

**TİTANYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DİRENÇ NOKTA SERT
LEHİMLEME İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur TOSUN

Danışman

Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2026

Bu tez çalışması 24.FEN.BİL.22 numaralı proje ile AKU BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TİTANYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DİRENÇ NOKTA
SERT LEHİMLEME İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Uğur TOSUN

Danışman

Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2026

TEZ ONAY SAYFASI

Uğur TOSUN tarafından hazırlanan ‘‘Titanium ve Alüminyum Alaşımlarının Direnç Nokta Sert Lehimleme ile Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi’’ adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 14 /01 / 2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

Başkan : Prof. Dr. Şükrü TALAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÇAKMAKKAYA
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Esin Tuğba ŞİMŞEK ÇELİK
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Hafik Kamer Örnek MYO

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

14/ 01 / 2026

Uğur TOSUN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TİTANYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DİRENÇ NOKTA SERT LEHİMLEME İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Uğur TOSUN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

Ti ve Al alaşımları Havacılık endüstriyel alanında sıklıkla kullanılan iki malzeme grubudur. Bu alaşımların farklı noktalarda birleştirilmesi örneğin motor alt saçaklarında nokta kaynağı veya lehimleme yolu ile birleştirilmesi yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu çalışma ile, Ti ve Al alaşımlarının potansiyel uygulamalar için değişik ara tabaka alaşımları kullanılarak birleştirilebilirliğinin araştırılması çalışılmıştır. Bu çalışmada iki tür lehim ara tabaka kullanılmıştır. Düşük Ag içeren Cu-Zn-Al-Ag (50Ag) lehimi ile yüksek Ag içeren Cu-Zn-Al-Ag (70Ag) lehimi ile birleştirilen numunelerde (Al-Al), (Al-Ti), (Ti-Ti) dayanım farklılığı ve metalurjik olarak birleşmeme sorunu gözlemlenmiştir. Buna karşın, aynı aratabaka kullanılarak Ti-Ti birleştirmelerinde ise en az sorun yaşanmış ve en uygun dayanım değerleri elde edilmiştir. Birleştirmelerde arayüzeyinde oluşan lehim bölgesinin en önemli sorunu, lehim ergimesi olup, lehimin ergime sıcaklığının Ag, Zn ve Cu ile düştüğü ve lehime akıcılık kazandırarak birleşme bölgesinden uzaklaşmasında etkili olduğu görülmüştür.

2026, ix + 58 sayfa

Anahtar Kelimeler: Ti6Al4V, Nokta Direnç Sert Lehimleme, Al6061 Alaşımı, Burma Testi, Mikro Yapı Analizi

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Joining of Titanium and Aluminum Alloys by Resistance Spot Brazing and Investigation of Their Mechanical Properties

Uğur TOSUN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

Titanium and aluminium alloys are two material groups frequently used in the aerospace industry. Joining these alloys at different points, for example by spot welding or soldering in engine undercovers, may be more suitable than mechanical joining. This study investigated the joinability of Ti and Al alloys with different interlayer alloys for potential applications. Two types of solder were used in this study. A difference in strength and a metallurgical non-bonding problem were observed between the low Ag-containing Cu-Zn-Al-Ag (50Ag) solder and the high Ag-containing Cu-Zn-Al-Ag (70Ag) solder. In contrast, the Ti-Ti joints experienced the least problems and achieved the most suitable strength values. The most significant problem in the soldered joint region is solder flow, where the solder melting temperature decreases with Ag, Zn, and Cu, causing the solder to flow away from the joint region.

2026, ix + 58 pages

Keywords: Ti6Al4V, Resistance Spot Brazing, Al6061 Alloy, Torsion Test, Microstructural Analysis

TEŞEKKÜR

Bu alıŐma sırasında, deneysel çalıŐmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aŐamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danıŐmanım Sayın Prof. Dr. Şükrü Talaş'a her konuda öneri ve eleŐtirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaŐlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı eŐim Zeynep Melike Tosun'a her konuda hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen anne ve babama ve oyun döneminde olan ve tez çalıŐmamda bana zorluk çıkarmayan oğlum Kuzey Tosun'a teşekkür ederim.

Uğur TOSUN
Afyonkarahisar 2026

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	2
2.1 Titanyum.....	2
2.1.1 Titanyum ile İlgili Genel Bilgiler.....	2
2.1.2 Titanyumun Kullanım Alanları.....	2
2.1.3 Titanyum Kullanım Miktarları.....	4
2.1.4 Titanyum Üretimi.....	4
2.1.5 Dünya Titanyum Üretimi	5
2.1.6. Ti6Al4V (Ti64) Alaşımı	5
2.2 Alüminyumun Tarihçesi ve Özellikleri	6
2.2.1 Alüminyum Alaşımları	7
2.2.2 Alüminyum Üretimi.....	11
2.2.3 Alüminyumun Kullanım Alanları	12
2.3 Birleştirme Yöntemleri	13
2.3.1 Mekanik Birleştirme	15
2.3.2 Yapıştırıcı ile Birleştirme.....	16
2.3.3 Lehimleme ve Sert Lehimleme	16
2.3.4 Kaynaklama	16
2.3.5 Katı Hal Birleştirme	16

2.4 Sert Lehimleme	17
2.4.1 Sert Lehim Dolgu Malzemeleri.....	18
3. MATERYAL ve METOT	20
3.1 Numunelerin Üretimi.....	20
3.2 Yapısal ve Mekanik Karakterizasyon Araçları.....	23
3.3 Ni ve Cu Kaplama	25
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	26
4.1 Kullanılan Ti6Al4V Al6061 ve Lehimlerin Karakterizasyonu	26
4.1.2 Ti6Al4V ve Al6061 Alaşımlarının Karakterizasyonu	26
4.1.3 CuZnAl-Ag50 ve CuZnAl-Ag70 Lehimlerinin Karakterizasyonu	27
4.2 Ara Tabaka Sert Lehimlemeli ve Lehimsiz Çalışmaları.....	32
4.2.1 Ara Tabakasız Birleştirme Çalışması.....	32
4.2.2 Sert Lehim Ara Tabakalı Birleştirmeler.....	36
4.2.2.1 50Ag Lehimini ile Yapılan Birleştirmeler.....	36
4.2.2.2 70Ag Lehimleri ile Yapılan Birleştirmeler	40
4.2.2.3 Nikel ve Bakır Kaplamalı Birleştirmeler	43
4.3 Mekanik Özellikler	43
4.3.1 Ara Tabaka Lehim Kullanılmadan Yapılan Birleştirmeler.....	43
4.3.2 50Ag ve 70Ag Sert Lehim Kullanılarak Yapılan Birleştirmeler	45
5. SONUÇLAR.....	50
6. KAYNAKLAR.....	52
ÖZGEÇMİŞ.....	58

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Ti	Titanyum
Al	Alüminyum
Ni	Nikel
Cu	Bakır
Ag	Gümüş
Si	Silisyum
Mg	Magnezyum
Mn	Manganez
Fe	Demir
Li	Lityum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
NaOH	Sodyum Hidroksit
NaAlO ₂	Sodyum Alüminat
H ₂ O	Su
Zn	Çinko
Ar	Argon
°C	Santigrad
α	Alfa Ferrit
γ	Östenit (Gama Ferrite)
β	Beta Fazı
Fe ₃ C	Sementit
T	Sıcaklık
t	Zaman
CO ₂	Karbondioksit
V	Vanadyum
C	Karbon
O	Oksijen
H	Hidrojen
N	Azot

Kısaltmalar

COD	Crystallography Open Database
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EDX	Enerji Dağılımı X-ışını Analizi
Fe-C	Demir Karbon
IMC	İntermetalik Kompozitler
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-ışını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.	9
Şekil 2.2 Alüminyum alaşımlarında kullanılan alaşım elementleri.	10
Şekil 2.3 Alüminyumda kullanılan alaşım elementlerinin sıcaklığa bağlı çözünürlükleri	10
Şekil 2.4 Al-Cu denge diyagramı.	11
Şekil 2.5 Birleştirme Yöntemleri: a) Mekanik Birleştirme, b)Yapıştırıcı ile Birleştirme, c)Lehimleme ve Sert Lehimleme, d) Kaynaklama, e) Difüzyon Bağlanması	15
Şekil 2.6 Gümüş – Bakır Faz Diyagramı.	19
Şekil 4.1 Ti6Al4V ticari sac malzemesinin XRD analiz grafiği	26
Şekil 4.2 Al6061 sac malzemenin XRD grafiği	27
Şekil 4.3 a) Zn-Al ve b) Zn-Cu faz diyagramları	28
Şekil 4.4 a) Ag50 lehimine ait XRD analiz ve b) 800°C'ye kadar DSC sonuç grafiği..	30
Şekil 4.5 a) Ag70 lehimine ait XRD analiz ve b) 800 °C'ye kadar DSC analiz sonucu	31
Şekil 4.6 Al-Al, Ti-Ti ve Ti-Al bağlantılarının yüksek büyütmedeki SEM resimleri ve EDX çizgi analizleri	35
Şekil 4.7 50Ag lehimini kullanılarak yapılan birleştirmeler Ti-Al bağlantısının Ti (a,b) ve Al (c,d) tarafının SEM görüntüleri	39
Şekil 4.8 50Ag lehimini ile yapılan Al-Al bağlantısının SEM görüntüsü ve çizgi analizi	40
Şekil 4.9 70Ag ile yapılmış Ti-Al (a, b) ve Al-Al (c, d) bağlantısının SEM görüntüsü ve EDX çizgi analizi	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Titanyuma ait bazı fiziksel özellikler	3
Çizelge 2.2 Ti üretiminin tüketim dallarına göre dağılımı.	3
Çizelge 2.3 Ülkelere Göre Titanyum Konsantre Cevheri Üretimi	4
Çizelge 2.4 Ti6Al4V alaşım elementlerinin yüzde değeri	5
Çizelge 2.5 Titanyum alaşımı dahil bazı malzemelerin mekanik özellikleri.	6
Çizelge 2.6 Alüminyum metalinin fiziksel özellikleri.	7
Çizelge 2.7 Dövme alüminyum alaşımları için sertleştirme mekanizmaları.....	8
Çizelge 3.1 Ti6Al4V ve Al 6061 alaşımının ve üretilen lehimlerin kimyasal bileşenleri	20
Çizelge 4.1 Ara tabakasız üretilen bağlantıların burma kopma kuvveti ve kopma açısı değerleri	44
Çizelge 4.2 50Ag ve 70Ag lehimleri ile üretilen bağlantıların burma kopma kuvveti ve burma kopma açısı değerleri	46

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 a) 50Ag ve b) 70Ag sert lehimle, kendi aralarında çapraz sert lehimleme yapılan sacların görüntüsü	21
Resim 3.2 Birleştirme işleminde kullanılan direnç nokta kaynak makinası	21
Resim 3.3 Çalışmada kullanılan lehimlerin üretildiği pota.....	22
Resim 3.4 Kullanılan lehimlerin haddelendiği haddeleme ünitesi.....	22
Resim 3.5 XRD analizinde kullanılan Bruker Advance D8 cihazının görüntüsü.....	23
Resim 3.6 Mikroyapı analizi için kullanılan elektron mikroskopu görüntüsü.....	23
Resim 3.7 DSC cihazı	24
Resim 3.8 Burma testi cihazı ve yazılım arayüzü	24
Resim 3.9 Rodaj kaplama cihazı.....	25
Resim 4. 1 Ti-Ti ve Al-Al ara tabakasız yapılan birleştirmeleri.....	33
Resim 4.2 50Ag ara tabaka lehimli ile yapılan Ti-Ti, Ti-Al ve Al-Al birleştirmeleri	37
Resim 4.3 70Ag dolgu malzemesi ile farklı malzemelerin birleştirilmesi.....	41
Resim 4.4 Nikel ve Bakır kaplama ile yapılan birleştirmeler	43
Resim 4.5 50Ag (a,b) ve 70Ag (c,d) sert lehimleri ile yapılan bağlantıların SEM görüntüleri.....	47

1. GİRİŞ

Direnç nokta lehimleme (Resistance Spot Brazing), özellikle havacılık ve otomotiv uygulamalarındaki hafif malzeme ihtiyacından dolayı titanyum (Ti) ve alüminyum (Al) alaşımlarının birleştirilmesinde etkili bir yöntemdir. Proses, Ti ve Al arasındaki termofiziksel özellikler ve kristal yapılarıdaki önemli farklılıklar nedeniyle zorluklarla karşı karşıyadır ve bu, mekanik özellikleri olumsuz yönde etkileyen kırılmalı intermetalik bileşiklerin (IMC'ler) oluşumuna yol açabilir. Ancak, iyi bir sert lehimlemede intermetalik oluşumu ile mümkün olmaktadır.

Direnç nokta sert lehimleme ve ilgili teknikler, Ti ve Al alaşımlarının birleştirilmesi için geçerli yöntemler, devam eden araştırmalar, bağlantı bütünlüğünü ve mekanik performansı iyileştirmek için parametreleri optimize etmeye odaklanmaktadır. Mikroyapısal değişiklikleri anlamak ve intermetaliklerin oluşumunu kontrol etmek; hafif ve yüksek mukavemetli malzemelerin gerekli olduğu uygulamalarda güvenilir ve güçlü bağlantılar elde etmek için çok önemlidir. Direnç nokta lehimleme ile yapılan çalışmalar genellikle sıklıkla bulunan ara yüzey malzemeleri ile yapılmaktadır. Örneğin Ni ara tabaka kullanımı oldukça yaygın bir şekilde yapılmış olup, bunun yanında Cu ve alaşımlarının kullanımı da yaygın bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sadece kaynak akımının uygulanıp yapılacağı direnç nokta sert lehimleme çalışması yapılmıştır. Sadece kaynak akımı kontrolü ile sağlanan sistemde ara tabaka bileşimi yüksek gümüş içeren (ağ.% 11 ve ağ.% 21 Ag) içinde bakır, nikel, çinko olan alaşım kullanılmıştır.

Bu açıdan düşünüldüğünde çalışmanın oldukça özgün olduğu düşünülmektedir. Diğer bir özgünlük katacak kısım ise, nokta kaynak yapılacak olan yüzeylerin kaplamalı ve kaplamasız olarak nokta kaynaklanacak olmasıdır. Nokta sert lehimleme işleminden önce, yüzeyler Ni, Cu kaplanacak ve iki amaca hizmet edecektir. Ni difüzyon kapasitesi olan element olup, Cu ise intermetalik oluşumunu zorlaştırıcı olarak kullanılacaktır. Ti ve Al alaşımları havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan iki malzeme grubudur. Bu alaşımların değişik noktalarda birleştirilmesi örneğin motor alt saçaklarında nokta kaynağı veya lehimleme yolu ile birleştirilmesi mekanik olarak birleştirmeye karşı daha uygun olabilecektir. Bu çalışma ile, Ti ve Al alaşımlarının potansiyel uygulamalar için değişik ara tabaka alaşımları ile birleştirilebilirliğinin araştırılması yapılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Titanyum

2.1.1 Titanyum ile İlgili Genel Bilgiler

Titanyum elementi 1800'lerin sonlarında keşfedilmiştir ve 1950'lerde Amerika Birleşik Devletleri'nde ticari kullanımına başlanmıştır (Greitemeier vd. 2016). Bu element dünyada demir, magnezyum ve alüminyumdan sonra en çok bulunan elementtir. Dünyadaki metallerin %6'sını oluşturur. Ayrıca krom elementinin 20, nikelin 30, bakırın ise 60 katıdır (Zhecheva vd. 2005). Doğada saf halde bulunmaz. Titanyum hidrojen, oksijen ve nitrojenle kolayca reaksiyona girer ve metal olarak bulunması çok zordur. Titanyum genellikle minerallerle birlikte bulunur (Oyar 2015). Titanyum'un %98'i titanyum dioksit veya TiO_2 bileşiği formundadır. Rutil cevheri madeni çıkarılır ve işlenir. İşlemesi diğer metallerin birçoğuna göre çok zordur. Bunun nedeni ise cevher ve madenlerin çok geniş bir alana yayılmış olmasıdır (Weissbach 1993). Titanyum elde etmek için argon ve helyum gazları kullanılır ve magnezyumun erime sıcaklığına kadar ısıtılır. Titanyum dioksit sıvı olduğundan magnezyumla reaksiyona girerek titanyumu oluşturur (Yaman 2018). Titanyum hafiftir ancak mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Örneğin çeliğin yoğunluğunun yarısı kadardır ancak özgül mukavemeti çeliğe göre daha fazladır (Henriques vd. 2010). Ayrıca titanyumun yorulma mukavemeti diğer metallere göre oldukça yüksektir (Anselme ve Bigerelle 2000). Ancak diğer metallere göre daha düşük bir termal genleşme katsayısına sahiptir. Bu özelliği sayesinde daha yüksek sıcaklık gerektiren alanlarda tercih edilir (Ensarioğlu ve Çakır 2005). Titanyumun çok iyi bir korozyon direncine sahip olmasının nedeni, reaktif bir malzeme olması ve oksijenin reaksiyonu nedeniyle hızla pas tabakası oluşturmasıdır. Titanyumun bazı fiziksel özellikleri aşağıdaki (Çizelge 2.1)'de gösterilmektedir (İnt.Kyn.4).

