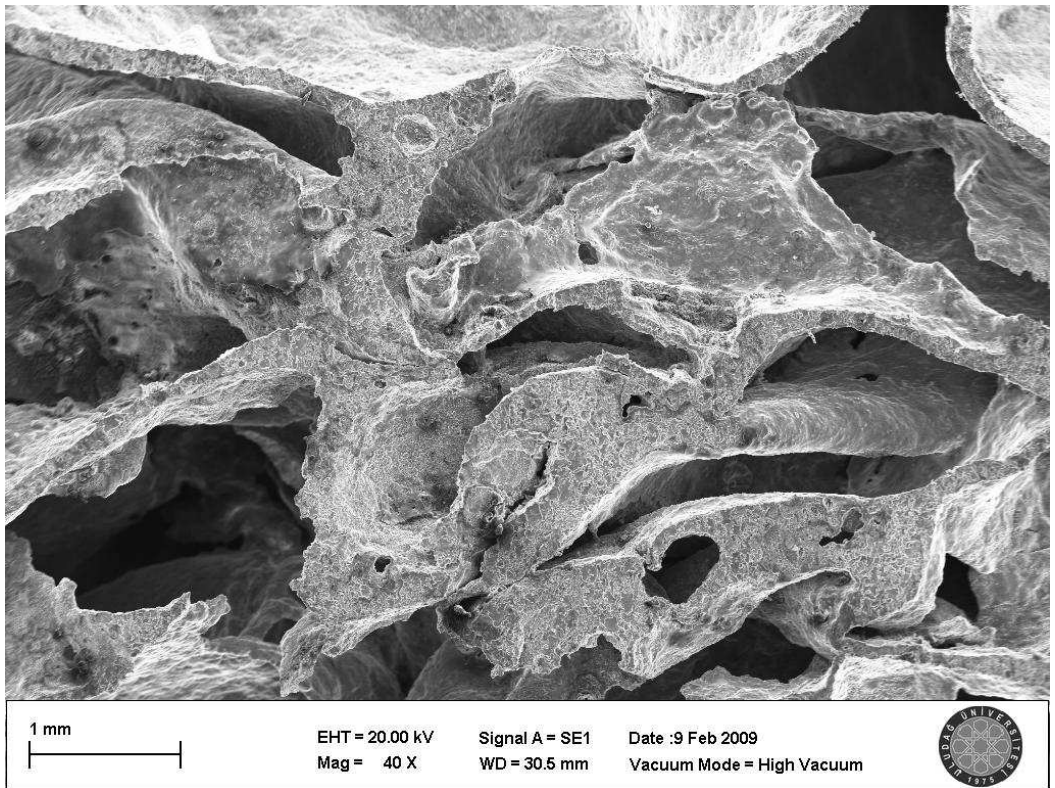
Şekil 3.6. - Manüel El Taşı ile Kesim X100



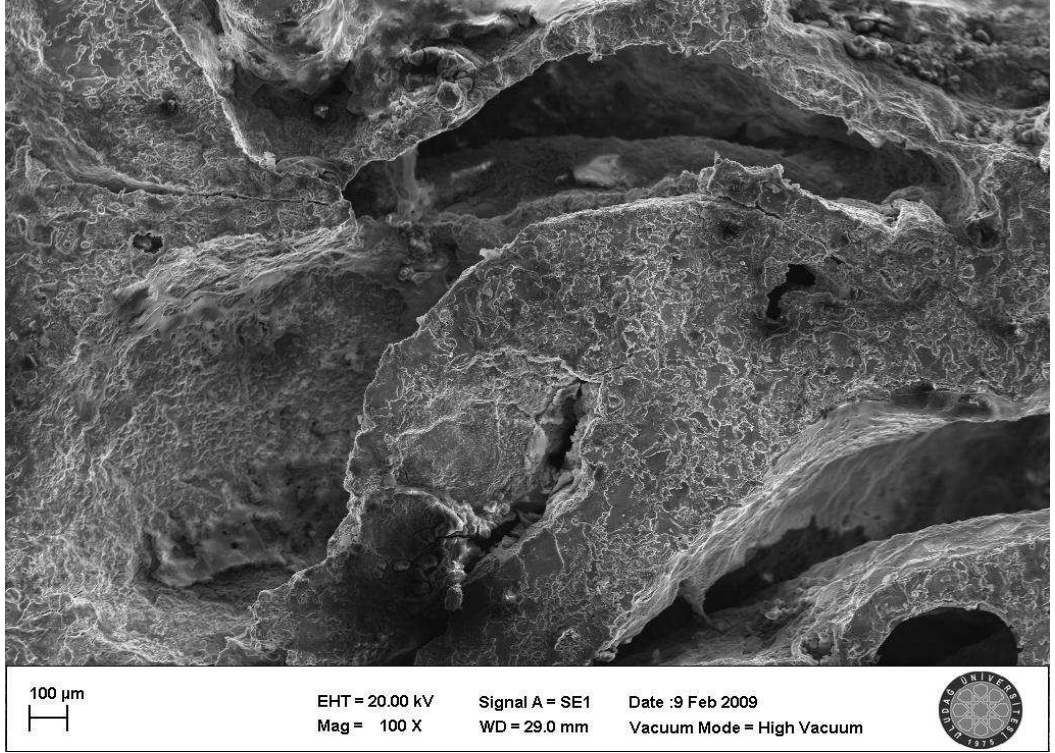
Şekil 3.7 - Tel Erozyonla Kesim X40, V=13 mm/dak