2.1.2 Titanyumun Kullanım Alanları

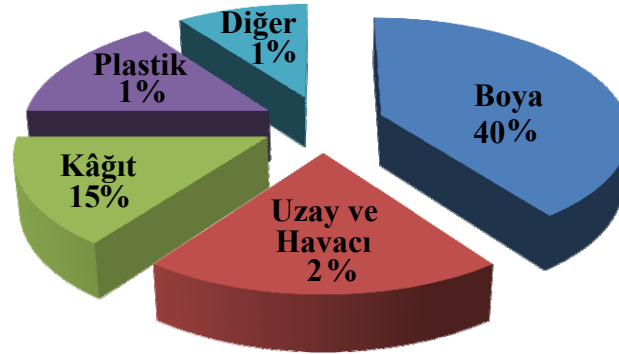
Titanyum ve alaşımları, havacılık, uzay, otomotiv, biyomedikal, kâğıt, boya ve plastik endüstrisinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Son yıllarda hafif olması, işlenmesinin kolay olması ve yakıt ekonomisi sağlaması nedeniyle otomotiv sektöründe de kullanımı

hızla artmaya başlamıştır (Yaman 2018). Tuz ve asitlere karşı dayanıklılığından dolayı denizcilik sektöründe de kullanılmaktadır. Titanyum ve nikelden yapılan nitinol alaşımı güçlü bir hafızaya sahiptir. Şekli bozulursa ve nitinol alaşımından yapılmış parçalar tekrar ısıtılırsa orijinal şekline dönmektedir. Nitinol alaşımı sıklıkla tıp ve havacılık endüstrilerinde kullanılmaktadır (İnt.Kyn.3). Boya sektöründe titanyum beyazı adı altında kullanılmaktadır. Titanyum cevherinin %91'i pigment endüstrisinde tüketilmekte ve kullanılmaktadır. Bunların dışında kozmetik, renkli cam, suni ipek, deri ve kumaş boyama, beyaz mürekkep, seramik cam ve kâğıt endüstrisi gibi birçok alanda titanyum kullanılmaktadır (İnt.Kyn.3). Çizelge 2.1'de Titanyuma ait bazı fiziksel özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.1 Titanyuma ait bazı fiziksel özellikler (İnt.Kyn.4).

Yoğunluk	4,506 g.cm ⁻³
Erime Noktası	1668 °C
Kaynama Noktası	3287 °C
Erime	14,15 kJ·mol ⁻¹
Buharlaşma Isısı	425 kJ·mol ⁻¹
Isıl İletkenlik	(300 K) 21.9 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Elektrik Direnci	(20 °C) 0,420 µΩ.m
Elastisite Modülü	116 GPa
Bulk Modülü	110 GPa

Çizelge 2.2 Ti üretiminin tüketim dallarına göre dağılımı (DPT raporu 2001).



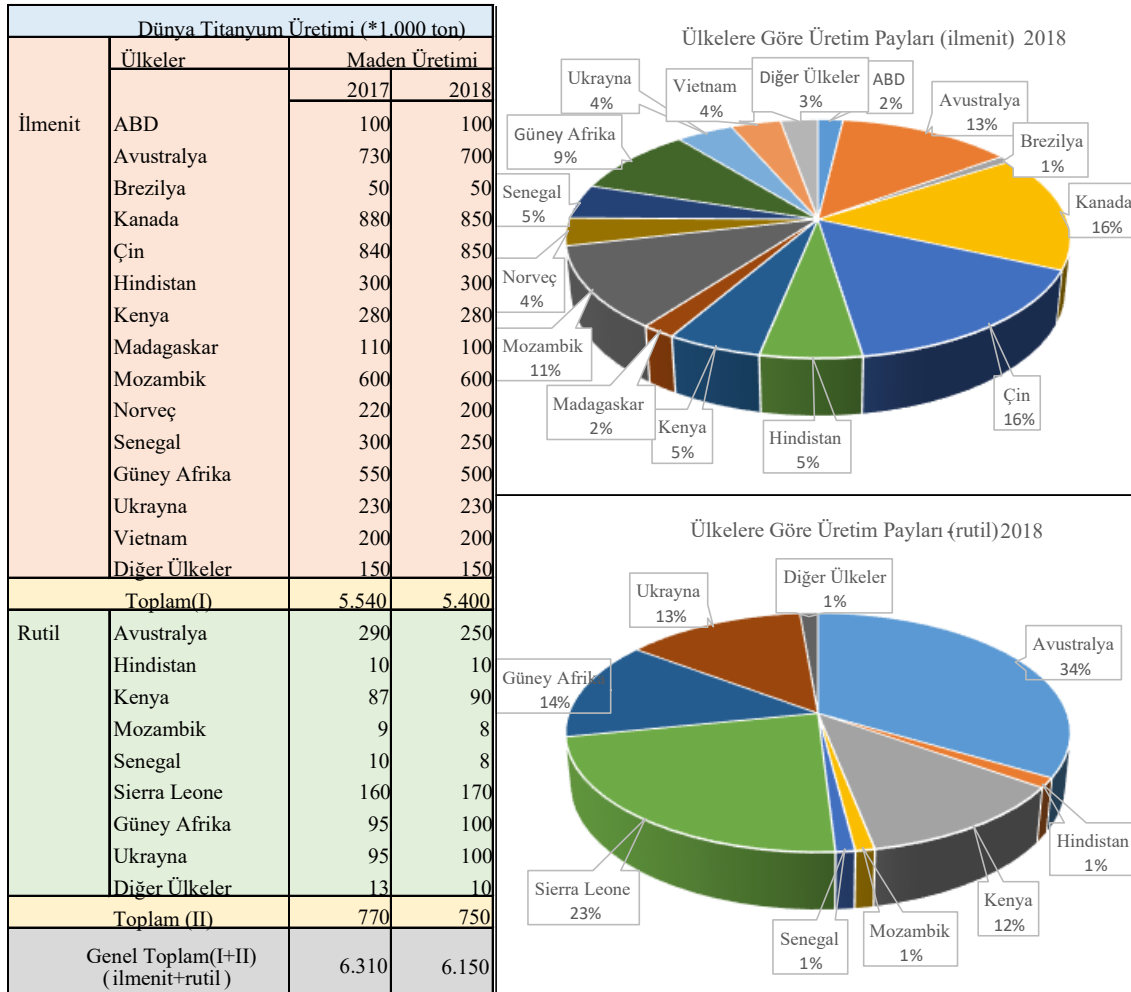
2.1.3 Titanyum Kullanım Miktarları

Dünyada titanyum üretimi ortalama olarak 3-3,5 milyon ton arasında değişmektedir. Titanyumun tüketim dallarına göre dağılımı Çizelge 2.2' de gösterilmektedir.

2.1.4 Titanyum Üretimi

Dünyada magmatik titanyum yatakları üreten iki aktif maden bulunmaktadır. Norveç'teki Tellness ve Kanada'da bulunan Lac Tio Madenidir. Dünyada titanyum üretiminin %32'sinin bu iki madenden sağlandığı tahmin edilmektedir geri kalan %68'lik kısmı ise yüksek tenörlü ilmenit rezervlerinden, rutil içerikli ağır mineral rezervlerinden ve plaser rezervlerinden üretilmektedir (Woodruff vd. 2017). Çizelge 2.3'te Ülkelere Göre Titanyum Konsantre Cevheri Üretimi verilmiştir.

Çizelge 2.3 Ülkelere Göre Titanyum Konsantre Cevheri Üretimi (USGS 2019).



2.1.5 Dünya Titanyum Üretimi

Çizelge 5'te görüldüğü gibi ilmenit minerali içerikli rezervlerden üretimde 2018 yılında Kanada'da 850.000 ton Çin'de 850.000 ton Avustralya'da 700.000 ton ve Mozambik'te 600.000 ton; rutil içeren yataklarda ise Avustralya'da 250.000 ton, Sierra Leone'da 170.000 ton, Güney Afrika'da 100.000 ton Ukrayna'da ise 100.000 ton rezerv bulunmaktadır. İlmenit içeren yataklarda 2017 yılında dünya genelinde toplam üretim miktarı 5,54 milyon ton olmuştur (USGS 2019). 2018 yılında üretim ise 5,40 milyon ton olmuştur. Rutil içeren yataklarda ise dünya üretim toplamı 2017 yılında 770 bin ton, 2018 yılında ise 750 bin ton üretim gerçekleşmiştir. Dünya genelinde İlmenit ve Rutil içeren rezervlerin toplam üretimi ise 2017 yılında 6,31 milyon ton, 2018 yılında ise 6,15 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Titanyum konsantre minerallerinin 2012-2016 yılları arasındaki üretiminin yaklaşık 7 milyon ton olduğu, büyük bir kısmının (5 milyon tonun üzerinde) gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler tarafından üretildiği bilinmektedir (İnt.Kyn.6).

2.1.6. Ti6Al4V (Ti64) Alaşımı

Ti6Al4V alaşımı sanayi sektöründe Ti64 olarak da bilinmektedir. Birden fazla farklı metalden yapılan alaşım sayesinde mekanik özellikleri büyük ölçüde artırılır. Ti6Al4V alaşımının isminden de anlaşılacağı gibi alüminyum, demir ve vanadyum çok önemli metallerdir. Çizelge 2.4'te Ti6Al4V alaşım elementlerinin yüzde değeri verilmiştir.

Çizelge 2.4 Ti6Al4V alaşım elementlerinin yüzde değeri (İnt.Kyn.5).

Element	%
Ti	88,5-90,5
Al	5,5-6,5
V	3,5-4,5
Fe	0,25
O	0,13
C	0,08
N	0,05
H	0,0125

Ti6Al4V alaşımı yaygın kullanılan bir titanyum alaşımıdır. Bu alaşımı elde etmek için titanyum üretiminin %50 si kullanılmaktadır (Fujii 1998). Ayrıca mevcut mukavemet değerleri ısıtılma işlemi kullanılarak iyileştirilebilmektedir. Aşağıdaki Çizelge 2.5'te gösterildiği gibi Ti6Al4V, saf titanyum ve Ti13Nb13Zr gibi alaşımlar karşılaştırıldığında tüm testlerde ve mekanik özelliklerde en yüksek değerlerin Ti6Al4V alaşımında olduğu görülmüştür (Zhou vd. 2019). Çizelge 2.5'te Titanyum alaşımı dahil bazı malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.5 Titanyum alaşımı dahil bazı malzemelerin mekanik özellikleri (Zhou vd. 2019).

Alaşım türü	En yüksek çekme dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Elastik Modül (GPa)	Uzama ~ (%)	Yorulma Dayanımı (MPa)
Saf Titanyum	990	792	100	6	323
Ti6Al4V	1334	1110	107	6	360
Ti13Nb13Zr	1020	794	67	5	272

2.2 Alüminyumun Tarihçesi ve Özellikleri

Al ile gösterilen saf alüminyum mavi-beyaz bir metaldir. Molekül ağırlığı 26.981 g/mol'dür. Alüminyum ilk olarak Sir Humphrey Davy tarafından alüminyumun oksit bileşiğinden ayrılmasıyla elde edilmiştir. Bu element, yer kabuğunda %8 oranında oksijen ve silisyum elementinden sonra yer yüzünde en çok bulunan üçüncü element olmasına rağmen, bu elementin özelliklerinden dolayı sanayi alanında üretimini 1886 yılında Paul T. Heroult ve Charles M. Hall tarafından üretimine başlanmıştır. Alüminyum üretiminin bulunmasından bu yana dünyada yıllık 13 ton olan üretim hacmi 50 milyon tonun üstüne çıkmıştır. Alüminyumun üretim başlangıcında birim fiyatı gümüş, altın gibi kıymetli madenler ile eşdeğer iken günümüzde üretimin artmasıyla bakır birim fiyatı seviyesine gerilemiştir (Anonim 2003).

Üretim miktarı olarak baktığımızda alüminyum demirden sonra ikinci sırada yerini almıştır. Aynı zamanda hafiflik, işlenme kolaylığı, taşınabilirlik, dayanıklılık ve korozyona karşı direnç gibi diğer metallere göre avantajlarından dolayı birçok alanda

kullanılan metaldir. Saf veya alaşım yapılarak kullanılabilir. Korozyon direncini arttırmak, ısı kaybını azaltmak, akışı, kaynaklanabilirliği ve işleme kolaylığını geliştirmek için alüminyuma birçok katkı maddesi eklenebilir (DPT raporu 2001, Yağcıgil 1997). Çizelge 2.6'da Alüminyum metalinin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.6 Alüminyum metalinin fiziksel özellikleri (Mostefa vd. 2012, Alam ve Ansari 2017).

Malzeme	Değerler
Atom Ağırlığı	26,98
Yoğunluk	2.7 g/cm ³
Poisson Oranı	0,35
Kristal Yapısı	YMK
Ergime Noktası	660
Kaynama Noktası	2519

2.2.1 Alüminyum Alaşımları

Son yıllarda teknolojinin ilerlemesiyle birlikte alüminyum alaşımları yüksek mukavemet, tokluk, düşük yoğunluk ve yüksek aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı geleneksel malzemelere göre kullanımı oldukça artmıştır. Alüminyum alaşımının özellikle yüksek teknoloji yapılarında kullanımı hızlı bir şekilde artmaktadır. Önemli rolü ve ekonomik faydasının yanı sıra kullanımında çevresel etkiler de tespit edilmiştir. Alüminyum alaşımı ile yapılan ürünlerde malzeme ömrünün artması, enerji tasarrufu ve bakım maliyetlerinin düşük olması bu alaşımla yapılan ürünlerin arttırılmasındaki temel faktörlerden biridir (Nturanabo vd. 2015). Bu özelliklerinden dolayı alüminyum alaşımları otomotiv, havacılık, denizcilik ve inşaat sektörlerinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları bakır, magnezyum, çinko, silisyum, manganez ve lityum gibi elementlerle alaşım yapmaktadır. Krom, titanyum zirkonyum, kurşun, bizmut ve nikel gibi elementler az miktarda eklenir. 300'den fazla alüminyum alaşımı vardır ve bunların 50'si yaygın olarak kullanılmaktadır (Alam ve Ansari 2017). Alüminyum alaşımları iki gruba ayrılır. Dövme alaşımları ve döküm alaşımları. Bu işlemler arasında çözelti ısıl işlemi, su verme ve çökeltme veya yaşlandırma yer almaktadır. Bazı döküm ve dövme alaşımları ısıl işlem yapılabilir olarak kabul edilmektedir. Dövme alaşımlarını sınıflandırmak için dört katmanlı bir sistem kullanılmaktadır.

- 1xxx: Alaşıma uğramamış(saf) kompozisyon öncelikle kimyasal ve elektrik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.
 - 2xxx: Bakır, alaşımlarda kullanılan en yaygın alaşım elementidir ve yüksek mukavemeti nedeniyle uçaklarda yaygın olarak kullanılmaktadır.
 - 3xxx: Manganez alaşımlarda kullanılan en önemli alaşım elementidir ve sıklıkla mimari yapılarda kullanılmaktadır.
 - 4xxx: Silisyum, alaşımlarda kullanılan ve kaynak çubuklarında kullanılan birincil alaşım elementidir.
 - 5xxx: Alaşımda bulunan magnezyum öncelikli olarak kullanılan alaşımdır, botlarda ve buna benzer araçlarda çevresel durumlardan dolayı kullanılmaktadır.
 - 6xxx: Alaşımda bulunan magnezyum ve silisyum öncelikli olarak kullanılan alaşımdır, mimari yapılarda ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır.
 - 7xxx: Çinko, alaşımlarda kullanılan en önemli elementtir. Ayrıca bakır, magnezyum, krom ve zirkonyum ile alaşım oluşturulabilir. Yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılır ve uçaklarda yaygın olarak tercih edilmektedir. 7xxx alüminyum serisi mukavemeti en yüksek alaşımdır.
 - 8xxx: Çeşitli bileşimlerle karakterize edilen bir alaşımdır. 8xxx serisi alaşımları içerisinde demir, kalay veya lityum içermektedir.
 - 9xxx: Önümüzdeki zamanlarda oluşturulacak alaşımlar için
- Isıl işlem uygulaması yapılabilir dövme alaşımları arasında 2xxx, 6xxx, 7xxx ve 8xxx alüminyum alaşımları bulunmaktadır. Dövme alaşımları için sertleştirme mekanizmaları Çizelge 2.7’de gösterilmektedir.

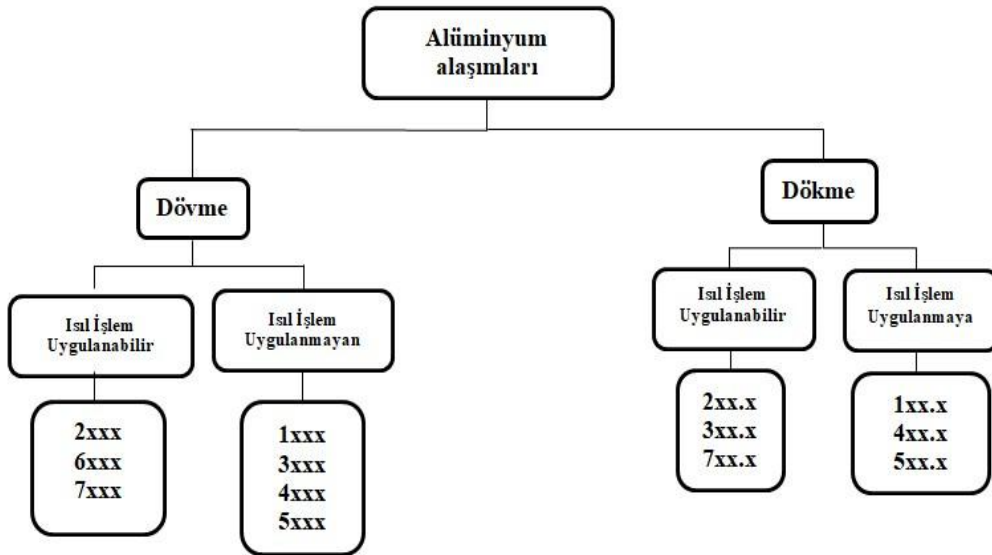
Çizelge 2.7 Dövme alüminyum alaşımları için sertleştirme mekanizmaları

Deformasyon Sertleşme Alaşımları	Çökelti Sertleşme Alaşımları
Pure Al	Al-Cu
Al-Mn	Al-Cu-Mg
Al-Si	Al-Cu-Li
Al-Mg	Al-Mg-Si
Al-Fe	Al-Zn
Al-Fe-Ni	Al-Zn-Mg Al-Zn-Mg-Cu

Dökme alüminyum alaşımları üç basamaklı ve ondalık değerle gösterilir;

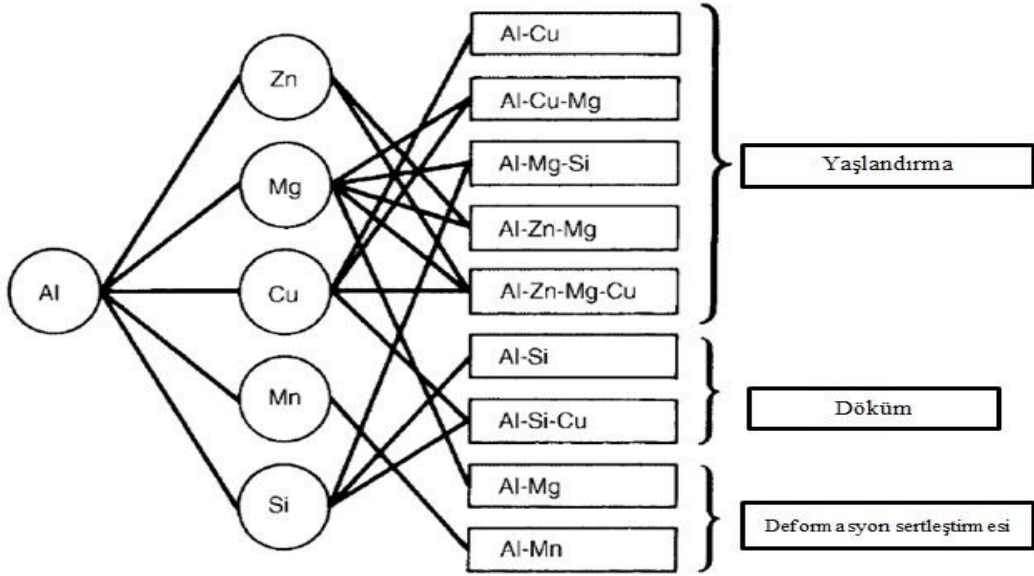
- 1xx.x: Alaşım yapılmamış (saf) kompozisyon, genellikle pervaneleri üretirken kullanılmaktadır.
- 2xx.x: Bakır, alaşımda kullanılan ana alaşım elementidir. Diğer alaşım elementleriyle hazırlanabilmektedir.
- 3xx.x: Silisyum, alaşımda kullanılan ana alaşım elementidir. Bakır ve magnezyum elementleriyle hazırlanabilmektedir.
- 4xx.x: Silisyum, alaşımda kullanılan ana alaşım elementidir.
- 5xx.x: Magnezyum, alaşımda kullanılan ana alaşım elementidir.
- 6xx.x: Kullanılmamaktadır.
- 7xx.x: Çinko, alaşımda kullanılan ana alaşım elementidir. Bakır ve magnezyum elementleriyle hazırlanabilmektedir.
- 8xx.x: Kalay, alaşımda kullanılan ana alaşım elementidir.
- 9xx.x: Kullanılmamaktadır.

Isıl işlem uygulanabilir döküm alaşımları arasında 2xx, 3xx ve 7xxx serisi bulunmaktadır. Dökme alaşımlarının yanı sıra dövme alaşımlarında daha fazla silisyum kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması Şekil 2.1’de gösterilmektedir.

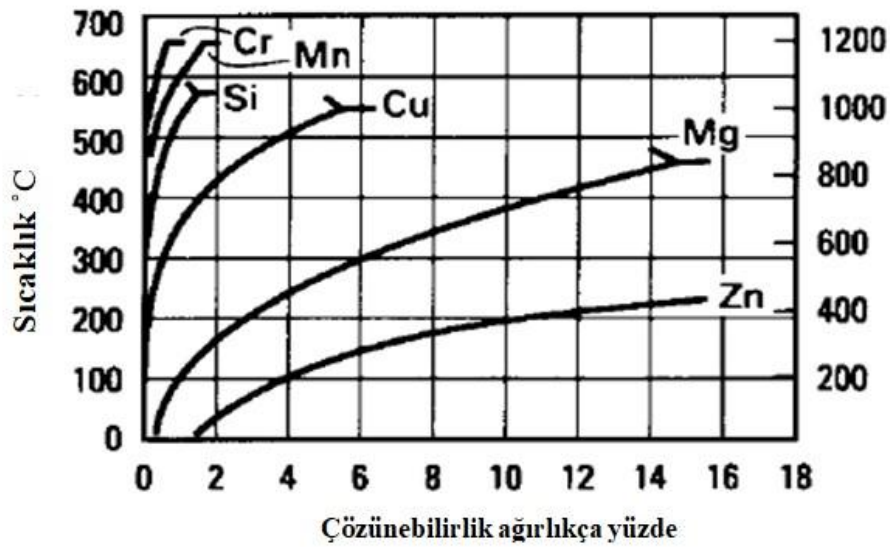


Şekil 2.1 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Nturanabo vd. 2015).

Alaşım yapmanın ana nedeni mukavemeti, sertliği, aşınma direncini, sürünmeyi ve yorulmayı arttırmaktır. Buna benzer özellikleri geliştirmek için daha farklı alaşım elementleri ve alternatifleri etkilidir. Alaşım elementlerinden bazıları artan mukavemetleri nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu elementler; silisyum, çinko, manganez, magnezyum ve bakırdır (Şekil 2.2). Tüm bu elementler alüminyumda katı bir çözünürlüğe sahiptir ve sıcaklık arttıkça çözünürlük artar. (Şekil 2.3).

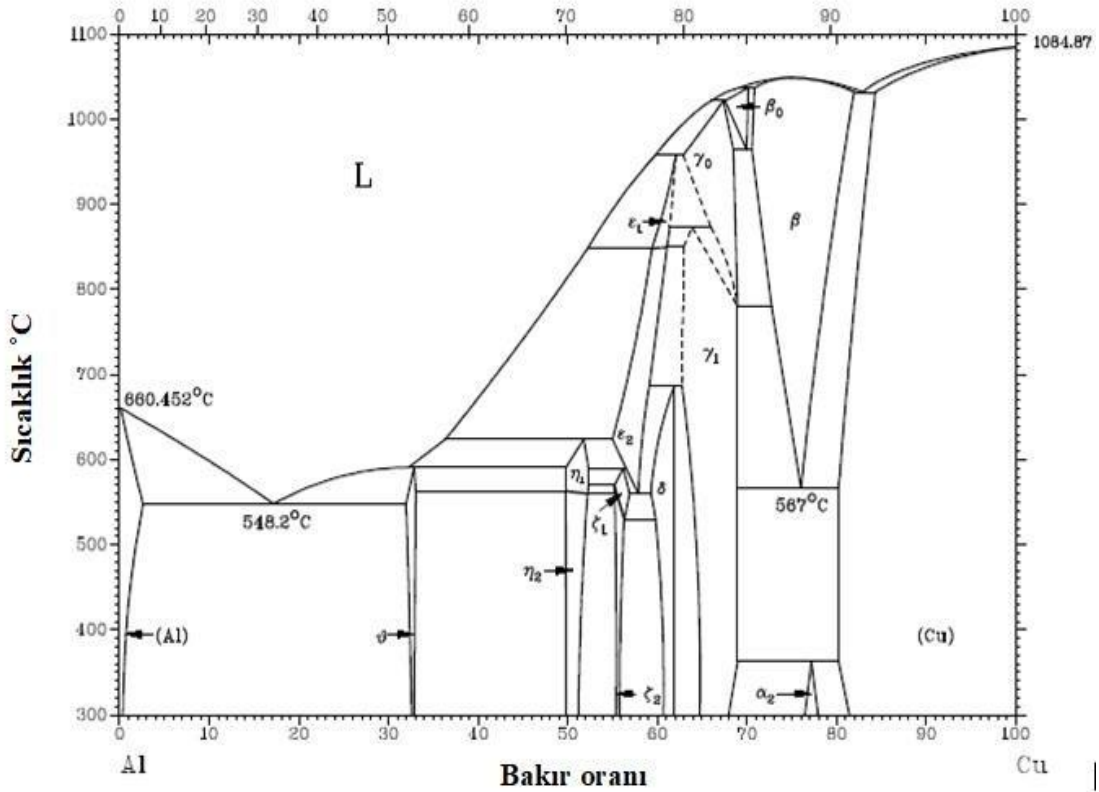


Şekil 2.2 Alüminyum alaşımlarında kullanılan alaşım elementleri (Hatch 1984).



Şekil 2.3 Alüminyumda kullanılan alaşım elementlerinin sıcaklığa bağlı çözünürlükleri (Deghani vd. 2010).

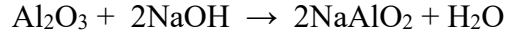
Bu elementlerden oluşan katı çözeltilerde mukavemetteki artış, çözeltideki elementlerin atom yarı çaplarındaki farklılığı ile değişmektedir. Alüminyum alaşımlarının aşınmasını arttırmak için yapılan araştırmalarda erime noktalarının yüksek olması nedeniyle bazı elementler; silisyum, bakır, magnezyum, çinko, nikel ve demir diğerlerine göre daha çok kullanılmaktadır (Subramanian 1987). Çok zayıf yapılı Al_2Cu olarak ilk yaşlandırma alaşımlarından birisi de alüminyum-bakır alaşımıdır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Al-Cu denge diyagramı (Subramanian 1987).

2.2.2 Alüminyum Üretimi

Alüminyum üretimine, dünyanın üst kabuğunda bulunan boksit mineralinin işlenmesiyle başlamıştır. Bu mineralin öncelikle uygun yöntemler kullanılarak alüminaya dönüştürülmesi gerekmektedir. Öncelikle demir olmak üzere boksit ve silika çeşitli safsızlıklar içeren bir mineraldir. Sodyum hidroksit ile çalışırken boksitin içerisinde bulunan alüminyum oksit, sodyum alüminat haline dönüşerek çözünmektedir (Yalçın ve Gürü 2012).



Boksit ve sodyum hidroksit içerisinde bulunan demir oksit ve titanyum dioksit gibi safsızlıkları çözme özelliğine sahip değildir. Öte yandan silikatlar çok küçük miktarlarda da olsa çözelti fazına girebilmektedir. Kireç, çözünebilir silikatları çözüldükten uzaklaştırmak için kullanılır ve ortamdan kalsiyum silikat birikintileri olarak çıkarılır. Üretilen sodyum alüminat çözeltisi daha sonra filtrelenebilir ve hidroliz işlemi yapılarak hidroksit halinde çöktürülmektedir. Elde edilen alüminyum hidroksit çöktürülmesi daha sonra bir filtre presinden süzülür. Bu işlemler sonrasında ısıya tabi tutularak alüminaya (Al_2O_3) dönüşür. Bu işlemde üretilen sodyum hidroksit daha sonra suyundan arındırılır, konsantre edilir ve yeniden kullanım için depolanır. Alümina, yüksek erime sıcaklıklarında kriyolit ($3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$) ile erimiş olarak elektroliz edilmektedir (Yalçın ve Gürü 2012). Elektroliz hücresinin içerişi karbon ile kaplanmıştır. Bu karbon yüzeyi katot görevi görmektedir. Anot olarak da karbon elektrotlar kullanılmaktadır. Prosesin enerji ekonomisini arttırmak için alüminaya kriyolit ($3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$) veya kalsiyum florür eklenir ve erime sıcaklığı düşürülür. Elektroliz işlemiyle üretilen sıvı, alüminyum katot tarafından alınmaktadır. Bu süreçte anot tarafında ise oksijen çıkışı olmaktadır. Elektroliz yöntemi kullanılarak üretilen alüminyumun saflığının üst sınırı %99,5'tir. Bu yöntem kullanılarak 1 kg alüminyum elde etmek için yaklaşık 14,2 kWh elektrik enerjisi gerekmektedir (Haraldsson ve Johansson 2018).

2.2.3 Alüminyumun Kullanım Alanları

Alüminyum farklı fiziksel yapılarda üretilmektedir. Ürün çeşitliliği kullanıcılara geniş bir seçenek yelpazesi sunmaktadır. Ekstrüzyon ve haddeleme gibi üretim proseslerine uygun olması nedeniyle alüminyum parçalar sürekli sistemlerde üretilmektedir. Alüminyum alaşımlarının işlenmesinin çok az mekanik iş gerektirmesi, maliyetlerin belirli bir aralıkta kalmasını sağlamaktadır. Alüminyum kullanılarak tel ve tel örgü şeklinde ürünler üretilmektedir. Alüminyum üretimini kolaylaştıran bir diğer avantaj ise düşük erime sıcaklığı nedeniyle kullanılabilir yapı çeşitliliğidir (Demiral 2015).

Alüminyum, demir ve çeliğe göre 3 kat daha hafif olduğundan araçlarda kullanılması büyük avantaj sağlamaktadır. Çünkü Newton kanununa göre aracın kütlesi azaldıkça ivme artmaktadır. Tipik bir arabada yaklaşık 80 kg alüminyum kullanılmaktadır. Alüminyum parçaların demir çelikten yapılması halinde otomobilin ağırlığına 160 kg eklenecektir. Bu ekstra ağırlık, daha güçlü bir motora ve daha yüksek yakıt tüketimine duyulan ihtiyaç anlamına gelmektedir. Havacılıkta özellikle alüminyumun kullanımı dikkat çekmektedir. Uçakların yaklaşık %70'inin alüminyum ve alüminyum ürünlerinden yapılmaktadır. Bundan dolayı uçağın menzili arttırılarak yakıt tasarrufu sağlanmaktadır (Demiral 2015).

Alüminyumun inceltirme özelliği olması sebebiyle bu malzeme ambalaj sektörü için de çok önemlidir. Ambalaj sektörü alüminyum ve alaşımlarının yaygın olarak kullanıldığı sektörlerden biridir. Alüminyumun ince folyo levhalara dönüşmesi ve bu levhalarla depolanan ürünlerin havayla temasını engellemesi alüminyumun ambalaj sektöründeki önemini arttırmaktadır. Ayrıca alüminyum mor ötesi ışınlarının gıdaya ulaşmasına izin vermez ve gıdanın ömrünü uzatmaktadır. Öte yandan ilaç kutuları, içecek kutuları, diş macunu kapları da sayılabilecek diğer kullanım alanlarına örnek verilebilir. İçecek ambalajlarında kullanılan ve teneke kutu olarak bilinen alüminyumun kalınlığı 0,27 mm'dir ve 6 bar iç basınca kadar dayanabilmektedir. 13-15 gram ağırlığındaki bu alüminyum kutular da geri dönüştürülebilmektedir (Yalçın ve Gürü 2012).

Alüminyum aynı zamanda gaz beton (Ytong) üretiminde de kullanılmaktadır. Gaz beton, termal dayanım, mekanik dayanım ve düşük yoğunluk avantajına sahiptir. Gaz beton üretiminde dolgu maddesi olarak kireç ve silis kumu kullanılmaktadır. Bağlayıcı olarak alçı ve beyaz çimento kullanılmaktadır. Gaz betonun gözenekli yapısını sağlamak için alüminyum tozunun kullanılması gerekmektedir (Yalçın ve Gürü 2012).

2.3 Birleştirme Yöntemleri

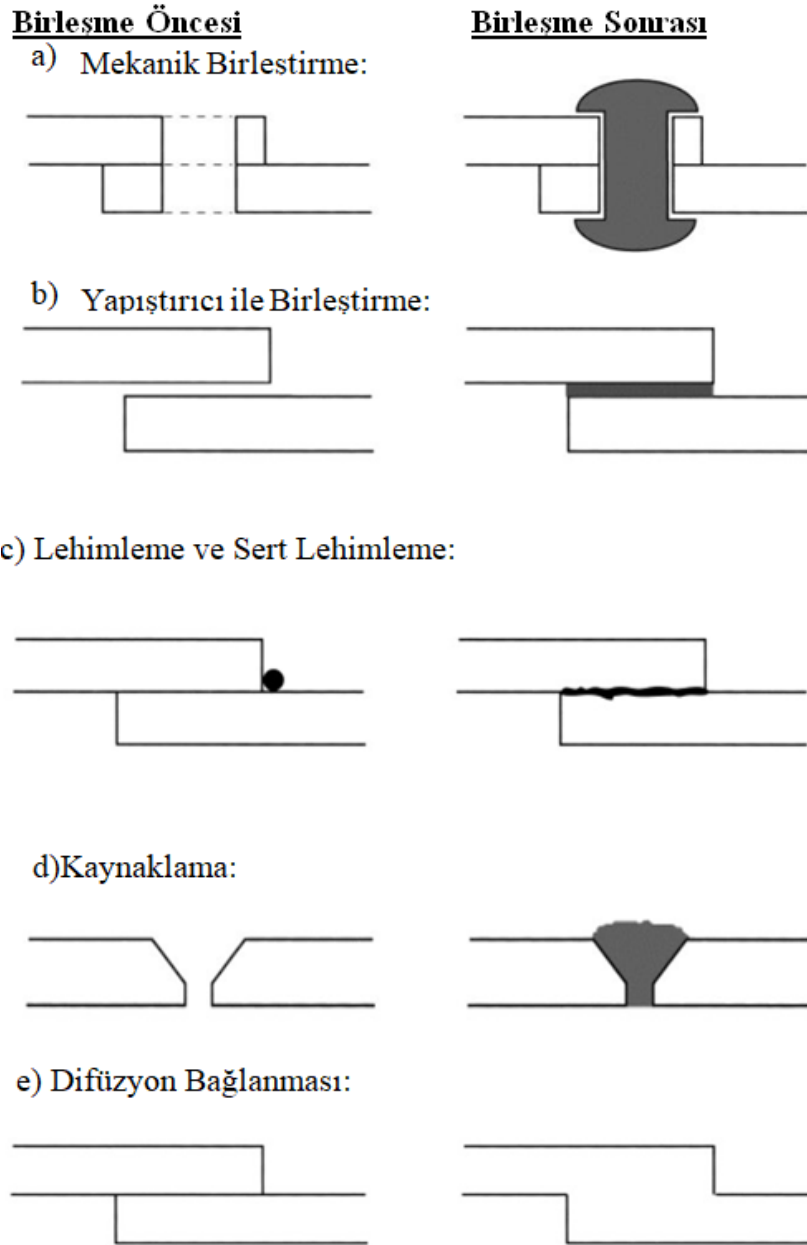
Metaller, seramik malzemeler ile güçlü bir şekilde birleştirilerek elektrik ve elektronik endüstrisinden havacılık endüstrisine, tıbbi uygulamalardan enerji üretimine kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemle elde edilen seramik-metal yapılar

benzeri olan seramik, metal ya da polimer yapılara göre termal, mekanik, kimyasal dayanım özellikleri bakımından bazı avantajlar sunmaktadır ve bu sebepten akademik ve endüstriyel alanda kullanılmaktadır (Nicholas 1998, Uzun 2018, Vuorinen 2024).