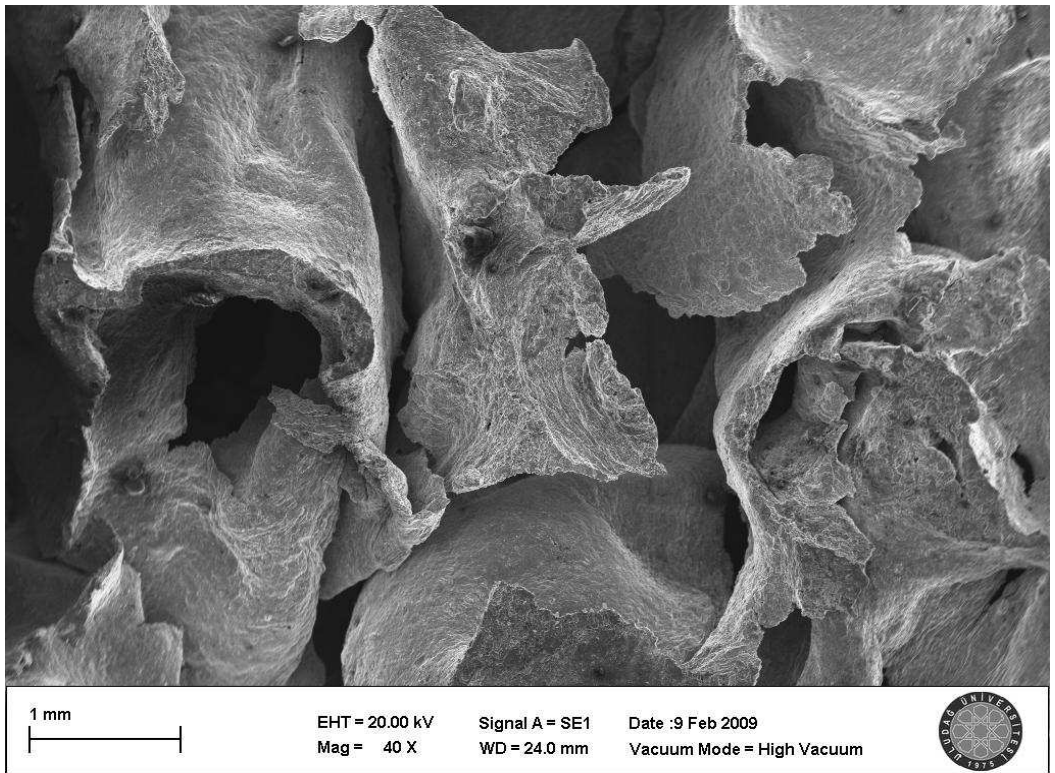
Şekil 3.8 - Tel Erozyonla Kesim X100 , V=13 mm/dak



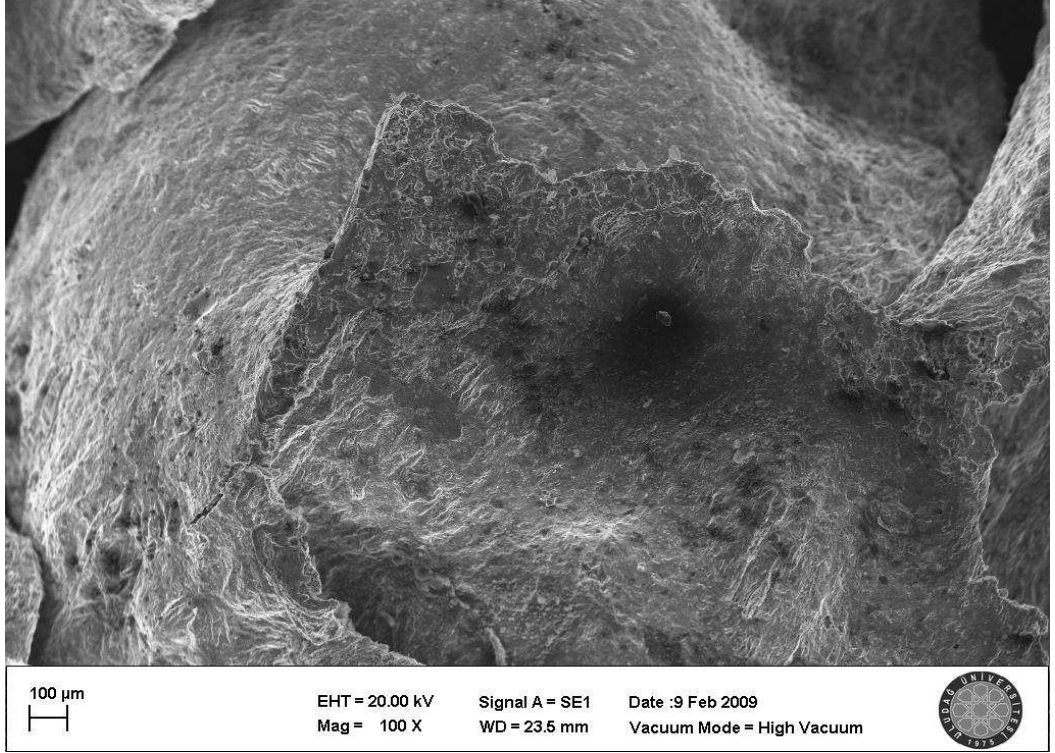
Şekil 3.9 - Tel Erozyonla Kesim X40 , V=16 mm/dak



Şekil 3.10 - Tel Erozyonla Kesim X100 , V=16 mm/dak



Şekil 3.11 Tel Erozyonla Kesim X40 , V=22 mm/dak



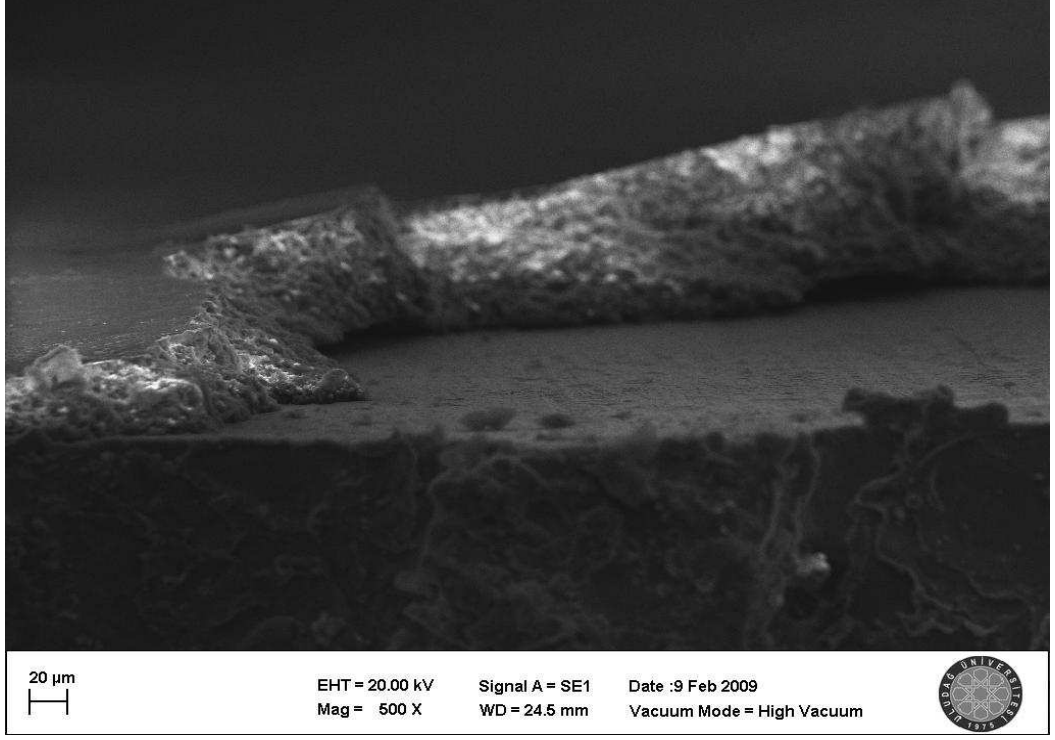
Şekil 3.12 - Tel Erozyonla Kesim X100, V=22 mm/dak