Son zamanlarda birçok alanda kullanılması nedeniyle aktif sert lehimleme yöntemine olan ilgi giderek artmış; fakat bu alanda araştırmaların devam etmesi ve literatürün genişletilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bu doğrultuda farklı metalik malzemelerin birbirleriyle karşılaştırılma çalışmaları oldukça sınırlıdır. Katı malzemeleri birleştirmek için farklı yöntemlerin olduğu bilinmektedir ve bu yöntemler aşağıda sıralanmıştır (Uzun 2018).

- Mekanik Birleştirme
- Yapıştırıcı ile Birleştirme
- Lehimleme ve Sert Lehimleme
- Kaynaklama
- Katı Hal Birleştirme

Birleştirme yöntemlerinin şematik gösterimi (Şekil 2.5)'de gösterilmektedir. Bu yöntemler benzer olsa da bazı farklılıklar da bulunmaktadır. Örneğin; lehimleme ve sert lehimleme bağlantının olduğu kısımda düzgün, yuvarlak köşeler oluşturabilen birleştirme yöntemleridir. Yukarıda gösterilen birleştirme yöntemleri, bağlantı yüzeylerini birbirine bağlama yeteneklerine ve hatasız bir birleşme elde etme ihtiyaçlarına göre sıralanmıştır. Lehimleme ve sert lehimleme bu sıralamanın ortasında yer almasından dolayı diğer birleştirme yöntemlerinin benzer bazı özelliklerini paylaşırlar. Örneğin; lehimli ve sert lehimli bağlantılar, kaynaklı ve difüzyonla birleştirilmiş bağlantıların iyi mekanik özelliklerini elde edebilirlerken; ayrıca çoğu mekanik bağlantıda olduğu gibi bileşenlere zarar vermeden demonte edilebilirler. Bu belirtilen özellikler lehimleme ve sert lehimlemeyi oldukça fazla kullanılabilir hale getirmektedir (Ma ve Murakawa 2010, Nicholas 1998).



Şekil 2.5 Birleştirme Yöntemleri: a) Mekanik Birleştirme, b)Yapıştırıcı ile Birleştirme, c)Lehimleme ve Sert Lehimleme, d) Kaynaklama, e) Difüzyon Bağlanması (Jacobson ve Humpston 2005).

2.3.1 Mekanik Birleştirme

Mekanik birleştirme, bağlantı yüzeylerini eritmeden parçaların birbirine sıkıştırılması anlamına gelmektedir. Bu yöntem genellikle vida ve perçin gibi sıkıştırma elemanlarının kullanımına dayanmaktadır. Sıkma işlemi sırasında bileşenler mekanik bir deformasyonla birbirine bağlanmaktadır (Jacobson ve Humpston 2005).

2.3.2 Yapıştırıcı ile Birleştirme

Yapıştırma ile birleştirme yöntemi; genellikle birden fazla katkı maddelerini içeren polimerik bir malzeme kullanılarak parçaları birbirine yapıştırma işlemini kapsar. Bu süreç, kürlenmiş yapıştırıcı ile uygulamada yer alan bileşenler arasında hidrojen bağlarının oluşmasına yol açan kimyasal bir reaksiyonu içerir. Bu bağlantı türünde orijinal bağlantı arayüzleri korunur (Jacobson ve Humpston 2005).

2.3.3 Lehimleme ve Sert Lehimleme

Lehimleme ve sert lehimleme, bağlantı yüzeylerini ıslatmak için ergiyik bir dolgu metali kullanılmaktadır. Bu dolgu maddesi ile parçalar arasında metalurjik bağların oluşmasına yol açar. Katı bileşenler ile ergiyik dolgu metali arasında oluşan reaksiyon sebebiyle bileşenlerin gerçek yüzeyleri aşınır fakat bu oluşan aşınmanın oranı genellikle mikroskobik düzeyde görülmektedir. Bu bağlantı yönteminde, dolgu maddesinin 450 °C'nin (840 °F) üzerinde erimesi durumunda sert lehimleme; Bu sıcaklığın altında erirse buna lehimleme denir (Jacobson ve Humpston 2005, Oerlikon 2014).

2.3.4 Kaynaklama

Kaynak işlemi, birleştirme için gerekli olan metal ve ısının kontrol edilerek birleştirilecek yüzeylerin eritilmesidir. Isıtma kaynakları; plazma ark, elektron demeti, lazer ve elektrik akımı yaygın olarak kullanılmaktadır (Messler 1999, O Brien 1991). Sürtünme karıştırma gibi kaynak yöntemleri gittikçe popüler hale gelmektedir (Chen ve Nakata 2009). Kaynama işlemini kuvvetli hale getirmek için dolgu metalleri kullanılabilir. Bu durumda dolgu metali, erime noktası ana bileşenlerden daha düşük olacak şekilde seçilir (Messler 1999, O Brien 1991).

2.3.5 Katı Hal Birleştirme

Katı hal birleştirme terimi; ilk olarak basınç kaynağı, sürtünme kaynağı difüzyonla birleştirme olmak üzere çok farklı birleştirme işlemleri vardır (Messler 1999, Jacobson ve Humpston 2005, O Brien 1991).

2.4 Sert Lehimleme

Genel olarak sert lehimleme; Ana malzemeler arasında güçlü bir sızdırmazlık veya bağ oluşturmak için dolgu metalinin erimesine, akmasına ve sertleşmesine dayanan bir birleştirme işlemidir. Bu işlem benzersizdir çünkü bu metal bağı, dolgu metalinin eritilmesiyle yapılır ve ana parçalar eritilmezler (Brazing Handbook 1991).

Sert lehimlemenin avantajları aşağıda listelenmiştir (Oerlikon 2014).

- Parçalar toplu olarak birleştirilebilir.
- Etkili ve uygun maliyetli bir yöntemdir.
- Parçanın bozulması minimuma indirilir veya tamamen ortadan kaldırılır.
- Ana malzemeler eritilmeden uygulanır.
- Süreç termal döngüleri öngörülebilirdir.
- Birçok farklı malzeme birleştirilebilir.
- İnce-ince veya ince-kalın malzemelerde birleştirilebilir.
- Küçük ve büyük aralıklar doldurularak malzemeler birleştirilebilir.
- Uzmanlık gerektiren bir iş gücüne gerek yoktur.

Sert lehimleme, sağlam bağlantılar üretebilen eski bir ticari süreçtir. Endüstride oldukça yaygın kullanılmaktadır; çünkü çoğu metal ve seramik malzemeyi birleştirme özelliğine sahiptir. Hem otomatik hem de manuel üretim yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebilen çok görevli bir süreçtir. Sert lehimleme; Büyük yapılar ve farklı metallere oluşan yapıları üretmek için uygundur. Aynı zamanda kaynağın neden olduğu yüzey kusurlarının aksine küçük, temiz bir dolgu alanı da oluşturur; bu nedenle estetiğin önemli olduğu uygulamalarda avantaj sağlamaktadır. Sert lehimlemenin en önemli avantajlarından biri hem büyük seri hem de bireysel üretime uyumlu olmasıdır (Brazing Handbook 1991).

Lehimleme ve sert lehimlemenin birden fazla ortak noktası vardır; fakat sert lehimleme 450°C üzerinde yapılan birleştirme işlemlerini belirtmek için kullanılırken; lehimleme ise 450°C altında yapılan birleştirme işlemlerini belirtmektedir. Sert lehimleme kaynak

işleminde farklı bir birleştirme yöntemidir; çünkü sert lehimlemedeki asıl amaç malzemeleri eritmek değil dolgu metalini eritmektir. Kaynaklamada malzemelerin birleşmesini sağlamak için lehim dolgu metalleri ve ana metaller eritilmektedir (Brazing Handbook 1991). Sert lehim bağlantısının kalitesini etkileyen birçok faktör vardır. Sert lehimleme süreçlerinden birini kullanarak iyi bir bağlantı elde etmek için; birleştirilmesi yapılacak ana malzemelerin yüzeyi düzgün şekilde temizlenmelidir. Uygun sert lehimleme sıcaklığını ve ısı dağılımını sağlayan bir ısıtma işleminin seçilmesi önem arz etmektedir (Brazing Handbook 1991).

2.4.1 Sert Lehim Dolgu Malzemeleri

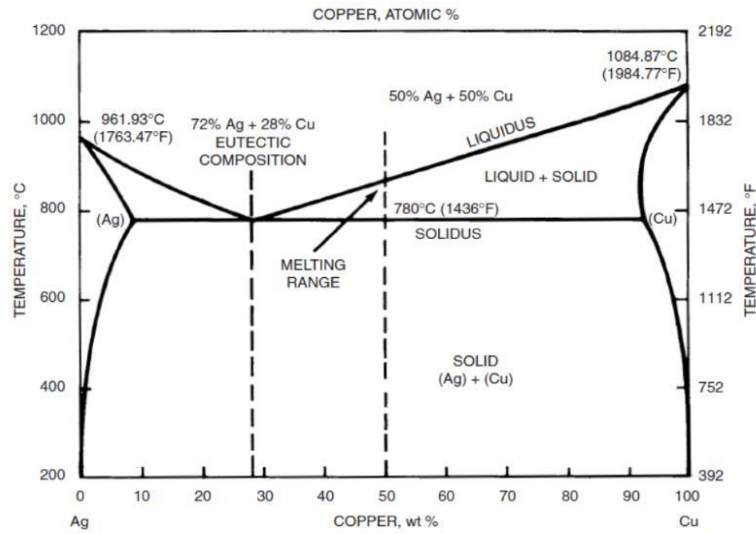
Sert lehimleme yapımında kullanılan dolgu metalleri, belirli sıcaklık aralıklarında eriyen alaşımlardır. Havacılık ve uzay teknolojisinde, sert lehimleme teknolojisinin kullanıldığı çok önemli yerler vardır bunlardan bazıları uçak motorları, bal peteği sandviç yapılar ve uçak yakıt transfer hat borularıdır (Chaturvedi 2012). Sert lehim dolgu malzemesi olarak;

- Nikel
- Gümüş
- Altın
- Paladyum
- Kobalt esaslı dolgular kullanılmaktadır.

Bu tip lehim türleri yüksek sıcaklıklarda şiddetli korozyona, mekanik strese ve düşük sıcaklık uygulamalarında (oksijenin, azot ve helyumun çözündüğü sıcaklıklarda) bu elementlerin oluşturduğu olumsuz etkilere karşı koruma sağlamak için kullanılır. Nikel bazlı dolgu metalleri veya alaşımları demir ve demir dışı yüksek sıcaklık alaşımlarını birleştirmek için kullanılır. Bu tip lehimler yüksek ısılatma özelliğine sahip fosfor, bor ve silikon dekapanlarla kullanılmaktadır. Gümüş bazlı dolgu metalleri, magnezyum ve alüminyum hariç tüm demir ve demir dışı metallerde kullanılmaktadır. Gümüş esaslı dolgular yüksek mukavemet, sertlik ve ısı iletkenliğine sahip olmasına rağmen birçok metalden ısılatma kabiliyeti daha yüksek olduğu söylenmektedir. Gümüş esaslı bağlantı dolgunun yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılması tavsiye edilmese de 427°C'nin üzerindeki sıcaklığı geçmeyecek şekilde motor parçalarının lehimlenmesi için tavsiye

edilmektedir. Altın esaslı dolgu malzemesi, özellikle jet motorlarında modern türbin kanatlarında kullanılan Si_3N_4 malzemesine yüksek sıcaklıklarda korozyona dayanımı için lehimlenir. "Palni" ve "Palco" adı altında kobalt ve nikel takviyeli paladyum bazlı dolgular, 1240 °C ila 1260 °C civarındaki çok yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılmaktadır. Altın esaslı dolguların maliyeti nedeniyle özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında kobalt alaşımlarının lehimlenmesinde altın bazlı dolgular yerine kobalt bazlı dolgular kullanılmaktadır (Chaturvedi 2012).

Örnek olarak; gümüş – bakır alaşımına ait faz diyagramı (Şekil 2.6)'de verilmiştir. Gümüş – bakır alaşımlarının erimesi; ötektik alaşım olan 72 Ag - 28 Cu için belirli bir sıcaklığa ulaştığında, 50 Ag- 50 Cu bileşiği için diyagramda gösterildiği sıcaklıktadır. 780°C katılaşma sıcaklığında başlayan erime, 850°C'nin üstünde bir sıcaklığa yükselene kadar tamamlanmaz. Bu sıcaklıkta sıvı ve katı karışımı sıvı alaşım tarafından görünenden farklı bir şekilde akmakta ve ıslatılmaktadır (Brazing Handbook 1991).



Şekil 2.6 Gümüş – Bakır Faz Diyagramı (Brazing Handbook 1991).

Dolgu metali kısmi ergimiş halini aldığı anda kapiler hareketle akışı oldukça azalır ve dolgu metalindeki düşük erime noktasındaki sıvı fazın ıslatma ve yayılma davranışı katı bileşenlerinden ayrılır. Bu davranış, yetersiz doldurulan bağlantılar nedeniyle süreksizliklere ve sahip bağlantıların oluşmasına sebep olabilir (Brazing Handbook 1991).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Numunelerin Üretimi

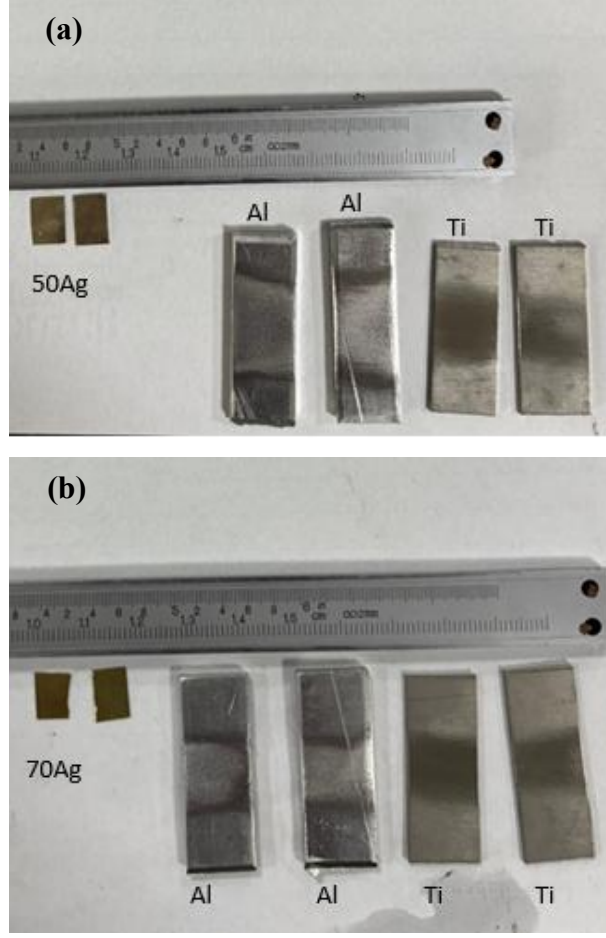
Bu araştırma çalışmasında kullanılan Ti6Al4V ve Al6061 sac malzemelerinin kimyasal bileşimleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Ti6Al4V kodlu Ti alaşımı ve 6061 serisi Al alaşımı plakalardan 15x30x1 mm boyutlarında kuponlar kesilmiş ve ardından yüzeyleri 800 Grit zımpara ile temizlenmiştir.