Manüel testere ile kesimde mekanik kuvvet etkisi ile hücre duvarlarındaki parçalanma ve ezilme net olarak görüldü. Kesme esnasında oluşan kuvvetler hücre duvarlarını içe doğru bastırıldığı ve testere ile kesme işlemi frekansiyel uygulanan mekanik yük altında gerçekleşen bir işlem olduğu için ezilen hücre duvarları yanında ayrıca parçalanmış hücre çeperleri de görüldü. Kesme yüzeyi üçüncü derece kaliteli kesimdir (Şekil 3.3, 3.4).

Manüel el taşı ile kesme işlemi testere ile kesim gibi kesikli bir işlem olmadığı için hücre duvarlarında büyük oranda ezilme ve deformasyon oluşturdu. Herhangi bir parçalanma görülmesi de kesme esnasında çeperlere sürten taş hücre duvarlarını içe doğru bastırdı ve kesilen bölgelerde belirgin taş izleri oluştu. Kesim sonrası oluşan yüzey üçüncü derecede kalitelidir (Şekil 3.5, 3.6).

Tel erozyonla kesimde malzeme üzerine herhangi mekanik bir etki tesir etmediği için hücre duvarlarında herhangi bir ezilme, yamulma görülmemektedir. Hücre duvarları üretim esnasında büyüyüp katlaşılarak oluşturdukları yapıyı kesilme işlemi sonrası da aynen korumaktadır. Tel kopmasına kadar uygulanan hız artışı sonrasında

dahi yüzey kalitesinde herhangi bir bozukluğa rastlanmadı. 13 mm/dak hız ile başlanıp 22 mm/dak hıza ulaşıldığında kesme işlemine etkisi aralıklarla tel koptuğu için sadece uzun ve sürekli müdahale edilmek zorunda kalınan bir işlem haline dönüştürmesidir. Kesim sonrası oluşan yüzey birinci derece kalitelidir (Şekil 3.7, 3.9, 3.11).



Şekil 3.13 - Sandviç Yapılı Köpük Malzemenin Köpük-Plaka Metalürjik Bağı

Sandviç yapılı köpük malzemeler, yapıları gereği iki plaka arasına köpürtülerek elde edilirler. Oluşum esnasında köpük ana malzemesi olan alüminyum ve diğer alaşım elementleri eriyik haldedir. Bu fazda sıcaklık yüksektir. Bu nedenle plakalarla köpük malzeme arasında herhangi bir yapıştırma maddesi ilave edilmeden metalürjik bir bağ oluşur (Şekil 3.13). Bu bağ kuvveti köpük malzemenin kendi çekme mukavemetinin seviyesinde bir değerdir. Yapılan çekme deneyi testlerinde elde edilen sonuç da metalürjik bağ kuvvetinin köpük malzemenin kendi çekme mukavemet değerine yakın bir değerde olduğunu göstermektedir.

3.3. Köpük Malzemelerin Cıvata Bağlantısı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Cıvata bağlantısı için delik delip doldurulan kürün gözenekli yapıda hücrelere nüfuziyeti hücre boşluklarını dolduracak seviyededir. Yapıda kürleşmeden ve bağdan kaynaklanan bir mukavemet kaybına neden olmamaktadır. Bilakis çekme deneylerinde cıvata bağlantılı köpük malzemelerin çekme mukavemet değerlerinde artışı gözlemlendi. Bunun en önemli nedeni, köpük içerisinde kürleşen alüminyum sıvı epoksi dolgu, bölgesel yoğunluk artışına ve buna paralel mukavemet artışına neden olmasıdır. Burada dikkate değer olan nokta, kürleşen alüminyum dolgulu epoksi çekme esnasında köpük malzemenin kendi mukavemetine karşılık gelen gerilme değerinin altında köpük metalden ayrılıp bir mukavemet kaybına neden olmamasıdır. Böylece mevcut yapıda bu tip bağlantılarla malzeme ekleri yapılarak cıvata bağlantılı konstrüksiyonlar elde edilebilir.

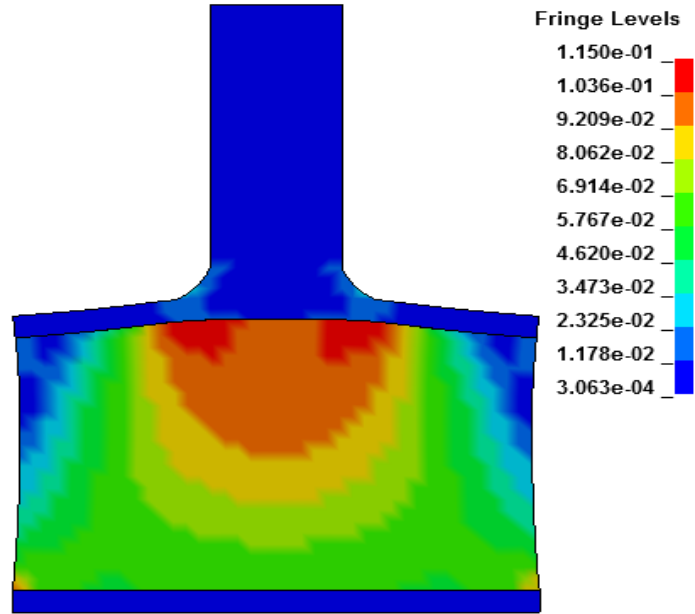
Cıvata bağlantılı yapılar oluşturulmasında geliştirilen bu yöntem mevcut yöntemlere göre önemli avantajlar sunmaktadır;