Çizelge 3.1 Ti6Al4V ve Al 6061 alaşımının ve üretilen lehimlerin kimyasal bileşenleri

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Fe	Diğer	Al
Al6061	0.59	0.67	0.254	0.156	0.91	0.09	0.222	0.105	0.03	0.15	Kalan
	Al	V	Mo	Cr	Zr	Si	Fe	C	Nb	Diğer	Ti
Ti6Al4V	5.21	4.38	0.004	0.001	0.004	0.033	0.122	0.359	0.038	0.004	89.40
	Zn	Ti	Sn	Al	Ag	Si	Pb	Mg	Ni	Cu	Diğer
Ag50	27.4	-	0.9	2	12.40	-	-	0.03	-	56.7	--
Ag70	30.2	0.06	0.6	3	21.2	-	-	0.03	-	44.8	--

Temizleme işlemi mekanik olarak yapıldığı için, daha sonra Alkol ile yağ kalıntıları da kaldırılmıştır. Mekanik işlem yüzeyde ısı oluşturmayacak şekilde ve rastgele yönlenmiş çizikler oluşturacak şekilde yapılmış ve en son 1200 Grit zımpara ile tekrar zımparalanarak parlak bir görünüm alması sağlanmıştır. Kaynak / sert lehimleme işleminden önce bütün yüzeyler asetonla temizlenmiştir (Resim 3.1). Sert lehimleme işlemi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği atölyesinde bulunan tek fazlı elektrik direnç kaynak makinası (Resim 3.2) kullanılarak yapılmıştır. Ara bölgeyi ısıtmak için kullanılan akımın şiddeti ortalama 100 A civarında olduğu hesaplanmış ve akım uygulama tek aşamada değil, her bir uygulama süresi 1 sn ve bekleme süresi de 1 sn olan 20 baskı kuvveti toplam sürede yapılmıştır.

Sert lehimlerin üretim işlemi modifiye edilmiş lehim ergitme potası kullanılarak yapılmıştır. Pota sıcaklığı 750 °C ye kadar artırılıp Zn, Cu, Ag, Ni ve Al başlıca elementler olmak üzere çeşitli alaşımlar üretilmiştir. Ni ilavesinin ergime sıcaklığını artırdığı görüldüğü için, sıcaklıkları 800 °C’nin altında olan veya potada ergiyen lehimler kullanılmıştır (Resim 3.3).



Resim 3.1 a) 50Ag ve b) 70Ag sert lehimle, kendi aralarında çapraz sert lehimleme yapılan sacların görüntüsü



Resim 3.2 Birleştirme işleminde kullanılan direnç nokta kaynak makinası

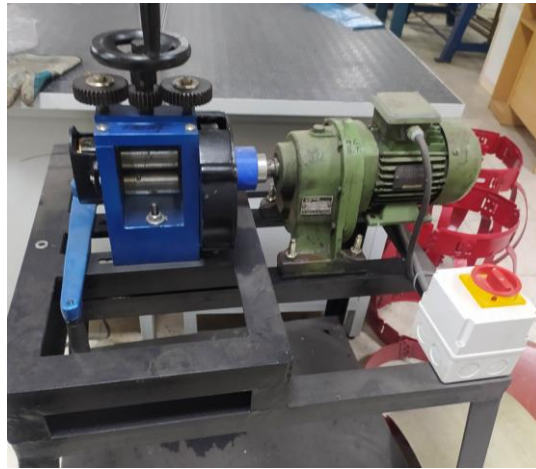
60Ni-20Cu-20Zn ve 54Ni-18Cu-18Zn-10Ag oranlarında kullanılması beklenen lehimlerin ergime noktaları 1100 °C ve 1027 °C çıkması üzerine bu lehimlerin kullanılmasından vazgeçilmiştir. Ancak, lehim üretimi Cu, Zn, Ag ve Al katkısı ile

gerçekleştirilmiş ve yüksek entropili düşük ergime noktalı lehimler üretilmiştir. Isıtma potası kullanılarak yapılan ergitme işleminde, önce Zn ve sırasıyla Cu ve Ag ile son olarak Al ilavesi yapılmıştır. Al ilavesinin, Zn, ve Al çubuk şeklinde kullanılırken, Cu şerit halinde ve Ag ise toz halinde kullanılmıştır.



Resim 3.3 Çalışmada kullanılan lehimlerin üretildiği pota

Zn, Al, Cu, Ni, Sert lehimleme / birleştirme işleminde önce farklı kompozisyonlarda üretilen lehimler haddeleme cihazı kullanılarak yaklaşık 250 mikrometre kalınlığında şerit haline getirilmiş ve ardından yüzeyi parlatılmıştır (Resim 3.4). Lehimlerin tekrarlı yükleme sırasında kırılmalarını engellemek amacıyla ara ısıtma yapılmış ve haddelemeye devam edilmiştir.



Resim 3.4 Kullanılan lehimlerin haddelendiği haddeleme ünitesi

3.2 Yapısal ve Mekanik Karakterizasyon Araçları

Koruyucu olarak kullanılan Argon gazı sürekli olarak kaynak bölgesine sevk edilmiş ve akış hızı 3 lt/dk olarak ayarlanmıştır. Kaynak bölgesi sıcaklığı termokupl ile ölçülememiş ancak IR termometre ile ölçülmeye çalışılmıştır. Lehimlerin ve kullanılan Ti ve Al alaşımı malzemelerin faz analizi ve oranları Bruker D8 Advance XRD cihazı ile Cu hedef (λ : 1.54 Å) kullanılarak 5 derece/dk hızda $2\theta = 20-90$ derece aralıkta yapılmıştır (Resim 3.5).



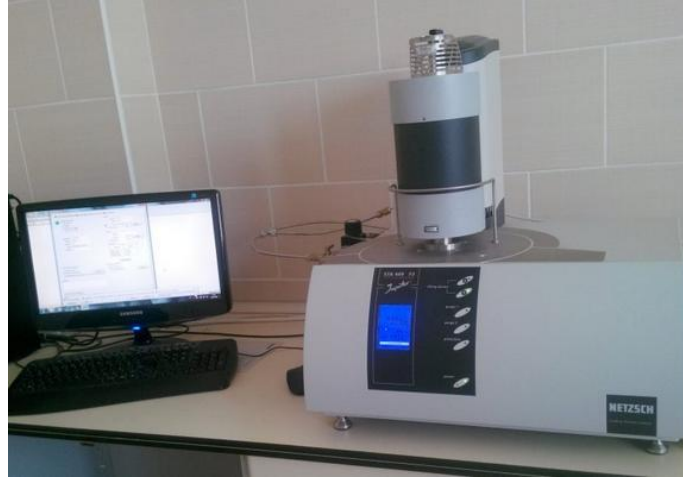
Resim 3.5 XRD analizinde kullanılan Bruker Advance D8 cihazının görüntüsü

Sonuçların analizi, Match 3 programı kullanılarak COD (Crystallography Open Database) kullanılarak yapılmıştır. Mikroyapısal ve elemental analiz için LEO VP elektron mikroskobu kullanılmış ve EDX analizleri Röntec EDX element spektrum analizörü vasıtasıyla yapılmıştır (Resim 3.5).



Resim 3.6 Mikroyapı analizi için kullanılan elektron mikroskobu görüntüsü

Mikroyapısal analizden önce bütün numuneler metalografik olarak inceleme amacıyla hassas bir şekilde kesilmiş ve ardından bakalit içerisinde alınarak parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Metalik yüzeyler ve ara yüzeyler 400G den başlayarak 1200G ye kadar zımparalanmış ve ardından alümina pasta ile parlatılmıştır. Kullanılan lehimlerin faz dönüşüm noktalarını görmek amacıyla Neitsch marka DSC cihazı 25 °C – 800 °C arasında ısıtma – soğutma yapılarak ve Ar atmosferi altında kullanılmıştır. İlgili cihazın resmi Resim 3.7’de verilmiştir.



Resim 3.7 DSC cihazı

Burma testi için 100 kg kapasiteli burma cihazı inşa edilmiştir; cihazın yazılımı ve üretimi yapıldıktan sonra kullanılarak gerçek ortamda test edilmiştir. Bu cihazla, burma açısı ve kuvveti ölçülebilmektedir. Elde edilen veri daha sonra txt dosyası haline veya xsl dosyası olarak saklanabilmektedir.



Resim 3.8 Burma testi cihazı ve yazılım arayüzü

3.3 Ni ve Cu Kaplama

Bir set numune (Al-Al, Ti6Al4V-Ti6Al4V ve Ti6Al4V-Al) sert lehimden önce kaplama için ayrılmıştır ve Al numunelerin kaplaması yetersiz olurken, Ti6Al4V numunesinin kaplandığı görülmüştür. Bunun için (Resim 3.9)'da görülen rodaj kaplama cihazı kullanılmıştır. Kaplama için en uygun parametreler deneme yanılma yoluyla optimize edilmiştir. Ni ve Cu kaplamalar gözle görünecek şekilde kalınlığa ulaşacak kadar uygulanmıştır; bu kaplama kalınlığı yaklaşık olarak 10 mikron olduğu değerlendirilmiştir.



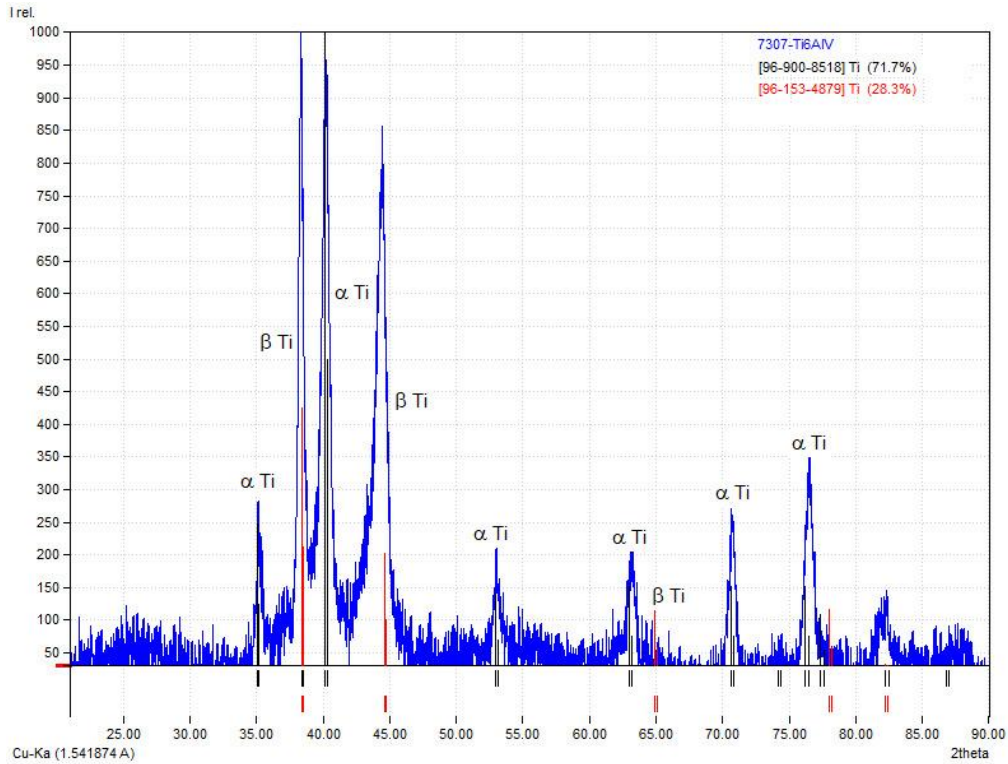
Resim 3.9 Rodaj kaplama cihazı

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Kullanılan Ti6Al4V Al6061 ve Lehimlerin Karakterizasyonu

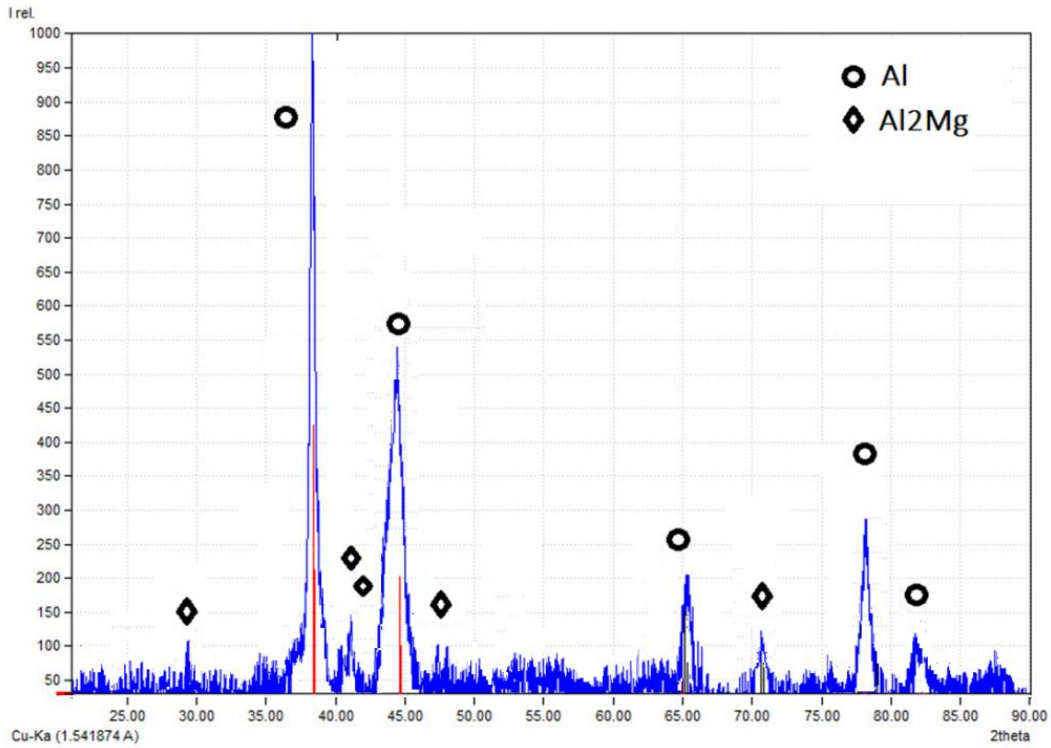
4.1.2 Ti6Al4V ve Al6061 Alaşımlarının Karakterizasyonu

Ti6Al4V 1mm kalınlığındaki sac malzeme ticari olarak elde edilmiş olup, 15x30 mm ebatlarında kullanılmıştır. Birleştirme işleminden sonra burulma testine uygun yapılar oluşturulması için bu ebatlarda kesilmiştir. Yüzeyi 600 Grit ile temizlenen sac malzemeler XRD analizine tabi tutulmuştur. (Şekil 4.1) deneysel çalışmada kullanılan Ti6Al4V sac malzemesinin XRD analizi sonucunu göstermektedir. (Şekil 4.1) XRD grafiğinin ilk analizinde Ti6Al4V alaşım sac malzemenin çift fazlı olup, iki farklı kristal yapıdan oluştuğu görülmekte ve bu fazların alfa Ti ve Beta Ti olarak tanımlandığı görülmektedir. Alfa ve Beta Ti fazlarının yaklaşık olarak %72 alfa Ti ve %28 Beta Ti olarak hesaplanmıştır. Alfa Ti piklerinin sayısının beta Ti piklerine göre daha fazla olduğu ve aynı zamanda pik şiddetlerinin de daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1 Ti6Al4V ticari sac malzemesinin XRD analiz grafiği

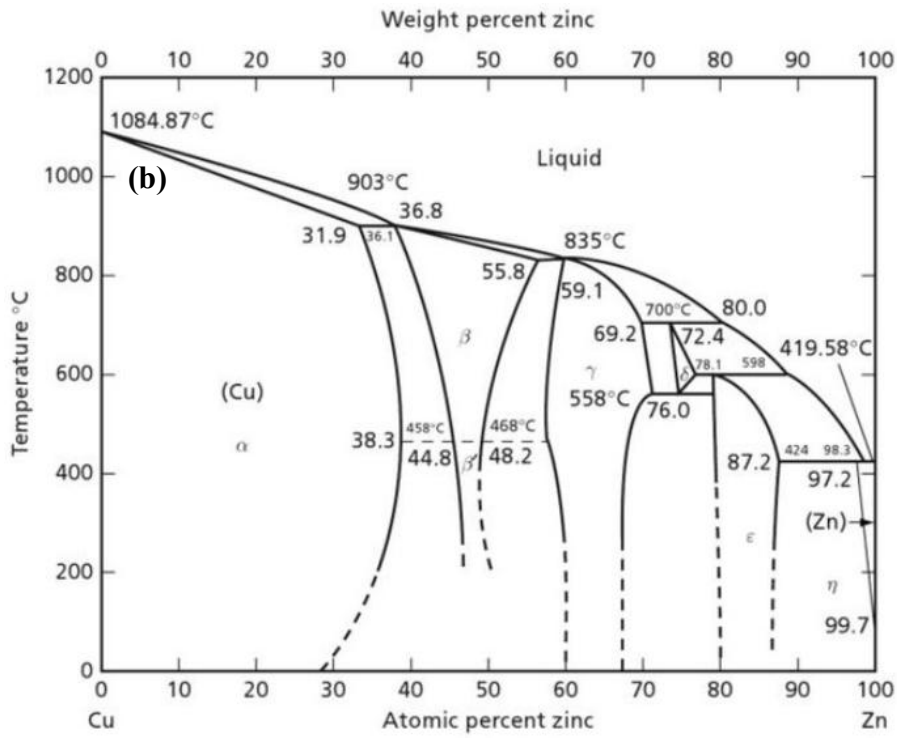
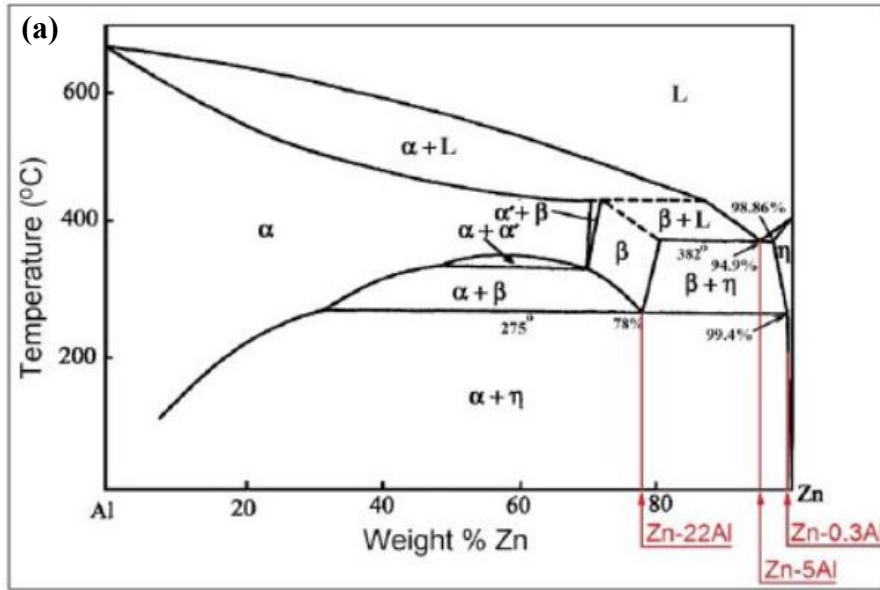
(Şekil 4.2)'de ise, Al6061 malzemesinin XRD analiz sonucu görülmektedir. XRD analizine göre Al malzemenin tek fazlı yapıdan oluştuğu ve Al-Mg bileşiğine ait olabilecek ikinci faz olarak Al_2Mg fazını içerdiği ancak Al_2Mg fazının miktarının çok az olabileceği değerlendirilmektedir. Yazılım ile yapılan XRD analizde, Al piklerinin şiddetinin daha fazla olması nedeniyle %98 oranında Al fcc yapısı ve %2 oranında ise Al_2Mg tetragonal (Tt) fazının olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.2 Al6061 sac malzemenin XRD grafiği

4.1.3 CuZnAl-Ag50 ve CuZnAl-Ag70 Lehimlerinin Karakterizasyonu

Al ve Ti ve kombinasyonlarının kaynaklanmasında iki tür lehim sonuç olarak kullanılmıştır. Bu lehim kombinasyonları çok sayıda yapılan deneme sonucunda ortaya çıkmıştır. Lehim işleminde özellikle Ti-Ti ve Al-Al kombinasyonlarının en iyi Cu içeren lehimlerle kaynaklandığı belirtilmiştir. Özellikle, bu lehimlerin Ag içermesinin nedeni ise lehimin yüzeyde daha iyi yayılmasını sağladığı ve aynı zamanda, yüzey oksidasyonunu da engellediği (Sharma vd. 2019), veya oksitlerin bozunmasına yardımcı olduğu bilinmektedir (Li vd. 2024).