- Alüminyum köpük üretilmesi esnasında içerisine herhangi bir bağlantı elemanı konulmasına gerek yoktur
- Üretim esnasında konulan bağlama elemanlarında üretilen ve sabit cıvata bağlantı yeri olan alüminyum köpük yapılarda yapacağınız herhangi bir değişiklik sonucunda cıvata bağlantısının yerini değiştirme imkanı yoktur. Bu yöntemde istenilen bölgeye montaj esnasında delik açılıp cıvata bağlantısı yapılabilir.
- Köpürebilir ek malzeme ile bağlantı elemanları ve köpük malzeme arasında tutunmayı arttıracak bir operasyona gerek yoktur. Böyle bir operasyon yüksek sıcaklığa ısıtma gibi ek bir yük getirmekte ve fırın gibi ilave ekipmanlara ihtiyaç durmaktadır.
- Tüm diğer yöntemler pratik değildir ve uygulanabilirliği zor ve yüksek seviyede uzmanlık gerektiren ekip ve ekipmanlar gerektirir.

Yapılan deneysel çalışmada gerilme değeri metal plakalara tutunan alanının ve hücre duvarlarının kalınlığının dolu malzemeye göre düşük olması nedeniyle dolu malzemeye göre düşüktür. O nedenle karşılaştırma referansı olarak birim şekil değiştirmeyi almak daha sağlıklı bir karşılaştırma imkanı verecektir. Gerilme analizleri için de köpük boyutu ve yüzey üzerine dağılımı homojen bir dağılım kabulü yapılarak karşılaştırma yapılmıştır.

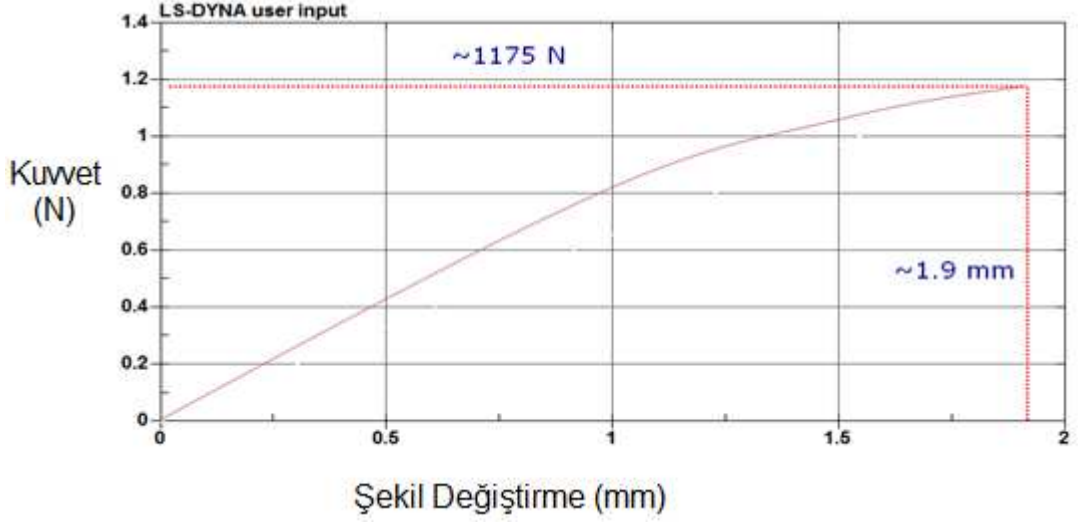
3.4. Cıvata Bağlantılı Köpük Malzeme Yapısının Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

3.4.1. Sandviç Yapılı Köpük Malzeme Analizi



Şekil 3.14. – Sandviç Yapılı Köpük Malzeme Gerilme Analiz Sonucu

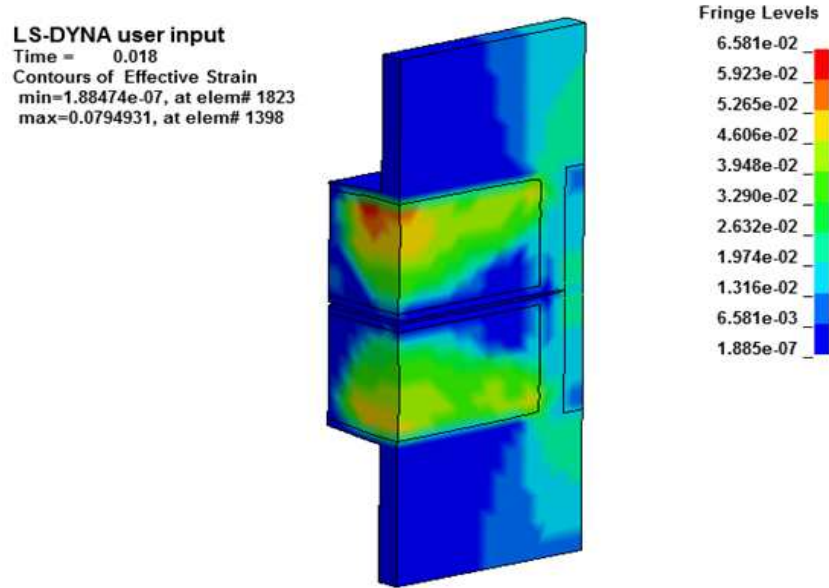
Şekil 3.14’ de görüldüğü gibi birim uzama (gerilme) değeri $\epsilon_{1R} = 0,092 - 0,15$ aralığındadır. Genel olarak çekme testi esnasında köpük malzemenin üst parçaya yakın olan ve merkez kısımlarda en fazla gerilme değerleri elde edilmektedir.