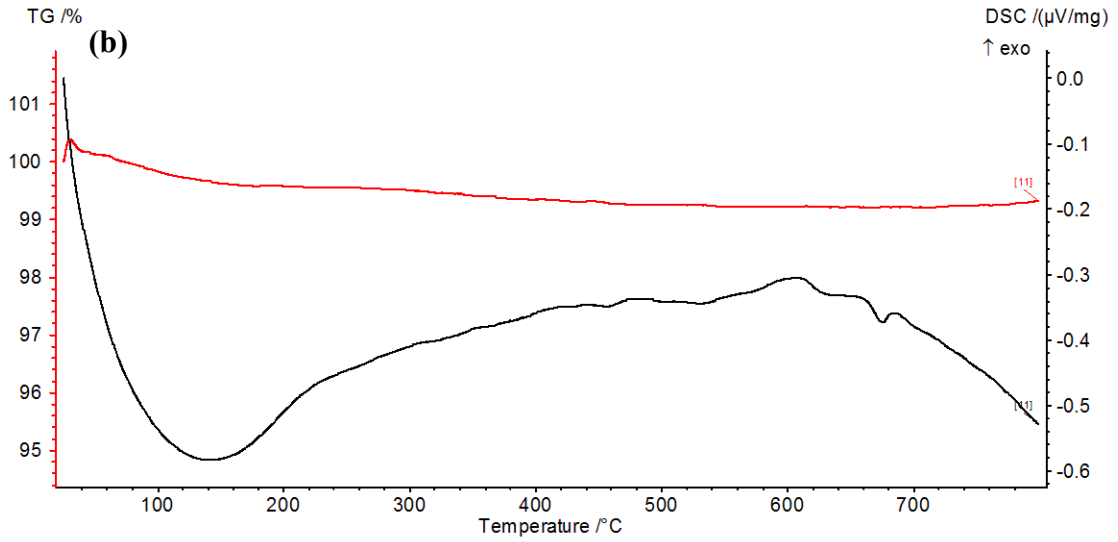
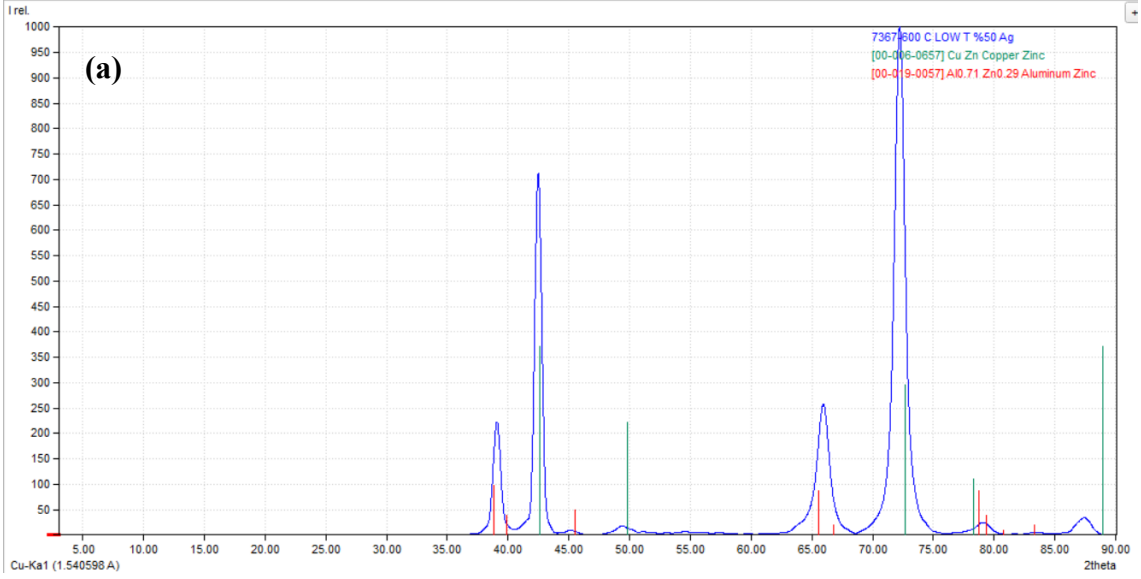


Şekil 4.3 a) Zn-Al (Demirtas 2015). ve b) Zn-Cu (Massalski 1987). faz diyagramları

Zn ve Al'un ergitilmesi sonucunda, oldukça kırılgan olan intermetalik fazlarının oluşmasını engellemek için bu çalışmada üretilen alaşımlara çözünürlük sınırının üzerinde (ağ.% 4) az miktarda Al ilavesi yapılmıştır. Al ilavesiyle, özellikle yüksek

sıcaklıklarda Al-Zn (Şekil 4.3 a) faz diyagramında da görüldüğü gibi Al'un Zn çözme kapasitesi şiddetli bir şekilde artmaktadır ve Zn-Al alaşımlarındaki ötektik ve ötektoid reaksiyonlar difüzyon süreciyle kontrol edilmesi nedeniyle normal soğutma koşullarında ikili faz olarak çökelen yapı çözünürlük sınırları içinde η (HSP) faz oluştururken Al ise alfa (YMK) olarak çökelmektedir (Aldirmaz vd. 2013). Al'un katkısı Zn'nun ergime noktasını düşürmek için ideal bir katkıdır, çünkü %5 Al katkısı ergime sıcaklığını 419 °C den 381 °C ye düşürmektedir, ancak artan Al miktarı ile beraber ergime sıcaklığı tekrar artmaktadır. Cu-Zn sisteminde (Şekil 4.3b) Al-Zn sisteminde göre çok fazla miktarda intermetalik faz vardır ve yapıyı daha kırılğan hale getirmektedir. Cu-Ag sistemi daha basit bir yapıya sahipken, Zn-Al alaşımlarında ötektik dönüşüm geciktiğinde (Cu veya Mg ilavesi) birincil η -Zn fazı daha düşük sıcaklıklarda çekirdeklenme ve büyümeyi teşvik etmeye devam edebilir. Cu ilavesi genellikle korozyon direncini artırmak amacıyla katılma da ikincil faz sertleştirme etkisi yaptığı bilinmektedir (Adeosun vd.2011, Ahlers 1986, Guerioune vd.2008).

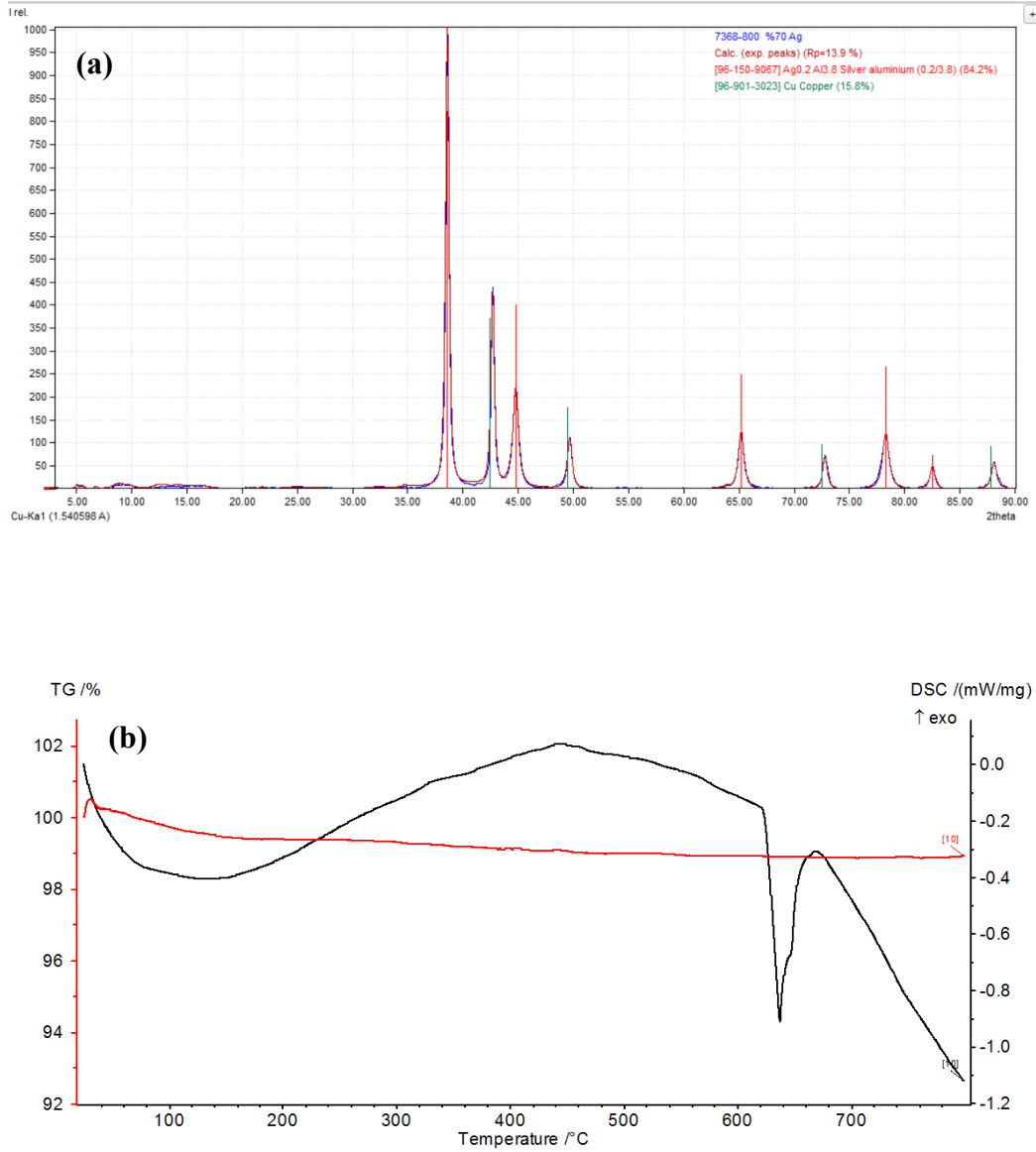
Ag50 kodlu sert lehimine ait XRD ve DSC sonuçlarını gösteren diyagramlar (Şekil 1)' de verilmiştir. XRD sonucunu gösteren (Şekil 2 a) diyagramında, iki ayrı faz oluştuğu ve bu iki ayrı fazın Cu₆₀Zn₄₀ ve Al₇₁Zn₃₀ bileşimlerinde oluştuğu görülmektedir. Hacimsel oranları belirli değildir ancak CuZn fazının daha fazla hacimsel oran içerdiğini piklerin yüksekliği ve alanından anlamak mümkündür. Ayrıca, $2\theta = 72,5$ derece' deki pikin çok yüksek şiddette olması haddeme sırasında yönlenmeye maruz kaldığını göstermektedir. Şekil 1b'de verilen DSC diyagramı, ergime sıcaklığına 800 °C de ulaşamadığını ve ayrıca ekstrapolasyon yapıldığında ergime sıcaklığına yaklaşık olarak takribi olarak 835 °C de ergime noktasına ulaşılmaktadır ki bu ergime sıcaklığı XRD sonucunda görülen CuZn fazının ergime sıcaklığına denk gelmektedir. Bu ergime sıcaklığına ulaşılmasından hemen önce çok küçük bir miktarda olsa, değişimler göstermiştir. Bu dönüşümün bir oksidasyon reaksiyonu olabileceği veya üretim sırasında kalıntı bir fazın bozunumu veya dönüşümü olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.4 a) Ag50 lehimine ait XRD analiz ve b) 800°C'ye kadar DSC sonuç grafiği

(Şekil 4.4)'te Ag70 lehimine ait XRD sonucu ve DSC sonucu verilmiştir. Bu sonuçlara göre XRD grafiğinde iki farklı sonuç görülmektedir. Cu yapısında kristal kafes yapısında çözünen elementlerin YMK yapıda katılaştığı ve ayrıca Cu'nun dışındaki fazların analizinde yüksek miktarda $Ag_{0.2}Al_{0.8}$ alaşımının varlığı ortaya çıkmıştır. Yüksek miktarda Ag içeren bu lehimin Al içerisinde çok yüksek miktarda Ag ile katı çözelti oluşturduğu ve bakır yapısından, en azından latis parametresi farklılığından dolayı (0.404 nm'ye karşılık 0.368 nm Cu) ayrıştığı düşünülmektedir. Saf Cu'nun a değeri 0.316 nm iken bu çalışmadaki XRD sonucunda ise, a = 3,68 olarak hesaplanmıştır ve bir miktar

Zn'nin Cu içerisinde çözündüğünü göstermektedir. (Çizelge 3.1)'den görüldüğü gibi, Ag70 lehiminde Ag50 lehimine göre iki kat oranda Ag vardır ve bu durumda, Zn artarken Cu'nun bir miktar düştüğü görülmektedir. Ancak, Cu'nun yüksek miktarda Zn çözdüğü bilinmektedir ve bu durumda YMK yapısının korunduğu ve a değerinin arttığı görülürken, Ag-Al alaşımının ikinci faz olarak oluştuğu anlaşılmaktadır. Ancak, Al'nin oranı az olsa da at% olarak daha fazla bir orandadır (Fang vd. 2023).