Şekil 3.15. – Sandviç Yapılı Köpük Malzeme Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Kuvvet-Şekil Değişirme Eğrisi

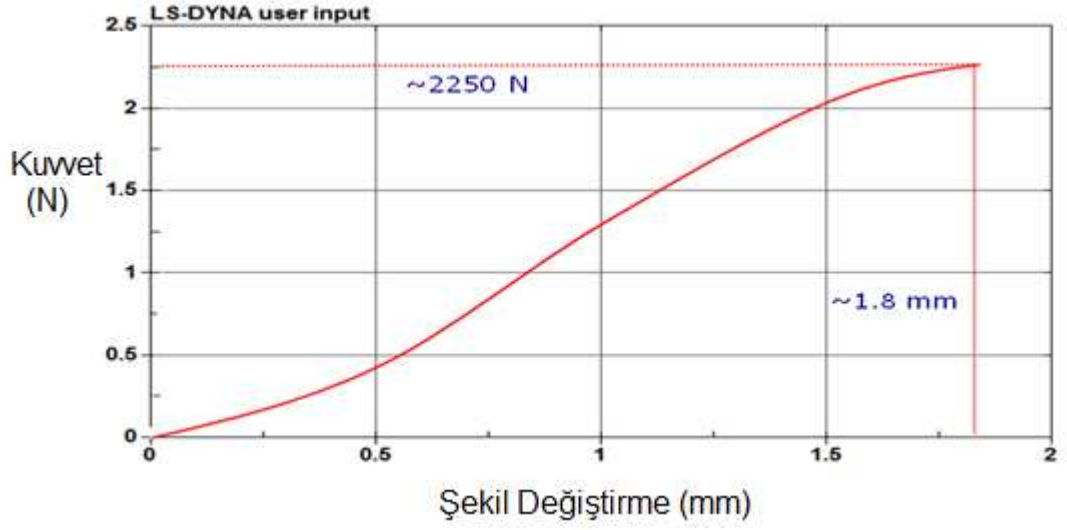
Sonlu elemanlar yöntemi ile sandviç yapılı tek köpük malzemenin modellenmiş, sınır şartları belirlenmiş ve kuvvet – şekil değişirme analizi yapılmıştır. Şekil 3.15’ de görülen grafikte yırtılma öncesi maksimum kuvvet ve şekil değişirme değerleri $F_{max} = 1175 \text{ N}$, $\Delta L = 1,9 \text{ mm}$ görülmektedir.

3.4.2. Cıvata Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzemeler



Şekil 3.16. – Cıvata Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzemelerin Gerinme Dağılımı

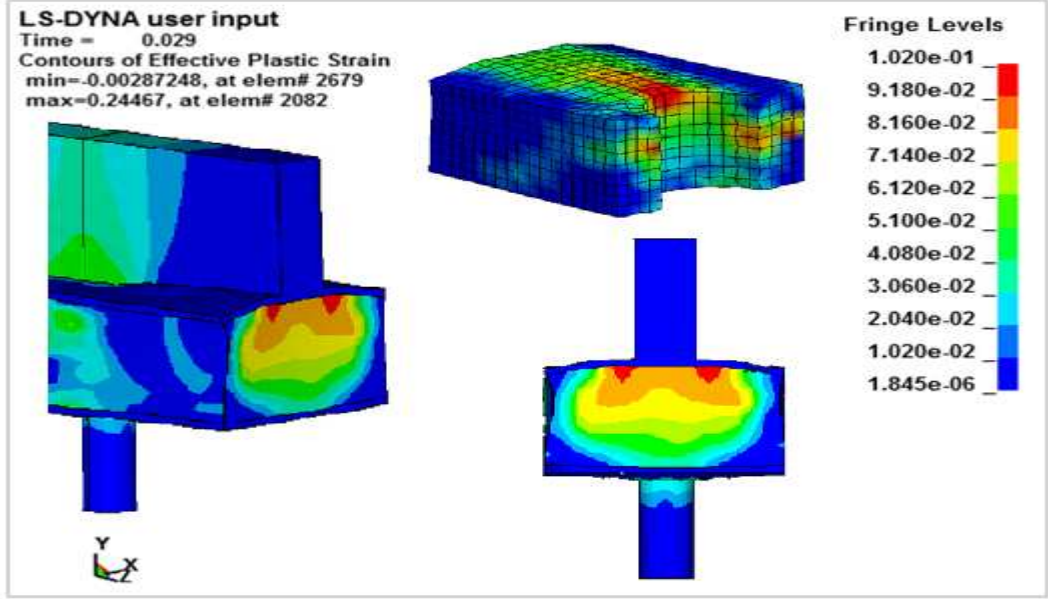
Birbirlerine cıvata ile bağlanan köpük tabakalar iki taraflı çekildiğinde, cıvata ve cıvata dişlerinin açıldığı donmuş sıvı yeterli mukavemeti göstermiş ve parçalar köpük kısımlardan ayrılma eğilimi göstermişlerdir. Şekil 3.16' da görüldüğü üzere maksimum gerinim köpük malzemenin yüzeye yakın bölgelerinde oluşmuştur. Birim uzama (gerinme) değeri $\varepsilon_{2R} = 0,046 - 0,065$ aralığındadır.



Şekil 3.17 – Sandviç Yapılı Cıvata Bağlantılı Köpük Malzemelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Kuvvet-Şekil Değişirme Eğrisi

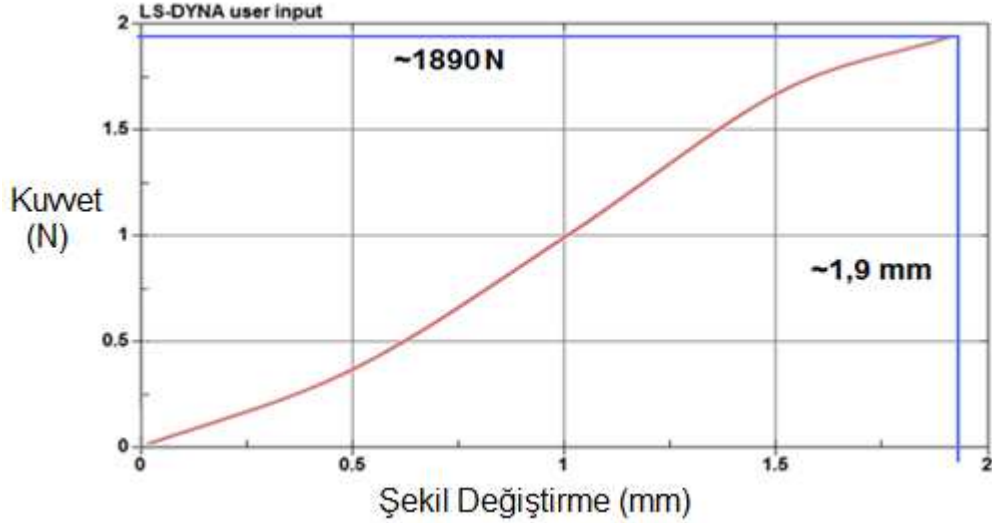
Şekil 3.15' de görülen grafikte yırtılma öncesi maksimum kuvvet ve şekil değişirme değerleri $F_{max} = 2250 \text{ N}$, $\Delta L = 1,8 \text{ mm}$ görülmektedir.

3.4.3. Saplama Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzeme Analizi



Şekil 3.18 – Saplama Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzemenin Gerinme Dağılımı

Merkezden bağlanan köpük malzeme çekildiğinde, cıvata ve cıvata dışlerinin açıldığı alüminyum dolgulu epoksi bölgesi yeterli mukavemeti göstermiş ve parça köpüğün dışı bakan yüzeye yakın bölgelerinden ayrılma eğilimi göstermişlerdir. Şekil 3.18’ de görüldüğü üzere maksimum gerinim köpük malzemenin dış kısmının yüzeye yakın bölgelerinde oluşmuştur.



Şekil 3.19 – Saplama Bağlantılı Sandviç Yapılı Köpük Malzemelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilen Kuvvet-Şekil Değişirme Eğrisi

Şekil 3.19' da görülen grafikte yırtılma öncesi maksimum kuvvet ve şekil değiştirme değerleri $F_{max} = 1890 \text{ N}$, $\Delta L = 1,9 \text{ mm}$ görülmektedir.

Birim uzama (gerinme) değeri $\epsilon_{3R} = 0,81 - 0,1$ aralığındadır.

Çizelge 3.1 – Deneysel Sonuçlar ile Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları Karşılaştırma Değerleri

	Sandviç yapılı köpük malzeme Deney -1	Cıvata bağlantılı köpük malzemeler Deney - 2	Saplama Bağlantılı köpük malzeme Deney- 3
DENEYSEL SONUÇLAR	$F_{max} = 1140 \text{ N}$	$F_{max} = 2250 \text{ N}$	$F_{1max} = 1490 \text{ N}$
	$\Delta L = 1,8 \text{ mm}$	$\Delta L = 1,8 \text{ mm}$	$F_{2max} = 2450 \text{ N}$
	$\epsilon_1 = 0,095$	$\epsilon_1 = 0,047$	$\Delta L_1 = 1,85 \text{ mm}$
			$\Delta L_2 = 2,82 \text{ mm}$
			$\epsilon_{3A} = 0,094$
			$\epsilon_{3B} = 0,14$
SONLU ELEMANLAR ANALİZ SONUÇLARI	$F_{max} = 1175 \text{ N}$	$F_{max} = 2180 \text{ N}$	$F_{max} = 1890 \text{ N}$
	$\Delta L = 1,9 \text{ mm}$	$\Delta L = 1,8 \text{ mm}$	$\Delta L = 1,9 \text{ mm}$
	$\epsilon_{1R} = 0,092 - 0,15$	$\epsilon_{2R} = 0,046 - 0,065$	$\epsilon_{3R} = 0,08 - 0,1$

Çizelge 3.1'de görüldüğü gibi yapılan üç farklı deneyde çekme testinin bittiği yani uygulanan yükün %20 aşağı düştüğü nokta F_{max} olarak belirlendi. Bu perspektiften bakıldığında herhangi bağlantı yapılmayan ve içerisinde kürleşen alüminyum dolgululu epoksi bulunmayan sandviç yapı mukavemeti en düşük parça olarak görülmektedir. F_{max} kuvveti olarak bakıldığında saplama bağlantılı tekli sandviç plaka ve cıvata ile birbirlerine bağlanmış iki köpük malzeme birbirlerine yakın mukavemet değerleri göstermektedir.

Önemli bir diğer karşılaştırma noktası ise aynı yük altında uzama miktarlarıdır. Eğer herhangi bir deneysel çalışmada maksimum yükü referans olarak diğer modellerdeki uzama miktarını karşılaştırdığımızda bu kez belirli yük değerlerine karşılık gelen uzama ile karşılaştırma yapılabilir ki bu sadece kuvvet bazlı yapılan karşılaştırmadan daha anlamlıdır.

Çizelge 3.2 – Eşit Yük Altında Uzama Değerleri Karşılaştırma Tablosu

REFERANS		
Sandviç yapılı köpük malzeme Deney -1	Cıvata bağlantılı köpük malzemeler Deney - 2	Saplama Bağlantılı köpük malzeme Deney- 3
$F_{\max} = 1140 \text{ N}$	$F_{\max} = 1140 \text{ N}$	$F_{\max} = 1140 \text{ N}$
$\Delta L = 1,8 \text{ mm}$	$\Delta L = 0,9 \text{ mm}$	$\Delta L = 1,2 \text{ mm}$