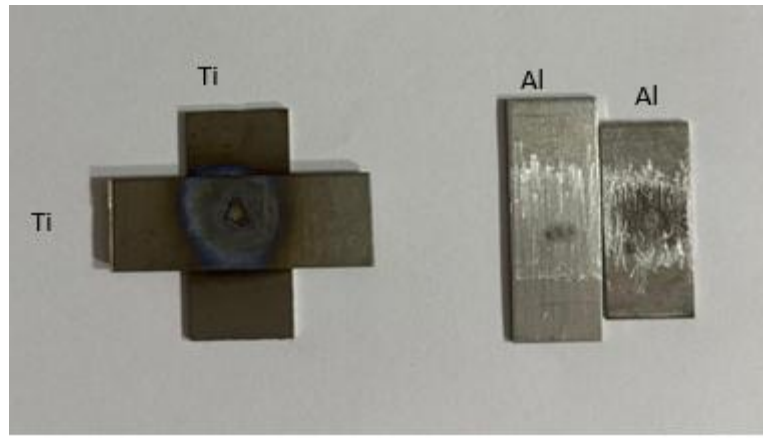
Şekil 4.5 a) Ag70 lehimine ait XRD analiz ve b) 800 °C'ye kadar DSC analiz sonucu

4.2 Ara Tabaka Sert Lehimlemeli ve Lehimsiz Çalışmaları

4.2.1 Ara Tabakasız Birleştirme Çalışması

Ara tabakasız bağlantıların üretilmesi için genellikle birleştirilmesi düşünülen karşılıklı malzemelerin genellikle alaşımların veya saf elementlerin birbiri içerisinde sorunsuz ve sınırsız bir şekilde çözünmesi bir avantaj olarak kabul edilmektedir. Her iki Ti ve Al alaşımlarının ticari versiyonları oldukça sık kullanılan malzemeler veya alaşımlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Yüksek performans, hafiflik ve maliyet azaltma çeşitli endüstriyel sektörlerde önemli faktörler olduğundan, farklı malzemelerin birleştirilmesine yönelik talep son zamanlarda artmıştır. Havacılık ve otomotiv endüstrisinde, alüminyum alaşımı ile titanyum alaşımının birleştirilmesi, yüksek mukavemet ve hafifliğin tercih edildiği yapısal bileşenlerde geniş bir uygulama alanına sahip olabilir. Ancak, Al ve Ti' nin birleştirilmesi, kristal yapı, erime noktası, termal iletkenlik ve doğrusal termal genleşme katsayısı dahil olmak üzere fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri açısından önemli farklılıklar gösterdiğinden zordur. Örneğin, Al alaşımı ve Ti alaşımının erime noktaları sırasıyla yaklaşık 660 °C ve 1650 °C olup, aradaki fark neredeyse 1000 °C'ye ulaşmaktadır. İki metalin erime noktaları arasındaki bu büyük fark, geleneksel eritme kaynak işlemleriyle birleştirilmelerini zorlaştırır. Ayrıca, Al elementi, Al alaşımının erime noktasından daha yüksek sıcaklıklarda buharlaşır, bu da Al elementinde ciddi bir kayba ve eritme kaynağı sırasında kaynak metalinin bileşiminde asimetriye yol açar. Dahası, Al alaşımları kaynak sırasında her zaman kaba taneler üretir ve bu da mekanik özellikleri bozar (Alam ve Ansari 2017, Hatch 1984, Demirtas 2015, Chen ve Nakata 2009). Ti-Al faz diyagramından, bileşime bağlı olarak, kaynak sırasında erime bölgesinde Ti_3Al , $TiAl$, $TiAl_2$ ve $TiAl_3$ adlı intermetalik bileşikler oluşabilir. Birkaç çalışma, $TiAl_3$ 'ün yüksek kinetik ve termodinamik stabilitesi nedeniyle diğer intermetalik bileşiklerden daha kolay oluştuğunu göstermiştir (Kenevisi ve Kohie 2012). Ancak $TiAl_3$, düşük mukavemet ve kırılma tokluğu ile çok kırılgandır ve yükleme sırasında iç mikro çatlakların kaynağı haline gelerek düşük bir bağlantı mukavemeti ile sonuçlanır (Sohn vd. 2003). Bu durum, Ti ve Al alaşımlarının füzyon kaynağının pratik olarak kullanılamayacağını göstermektedir. Çelik/Al ve Al/Ti alaşımları gibi farklı malzemelerden oluşan birleşimler, iki metal arasındaki birleşme arayüzünde, sadece

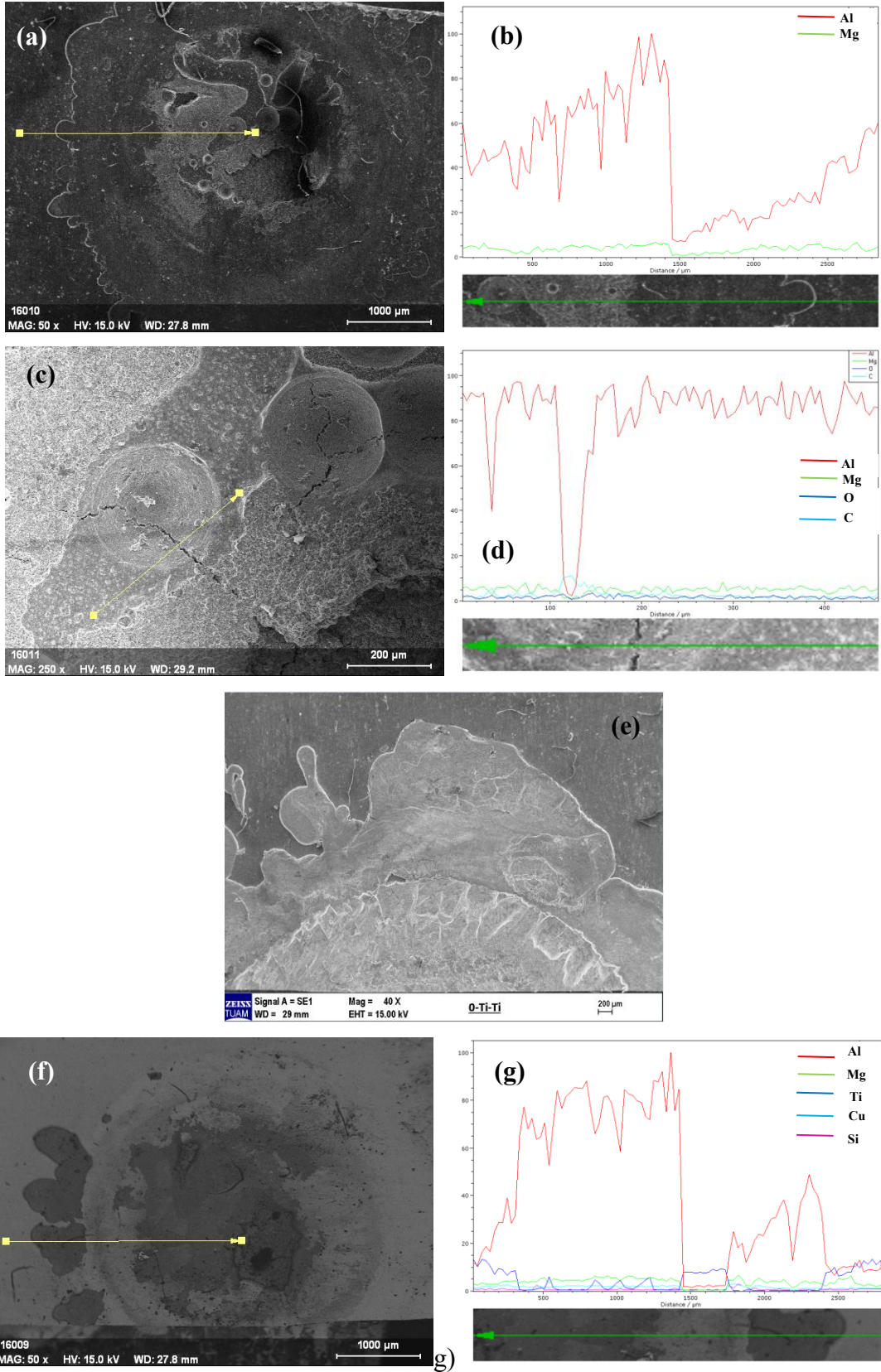
erime sıcaklığı daha düşük olan metalin eritildiği bir katı/sıvı hal reaksiyonu yoluyla elde edilebilir. Sıvı halde aşırı metalik bileşiklerin oluşumunu bastırmak için, Al ve Ti alaşımlarını daha düşük erime noktasında gerçekleştirilen bir katı hal kaynak işlemiyle birleştirmek daha iyi olacaktır (Wang vd. 2015). Bu çalışmada mekanizmada ifade edildiği gibi, Ti-Ti, Al-Al ve Ti-Al kombinasyonları çalışılmıştır. Bu çalışmalarda, Ti-Al, Al-Al bağlantıların başarısız bir şekilde bağlandığı görülmekte olup, Ti-Ti bağlantısı başarılı bir şekilde üretilmiştir. En iyi sonuç Ti-Ti bağlantısının mekanik özellikleri diğerlerine göre oldukça iyi sonuç vermiştir (Resim 4.1).



Resim 4.1 Ti-Ti ve Al-Al ara tabakasız yapılan birleştirmeleri

Al-Al bağlantılarının başarısız olmasının temel sebeplerinden birisinin kaynak bölgesindeki reaksiyonlardan daha çok, Al'un elektriksel ve ısı iletkenlikleri ile daha çok bağlantılı olduğu düşünülebilmektedir. Alüminyum-alüminyum (Al-Al) nokta kaynaklarının başarısız olmasının başlıca sebepleri, alüminyumun yüksek ısı iletkenliği ve oksit tabakası nedeniyle yeterli ısı kontrolü sağlanamaması ile ilgilidir. Bu durum kaynak sırasında yetersiz nüfuziyet, soğuk kaynak ya da aşırı ısının yol açtığı malzeme deformasyonuna neden olur. Ayrıca alüminyumun yüzeyinde bulunan ve oldukça zor kaldırılan alüminyum oksit (Al_2O_3) tabakası kaynak kalitesini düşürür, çünkü bu tabaka iyi bir elektriksel iletkenlik sağlamaz ve kaynak bölgesinde zayıf birleşmeye yol açar. Kısacası, kaynaktaki başarısızlık nedenleri genel olarak aşırı veya yetersiz ısı girdisi, kaynak dikişinde çatlak ve gözeneklilikler ortaya çıkar. Ayrıca, kaynak elektrotlarının uygun seçilmemesi ve yetersiz basınç, birleşme kalitesini olumsuz etkiler. Diğer önemli bir faktör ise, Al yüzeyindeki oksit tabakası düzgün temizlenmediğinde kaynak bağlantısı

kopma veya zayıflama riski taşır çünkü yeterli bir birleşme sağlanamaz. (Şekil 4.5 a-c) 'de görüldüğü gibi, kaynak çekirdeğinin çok parçalı bölgeden oluştuğu ve yer yer burma deneyi sonucunda bölgesel parçalanmanın ciddi boyutlarda oluştuğu görülmektedir. Düzensiz kenarlı bölgenin ergimiş Al matris olduğu değerlendirilmektedir. (Şekil 4.4c)'de görüldüğü gibi, kaynak çekirdeğinde çatlaklar sıklıkla rastlanmaktadır ve yapılan çizgi analizinde, çatlak etrafında (Şekil 4.5d) herhangi bir elementel farklılık ölçülmemiştir. Özellikle Mg'ca zengin herhangi bir bölgeye rastlanmamıştır. Bu durumda, çatlamanın ortaya çıkışı iç gerilmeler ve/veya oksit kalıntılarının sebep olabileceği değerlendirilmektedir. Bu teoriyi destekleyen herhangi bir O₂ artışı bulunmamıştır ancak yüzeyde sürekli denebilecek bir oksit tabakası mevcuttur. Yüzeyde bulunan dairesel – disk şeklindeki bölgelerin ergime sırasında yüzeydeki buhar yapıcı bileşenlerin oluşturduğu bir porozite kaynaklı boşluk olduğu düşünülmektedir. Al-Al kırılma yüzeyleri oldukça pürüzlü iken (Şekil 4.4 c) ve daha çok orta nokta ya yoğunlaşmış bir yükselti gösterirken, Ti-Ti bağlantısı ise, daha yaygın bir şekilde dağılmış haldedir. Ti ve Al'un saf haldeki Cp değerleri 33 ve 29 J/molK iken (Zhou vd. 2011). Isıl iletkenlik değerleri daha anlamlı bir sonuç vermektedir. Ti'un ve Al'un ısıl iletkenlik katsayıları sırasıyla, 17 W/m.K. ve 210 W/m.K, dir. Görüldüğü gibi, ısıl iletkenliği yüksek olan Al'un daha hızlı bir şekilde soğuyacağı ve iç gerilmelerinin katılma sırasında oldukça yüksek olacağı düşünülebilir. Bunun yanında, ısıl iletkenliği düşük olan Ti'u ısıtmak daha kolay olmakta ve ısı girdisinin etkisi daha iyi hissedilmektedir. Nokta kaynak çekirdeğinin etrafında bakıldığında, daha ince bir bölgenin varlığı söz konusudur ve orta kısımlarda ise sıklıkla boşlukların varlığı ve lateral kopma bölgesinin varlığı kendisini göstermektedir. Al-Al'un kaynaktaki porozite içerdiği ve belirgin bir nokta kaynak bölgesinin tanımlanması zordur. Al-Al bağlantısında ergime görünmemektedir ve Ti ısı iletim katsayısının düşük olması nedeniyle Joule etkisiyle ortaya çıkan ısının veya uygulanan akımın uygulama süresinin yüksek olması mümkündür.



Şekil 4.6 Al-Al, Ti-Ti ve Ti-Al bağlantılarının yüksek büyütmedeki SEM resimleri ve EDX çizgi analizleri

Şekil 4.6 f ve g’de verilen Ti-Al bağlantısına ait nokta kaynak çekirdeğinin SEM görüntüsü ve çizgi analizi, lehim kullanılmadan yapılan Ti-Al bağlantısının yüksek büyütmedeki durumunu göstermektedir. (Şekil 4.6 g)’de çizgi analizinde gösterildiği gibi, Al matris üzerinde burma testi sırasında kopan beyaz veya açık renkle gösterilen yerlerin Ti’ca zengin olduğu görülmektedir. Daha koyu renkli bölgelerin ise, Al matrisi olduğu ve iki renk tonu arasındaki bölgenin azlığı nedeniyle Ti matrisi ile Al sac malzemesi arasında birleşme zorluğu olduğu görülmektedir. Çizgi analizinde Mg’ca zengin olan kısımların anı zamanda Al’ca da zengin olduğunu ve Al-Mg-Ti bileşiği veya alaşımı oluşturduğunu düşündürmektedir. Muhtemel bileşikler arasında Ti_3Al veya TiAl yanında, Al_3Mg gibi bileşiklerinde kırılmaya müsait gevreklik gösteren bileşikler olduğu bilinmektedir.

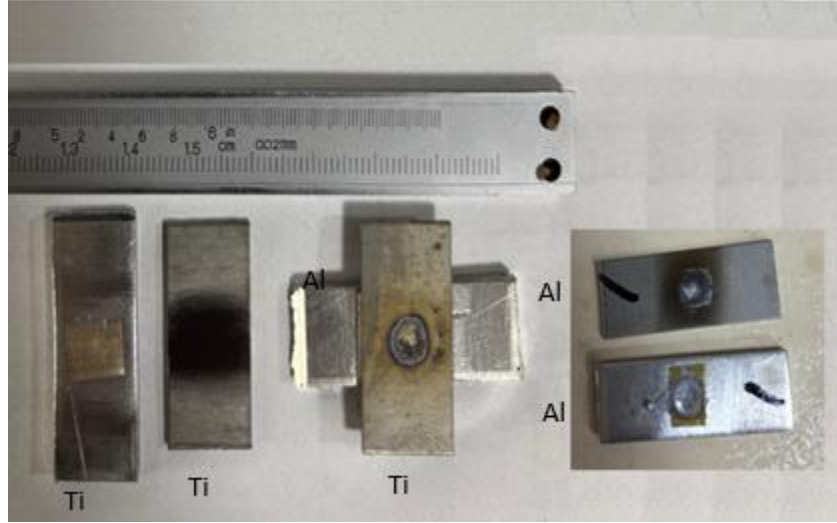
4.2.2 Sert Lehim Ara Tabakalı Birleştirmeler

4.2.2.1 50Ag Lehimi ile Yapılan Birleştirmeler

Bu tez çalışmasında iki tür lehim kullanılmıştır. Birinci lehim bileşiminde %12 oranında Ag olduğu için, 50Ag olarak kodlanmıştır. 50Ag lehimi ile yapılan birleştirmelerin sonuçları Al-Al ve Al-Ti kombinasyonlarının (Resim 4.2’a ve b), lehimsiz bağlantılarda olduğu gibi başarısız olduğunu ve Ti-Ti kombinasyonunun ise başarılı olduğu görülmektedir. Al-Al sisteminde 50Ag ile yapılan lehimlerin Ag içeriğinin birleşmeye etkisinin zayıf olduğu ve Al’un ergime sıcaklığının düşüklüğünün bu etkiyi şiddetlendirdiğini göstermektedir. Ti-Al bağlantılarının genel olarak intermetalik bileşiklerin etkisi ile başarısız olduğu düşünülürken, Al-Al bağlantılarının yetersiz birleşme veya nüfuziyet eksikliği sonucu başarısız olduğu görülmektedir. Ti Al’un kısmen başarılı olduğu görülmektedir. Ancak aşırı oksitlenmenin ortaya çıkardığı yüzeysel kirlilikte dikkate alındığında, kaynak bölgesindeki kopmaların birden fazla faktörle ilişkilendirilebileceği anlaşılmaktadır.

50Ag lehimi ile yapılan birleştirmelerde, Ti-Al’un Ti tarafı 50Ag lehimi ile yapılan nokta direnç kaynak çekirdeğinin Ti tarafındaki SEM görüntüsü (Şekil 4.7)’te verilmiştir. (Şekil 4.7 a ve b)’de Ti-Al lehimlenmiş bağlantısının Ti tarafını göstermektedir. 50Ag lehimi

içerisinde yüksek miktarda Cu bulunması dışında diğer lehimden bir farkı da Zn oranının kısmen düşük olmasıdır. Yüksek miktarda Cu içermesi lehimin yapılabirliğini azaltabilmektedir (Li vd. 2021).



Resim 4.2 50Ag ara tabaka lehimini ile yapılan Ti-Ti, Ti-Al ve Al-Al birleştirmeleri

Özellikle katılma çatlaklarının sıklıkla görüldüğü yukarıdaki Al-Al bağlantılarının Cu ile de benzeri bir şekilde oluşabileceği tartışılmıştır. Özellikle ısıl şok durumlarında ortaya çıkan bu etkilerin Cu gibi elementlerin yapmış olduğu değişik intermetalik bileşiklerden kaynaklanabileceği ve özellikle intermetalik bileşiklerin varlığının yaygın olması ve hızlı büyümesi sonucunda, Ti-Al sisteminde de ortaya çıkabileceği değerlendirilmiştir. Benzer bir çalışma (Liv d. 2024) tarafından da yapılmış ve Cu'nun benzer etkisi kurşunsuz lehimlerde çalışılmıştır. Ancak artan Cu miktarı ile beraber, fazlardan Cu elementinin varlığı tartışılmaz olacak ve Zn ile Cu arasında çok sayıda intermetalik bileşimi söz konusu olacaktır (Liang ve Schmid-Fetzer 2016). Cu ve Zn arasında oluşan intermetalik bileşikler arasında en bilinenleri şunlardır:

β fazı, e/a oranı 3/2 olup düzensiz Heksagonal sıkı paket (SPH) yapısına sahiptir.

γ pirinci yapısı (Cu_5Zn_8) karmaşık kübik yapıda ve e/a oranı 21/13'tür.