Çizelge 3.2’ de 1140 N yük altında her üç deney içinde uzama değerleri verilmiştir. Bu tabloya göre aynı yük altında en az uzama değeri gösteren $\Delta L = 0,9 \text{ mm}$ ile cıvata bağlantılı köpük malzemelerdir. İkinci sırada $\Delta L = 1,2 \text{ mm}$ uzama değeri saplama bağlantılı köpük malzeme ve en fazla uzama değeri gösteren ise $\Delta L = 1,8 \text{ mm}$ uzama değeri ile tek sandviç yapılı köpük malzemedir. Bu değerler cıvata bağlantısı amacıyla açmış olduğumuz deliklere doldurulan kürleşen alüminyum dolgulu epoksinin yapıyı güçlendirdiğinin bir göstergesidir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Köpük metaller sunduğu benzersiz avantajları ve gelişen üretim teknolojileri ile endüstrinin çeşitli dallarında klasik malzemeler arasında sıyrılarak kendilerine yer bulmaya çalışmaktalar. Her geçen gün artan güvenlik ihtiyacı özellikle araçlarda önem kazanmaktadır. Alüminyum köpük malzemeler darbe sönümleme özelliği nedeniyle bu konuda alternatif malzeme olarak tanımlanabilecek polimerlerden birçok açıdan çok daha üstündür. Alüminyum köpük malzemeler aynı enerjiyi absorbe etmek için gerekli polimer kalınlığından çok daha ince, doğa ile uyumlu, çevre dostu, %100 geri dönüşümlü, zehirli olmayan bir malzemedir. Bunun yanında dünyada her geçen gün artan enerji talebi, enerji kaynaklarını daha verimli ve etkin kılmayı artık bir lüks olmaktan çıkarıp bir zorunluluk haline getirmiştir. Köpük metaller, aynı eğilme momenti değerinde dolu malzemelere göre çok daha hafiftir. Böylece özellikle otomobil, uçak ve gemi gibi ulaşım ve taşıma araçlarında enerjinin daha az kullanımına imkan tanımaktadırlar. Ayrıca takım tezgahlarında da artan daha hızlı ve daha hafif tezgah ihtiyaçlarını karşılamak için ideal kompozisyonu sunarlar. Titreşim ve ses sönümleme, elektromanyetik koruma gibi avantajları birçok alanda daha aktif kullanımına imkan tanımaktadır. Tüm bu avantajları yanında, köpük malzemelerin üretimin klasik malzemelere göre daha karmaşık ve maliyetli olması, özelliklerinin tekrar edilebilirliğinin düşük olması dezavantajlı yanlarıdır. Fakat son yıllarda bu konuda önemli ilerlemeler sağlanmış, otomasyon ile üretim maliyetleri düşürülmüş, yeni gelişen teknikler sayesinde de gözenek boyutu, hücre duvar kalınlığı gibi kronik sorunlar artık bu malzemelerin fonksiyonel alanda kullanılmalılarının önünde bir engel teşkil etmeyecek seviyeye indirilmiştir.

Tüm bu avantaj ve gelişmelere paralel, bu yapay malzeme grubunun kullanım alanlarının yaygınlaştırması için, bu malzemelerin üretim sonrası istenilen tolerans ve kalitede kesilmesi, delinmesi, işlenmesi, kaynatılması, sökülebilir ve sökülemeyen bağlantılarının yapılması gerekmektedir. Bu konu son derece önemlidir. Aksi halde laboratuvar çalışmalarının ve darbe sönümleyici gibi belirli ve kısıtlı bir alan dışında kullanım imkanı yoktur. Köpük metallerde, günümüzde seri üretilebilirliğin ya da biraz

daha zor olan gözenek ve hücre boyutunun kontrolünde sağlanan başarının yanında, üretim sonrası ikincil işlemlerin analizini gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada temel ikincil işlemlerden lazer ile, tel erozyon ile, taş ve testere ile kesim incelenmiş, uygun kesme parametreleri belirlenmiş, kesme yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenip sınıflandırılmış, sökülebilir bağlantı olan cıvata bağlantısından yeni bir yöntem geliştirilmiş, bu yöntemin mukavemet değerlerini belirlemek için çekme testi gerçekleştirilmiş ve bilgisayar ortamında sonlu elemanlar analizi yapılarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İki yılda bir yapılan ve 2007 yılında Kanada'nın Montreal şehrinde 5. si, 2009 yılında Slovakyanın Bratislava şehrinde 6. sı gerçekleştirilen Metfoam 2007 konferansı, köpük metallere ilgili dünyada son derece önemli ve köpük metaller konusuna yön veren yada bu alandaki teknolojik eğilimi gösteren bir organizasyondur. Konferansın değerlendirmesinin yapıldığı kapanış sunumundan bazı önemli başlıklar;

- Alüminyum köpük %51 ile en çok tanınan metal köpük grubudur.
- Önemli sayıda mekanik karakterizasyon sunumu yapılmıştır.
- Önemli araştırma konuları; köpük malzemelerin termal özellikleri, iletkenlikleri ve yapısı şeklindedir.
- Nano gözeneklerle ilgili artan sayıda araştırmalar bulunmaktadır.
- Köpük uygulamalarda enerji/çevre ilişkili artış göstermektedir.
- Patlama ajanları konusunda çok sayıda temel araştırma bulunmaktadır.
- Düşük maliyetli üretim çalışmaları sürmektedir (Alcoa).
- Sürekli iyileştirme çalışmaları artan ivme ile devam etmektedir (Alulight).
- Yüksek hacimli üretim için otomotiv grubuna çok sayıda prototip yapılmaktadır.
- Sürekli döküm geliştirme çalışmaları yapılmaktadır.
- Ekstrüzyon ve kaynak teknikleri çalışmaları devam etmektedir. (Metfoam 2007)

Ayrıca konferans ana konuları;

- Metal köpükler ve gözenekli metal yapılar
- Hücreli metaller ve metal köpürtme teknolojileri
- Hücreli metaller - üretim, karakterizasyon ve uygulama

- Öngörü; köpükler halen merkez konu olmaya devam edecekler fakat diğer hücreli metallere önemi artmaktadır (Metfoam 2007)

Görüldüğü gibi ana konu halen mekanik özellikler, üretim teknolojileri, uygulama sahalarının yaygınlaştırılması, yeni gündeme girmeye başlayan biyomedikal ve nano gözenekli yapılar üzerinde yoğunlaşmaktadır. İkincil işlemler konusundaki çalışmalar, temel konulardaki gelişmeler ve bazı belirsizlikler devam ettiği için henüz istenilen noktada değildir.

MetComb gibi bazı firmalar uyguladıkları nanoteknolojik yöntemlerle gözenek boyutlarındaki stabiliteyi ve kararlı yapıyı sağladıklarını iddia etmektedirler. Bir sonraki adımın da elde edilen bu başarının yaygınlaşması için kullanım alanları yaratmak olduğunu görmek zor değil.

- Burada, kesme, delme, talaşlı imalat, sökülebilir ve sökilemeyen bağlantı imkanlarının incelenmesi
- Belirtilen tüm bu işlemlerin hücre yapısı ve gözenek boyutuna etkisi
- Daha karmaşık şekiller elde etmek yada döküm yoluyla dahi üretimi mümkün olmayan büyük kalınlık değerlerine çıkabilmek için kullanılacak bağlantı yöntemlerinin analizleri önemli noktalardır.

Cıvata bağlantısı ile ilgili yapılan çalışmada dikkate değer olan nokta, küreleşen sıvı metal alüminyum ve epoksi çekme esnasında köpük malzemenin kendi mukavemetine karşılık gelen gerilme değerinin üzerinde köpük metalden ayrılması, mukavemet artışı sağlamasıdır. Geliştirilen yöntem sayesinde köpük malzemenin herhangi bir noktadan cıvata bağlantısı yapılarak köpük malzeme başka bir köpük malzeme ile ya da dolu bir malzeme ile kendi çekme mukavemet değerinin üzerinde bir kuvvet ile bağlanabilir. Elde edilen bu deneysel veriler bilgisayar destekli sonlu elemanlar analiz çalışması ile de desteklenmiştir.

Lazer kesmede elde edilen sonuçlar 20 mm kalınlığa kadar hassas olmayan yerlerde kullanımına imkan vermektedir. Kesme hızı özellikle tel erozyon ile kesme yöntemine göre 200 kata varan yüksek değerlerdedir. Ayrıca herhangi bir şekil lazerle kesme işlemi ile kesilebilirler. Bunun anlamı mekanik kesme yöntemlerinden biri olan testere

ile kompleks şekilli parçaları kesme imkanı yok iken termal bir yöntem olan lazerle her türlü şekil kesilebilmektedir. Fakat kalın ve ayrıca gözenek yapısının korunması gereken hassas uygulamalarda lazerle kesmeye oranla daha yavaş olan tel erozyon (EDM) yöntemi kullanılabilir. Bu alanda kesme üzerine yapılan bir çalışma olmadığı için kesme yüzeylerinin derecelendirmesi 4 grupta yapılmıştır. Dolayısıyla gözenekli yapıda hiçbir değişikliğin olmadığı birinci dereceden serbest yüzeyde bile kullanılmayacak ölçüde kötü yüzey kalitesine sahip gözenekler arasına ergimiş metalin aktığı dördüncü derece kesim kaliteleri tanımlanmış ve kesme işlemleri sonucu elde edilen yüzeylere göre değerlendirilmiştir.

İkincil işlemlerinin yaygınlaşması köpük malzemelerin kullanım alanlarının ve uygulama sahalarının yaygınlaşması için, laboratuarlardan sanayi raflarına, üretim hatlarına bu malzemenin girmesi için anahtar bir yoldur. Bu alanda yapılacak birçok çalışma bulunmaktadır. Talaşlı imalat yöntemleri ile malzemenin işlenebilirliğinin incelenmesi önemli konulardan biridir.

KAYNAKLAR

ANONİM. 2006. Aluminium Foam Products, (Alulight International GmbH) , Product Technical Datasheet, Austria, 2-3 p.

ARIKAN, S. 2005. Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulaması, s.3-4.

AMSTERDAM, E., BABCSAN, N., HOSSON, J., ONCK, P.R., and BANHART, J. 2005. Fracture Behaviour of Metal Foam Made of Recycled MMC by Melt Route, Prous Metals and Metal Foaming Technology, Japan, 589-592.

ASHBY, M.F. 2000. Metal Foams- A Design Guide, Butterworth-Heinemann, USA

BACH, W. and Ing. Fr. 2002. Mechanical Behaviour of Separable Joints of Cellular Metallic Materials, Germany.

BARON, J. 2007, Aluminum Foam Technology Applied To Automotive Design, Canada,

BANHART, J. 2006. Metal Foams: The Mystery of Stabilization, 4 th International Conference, Japan, 75-87 p.

BANHART, J. 2007. Metal Foams – From Fundamental Research to Application, Frontiers in the design of materials, India

BANHART, J. 2008. Aluminium Foam Sandwich Panels: Metallurgy, Manufacture and Applications. Advanced Engineering Materials, 10(9):793-802.

ÇİNİCİ, H. 2004, Toz Metalürjisi Yöntemiyle Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretimi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara

DEGISCHER, P.H. 2002, Handbook of Cellular Metals, Austria

DUARTE, I.M.A., BANHART, J. FERREIRE, A.J.M. and SANTOS M.J.G. 2006, Foaming Around Fastening Elements, Materials Science Forum Vols 514 – 516, İsviçre, 712-717 p.

HUTZLER, S. 1997. The Physics of Foams PhD Thesis, University of Dublin, MIT-Verlag Bremen.

<http://www.metcomb.com/faq.html>, Erişim tarihi: 12.03.2009. Konu: Köpük metal pazar araştırması.

<http://www.metcomb.com/faq.html>, Erişim tarihi: 17.01.2009. Konu: Köpük malzeme kullanım alanları.

<http://www.iwu.fraunhofer.de/schaumzentrum/english/examples-z-slide.htm>, Erişim tarihi: 12.07.2008. Konu: Köpük malzemelerin takım tezgâhlarında kullanımı.

<http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/people/old/dave/dave.html>, Erişim tarihi: 02.01.2008 Konu: Köpük malzemelerin yapıları ve özellikleri.

KÖRNER, C., ARNOLD, M. and SINGER,R.F. 2005. Metal Foam Stabilization by Oxide Network Particles, Material Science and Engineering A, 361(1-2), p28-40

LEFEBVRE, L., BANHARD, J. and DUNAND, D. 2008. Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments, Advanced Engineering Materials, 10(9): 775-787

MORENO, G.F. 2005, Analysis of Metal Foaming Behaviour and Development of Forming Process

OKA, H. 2009, Alüminyum Köpük Metalin Farklı Yükleme Koşullarındaki Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Matematiksel Modellenmesi

TÜRKER, M. 2009, Toz Metalurjisi Yöntemi ile Alüminyum Köpük Üretimi, Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, s 17-39

ÖZGEÇMİŞ

Tayfun SİĞİRTMAÇ 1974, Bursa doğumludur. Lise öğrenimini Bursa Anadolu Lisesinde tamamladı. 1992-1993 öğretim yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne girmeye hak kazandı. 1998 yılında Makine Mühendisi unvanını aldı. Aynı yıl Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 2000 yılında yüksek makine mühendisi unvanını aldı. 2004 yılında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde doktora yapmaya hak kazandı ve halen çalışması devam etmektedir. 1999-2008 yılları arasında Durmazlar Makine Sanayi Şirketinde çalıştı. Oradaki son görevi Araştırma Geliştirme Yöneticisidir. 2008 yılından itibaren Aktaş Grup'ta Teknik Grup Yöneticisi olarak görev yapmaktadır.

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında bana her konuda destek olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan danışman hocam Sn. Prof. Dr. Agah UĞUZ'a ve katkılarını esirgemeyen Sn. Prof. Dr. Cemal ÇAKIR'a çok teşekkür ederim.