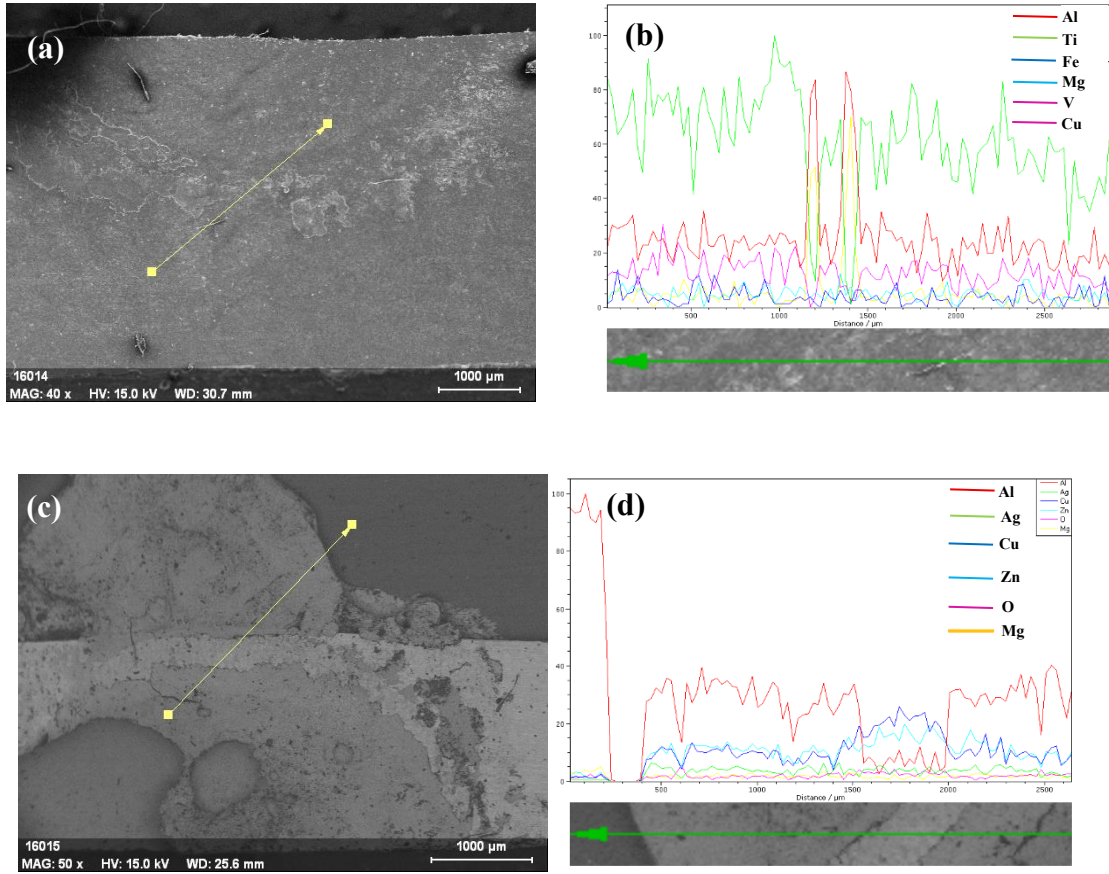
ϵ pirinci fazı ise $CuZn_3$ formunda olup SPH yapısına sahiptir.

Bu fazlar elektron bileşikleri olarak adlandırılır ve Cu-Zn sisteminde yaygın olarak gözlemlenir. Ayrıca pirinç adı verilen alaşımda da bu intermetalik fazlar bulunur (Kejzlar

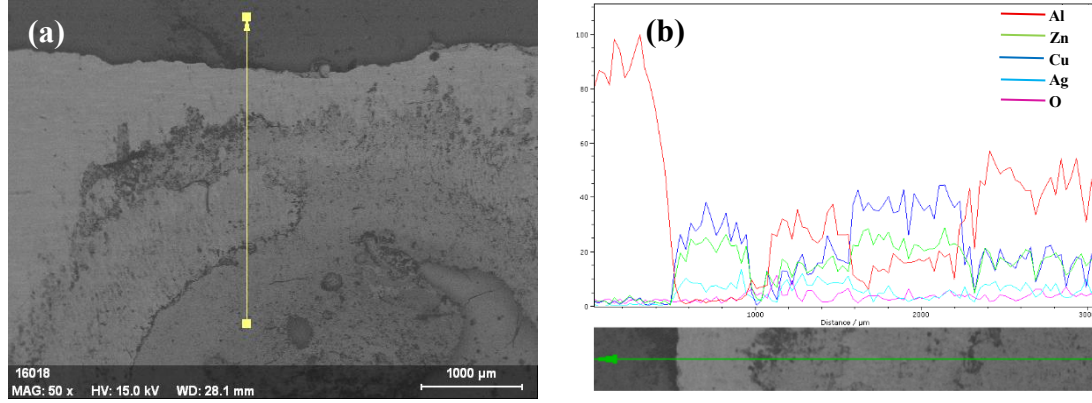
2017). (Şekil 4.5a) 'da görüldüğü gibi, Ti tarafına çok az miktarda lehim yapışması veya yapışmaması, daha çok Cu ile ilişkilendirilebilir. Çünkü Ag'nin Ti ile yapacağı intermetalikler iki fazlı yapıda olup, sadece iki intermetalik fazın dominant olarak oluşacağı ön görülmektedir; bunlar Ag_2Ti ve $AgTi$ olarak faz diyagramında verilmektedir (Vuorinen 2024). Ancak, Ag-Cu-Ti alaşımındaki intermetaliklerin durumunda bu bileşiklerin sayısı artmaktadır. $TiCu_4$, Ti_2Cu_3 , $TiCu$, Ti_3Cu_4 şeklinde çok sayıda intermetalik bileşik önerilmektedir. Bu bileşiklerin orta özellikleri bilindiği gibi düşük mekanik özellikler ve kırılma eğilimine müsait düşük gerilim hassasiyeti olmaktadır (Dezellus vd. 2011, Asanovic vd. 2008). (Şekil 4.5 c ve d)'de verilen SEM görüntülerinde, Ti-Al bağlantısının Al tarafı verilmektedir. Al tarafında, lehim malzemesi açık bir şekilde görülmektedir. SEM görüntülerinden anlaşıldığı gibi, Al altlık alaşımının ergidiği ve aynı zamanda, lehim üzerinde Al, Cu ve Zn'ca zengin bir bölgenin oluştuğu görülmektedir. Yüksek sıcaklığın etkisi ile beraber, ergiyen bölgede yine benzer bir alaşım bileşiminin görüldüğü ve Mg miktarının oldukça azaldığını EDX çizgi analizinden anlamaktayız. Bu azalmayı, Mg'un kolay oksit yapma yeteneğine bağlayabiliriz. Ellingham diyagramına göre, serbest enerji sıralamasının en altında yer alan Mg kolaylıkla O_2 ile bağlandığı ve curuf olarak kaynak bölgesinden uzaklaştığı varsayılabilir. Diğer bir ihtimal ise, Mg'un buharlaşmasıdır ancak Mg-Ag faz diyagramına göre, Mg-Ag ile ötektik yapmakta ve her iki elementin ergime sıcaklığında daha aşağıda olan $491\text{ }^\circ\text{C}$ ye kadar düşmektedir (İnt.Kyn.1). Ergime işleminin çok daha yüksek sıcaklıkta ve aynı zamanda kısmen ergime sıcaklığının çok üzerine çıktığını düşünürsek buharlaşmış olma ihtimalini de dikkate almalıyız.

(Şekil 4.8)'da 50Ag alaşımı ile üretilen Al Al bağlantısının SEM görüntüleri ve kaynak bölgesinden alınan çizgi analizi verilmiştir. Çizgi analizi oldukça karmaşık bir görüntü vermekle beraber, Al ve Cu elementlerinin yüksek olduğu iki ayrı bölge olarak düşünülebilecek bölgelerden oluştuğu görülmektedir. (Şekil 4.8 a ve b)'de, kaynağın orta bölgesinde Al içerisinde çözünen Cu ve Ag'ce zengin bir bölge var iken, lehimin kenarına doğru ise, Zn miktarının artış gösterdiği bölgeler ortaya çıkmıştır. Zn'nun ergime sıcaklığının düşük olması lehimlerdeki ön ergimeyi sağlayan bir katalizör olarak davranmaktadır ve bu şekilde, öncelikle Al'un çözünmesini kolaylaştırmakta ve ardından, Cu ve Ag'nin kademeli olarak lehim içerisinde çözünmesini sağlamaktadır. Ancak, Zn'nin Al ile yapmış olduğu bileşiğin ergime sıcaklığı yaptıkları ötektik'den dolayı

kaynak bölgesindeki ergimeye çok ciddi katkısı olmaktadır. Diğer resimlerde görüldüğü gibi bu resimde Al'un ergimesi mümkün olmamıştır. Ergime işaretinin olmaması, Cu'nun Zn-Al ergiyi üzerinde ergime noktasını artırıcı etkisinden kaynaklanmaktadır ve dolayısıyla yeterince yüksek olmayan bir kaynak bölgesinin sıcaklığının bu ergimeyi gerçekleştirmesi mümkün olmamıştır.



Şekil 4.7 50Ag lehimli kullanılarak yapılan birleştirmeler Ti-Al bağlantısının Ti (a,b) ve Al (c,d) tarafının SEM görüntüleri



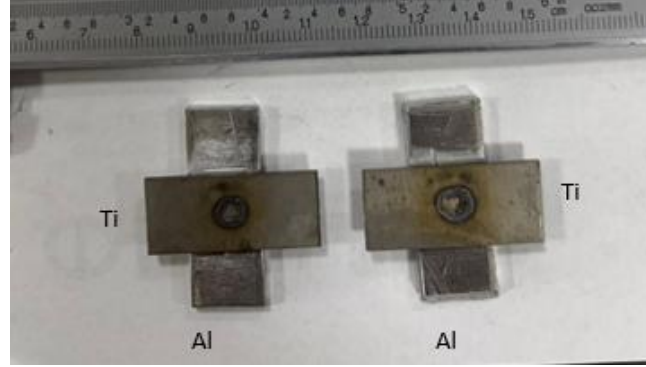
Şekil 4.8 50Ag lehimini ile yapılan Al-Al bağlantısının SEM görüntüsü ve çizgi analizi

Lehim içerisindeki alaşımlandırılmış bölgede Ag'nin etkisi daha çok Al'ca zengin olan bölgelerde görülmektedir. Bunun sebebinin Ag'nin bir miktar Al çözmesi olarak değerlendirilebiliriz. Ag'nin Al içerisindeki çözünürlüğü düşük veya hiç olmadığı için yapı SPH + YMK olarak katılaşmaktadır ve ötektoid sıcaklığı 357 °C ye kadar düşmektedir. Ötektik sıcaklığı ise yaklaşık olarak 565.8 °C olduğu için, elektrik direnç ile ısıtma sırasında düşük sayılabilecek bir sıcaklıkta ergimekte ve Al'dan daha önce ergidiği için, Zn ile beraber Al'un hızlı bir şekilde ergimesini desteklemektedir. Ancak, Cu'nun etkisi dikkate alındığında, Cu'nun alaşım içerisinde ayrı bir YMK faz olarak bulunduğu düşünülmektedir. Çünkü, Zn-Cu, Al-Cu, Cu-Ag kombinasyonların içerisinde yüksek miktarda Cu çözen bir yapı bulunmamaktadır.

4.2.2.2 70Ag Lehimleri ile Yapılan Birleştirmeler

Kullanılan ikinci lehimde yaklaşık olarak, %21 oranında Ag vardır ve Ag70 olarak kodlanmıştır. 70Ag Ti-Al bağlantısı 70Ag kodlu sert lehim ile yapılan birleştirmelere ait bağlantıların resimleri (Resim 4.3)'de, verilmiştir. (Şekil 4.7)'de ise 70Ag Al-Al bağlantısına ait resim ve EDX çizgi analizleri verilmiştir; görüldüğü gibi, bağlantılar ilk düşme testinden rahatlıkla geçmiştir. Numuneler, nokta kaynağı ile üretildikten sonra, yaklaşık 1,5 metre yükseklikten atılmakta ve kırılıp kırılmadığına bakılmaktadır. Bu test bütün nokta kaynağı yapılmış olan numunelere uygulanmıştır ve atılan Al-Al bağlantılarının çoğunluğu şaşırtıcı bir şekilde başarısız olmuştur. Ti-Ti bağlantılar ise

rahatlıkla bu testi geçmiştir. 70Ag sert lehim dolgu alaşımı Ti-Al ve Ti-Ti durumunda ve kısmen Al-Al kombinasyonlarında başarılı olmuştur.

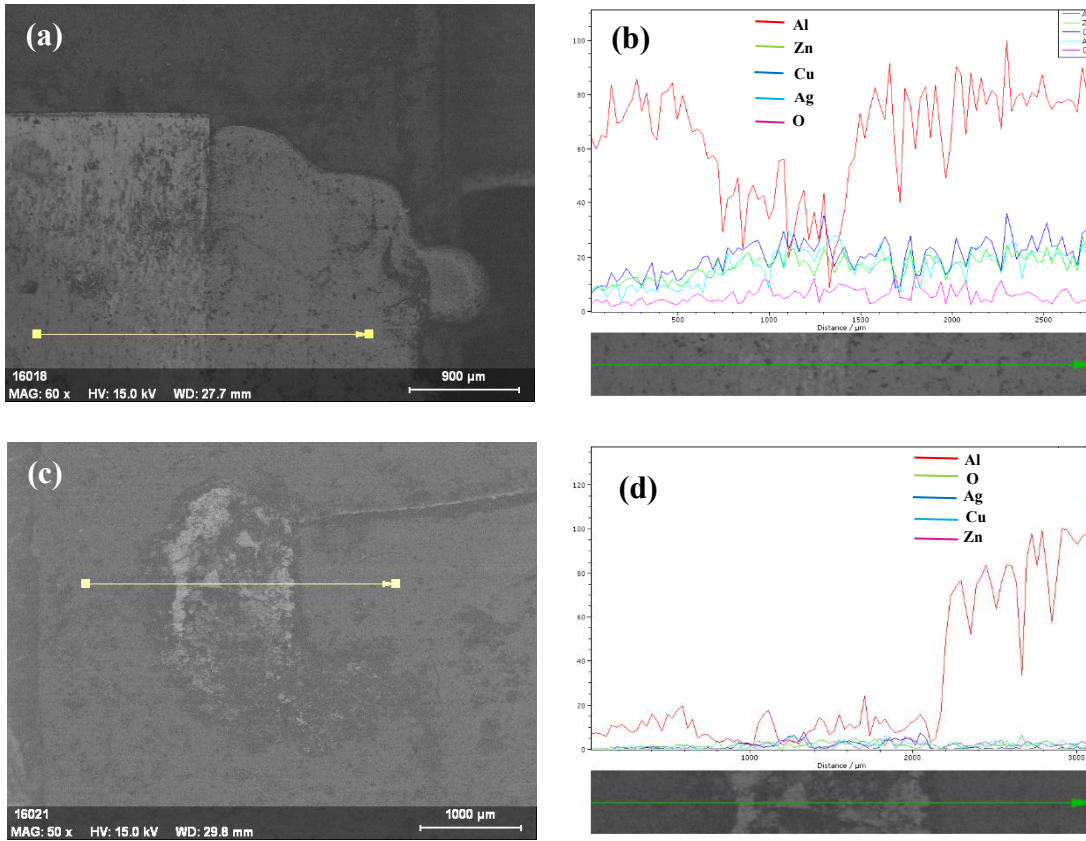


Resim 4.3 70Ag dolgu malzemesi ile farklı malzemelerin birleştirilmesi

70Ag sert lehim dolgu metali ile yapılan elektrik ara tabakalı direnç nokta kaynağında lehim bölgesine ait EDX çizgi analizi, sol alt köşede renk değişimini işaret etmektedir. Bu bölge, yani Cu, Zn, Ag içeriği olan lehimin bulunduğu nokta kaynağı çekirdek bölgesidir ve ısıtma sırasında Al ana malzeme ile reaksiyona girmiş ve Al ve Zn ile alaşımlandırılmıştır. (Şekil 4.7 b)'de görüldüğü gibi, Al oranı oldukça yüksektir ve Cu ve Zn difüzyonu alaşımlandırma gerçekleşmiştir. Nokta kaynaklarında, orta bölgede en yüksek sıcaklık ölçümü gerçekleşmektedir. Bu sıcaklık değerleri nokta kaynaklarındaki akım ve süre değerlerine bağlı olarak 1500 °C'nin üzerinde oldukça yüksek değerlere çıkmakta ve ergime meydana gelmektedir (Sherepenko vd. 2020, Ma vd. 2010). Lehim tabakasının orta kısmında en yüksek ısı oluşumunun meydana geldiği ve artan sıcaklıkla beraber artan çözünürlüğün ve ötektik sıcaklığa ulaşmanın da etkisi ile, incelendiği düşünülürse, daha çok Al'un difüzyonu demek daha doğru olarak değerlendirilmelidir. Ag içerisinde Al'un yaklaşık olarak %5 civarında çözüldüğü dikkate alınır ve 70Ag lehimde 50Ag lehime göre daha fazla miktarda Ag olduğu da düşünülürse, ergimiş lehimin Al'ca zengin olması açıklanabilir. Ayrıca, ergime ile başlayan lehim kalınlığının incilmesi sürekli artan Al ve özellikle Ag miktarı ile beraber 50Ag'ye göre daha fazla alaşımlandırma yaptığı anlaşılmaktadır.

(Şekil 4.9 c ve d)'de Al-Al kombinasyonunun 70Ag sert lehim dolgu metali ile yapılan birleştirmenin kaynak bölgesi görüntüsü ve EDX çizgi analizi verilmektedir. Matrisin Al olduğu bu bağlantıda, lehim bölgesinin yine Al'ca zengin olduğu ve bu durumun üst

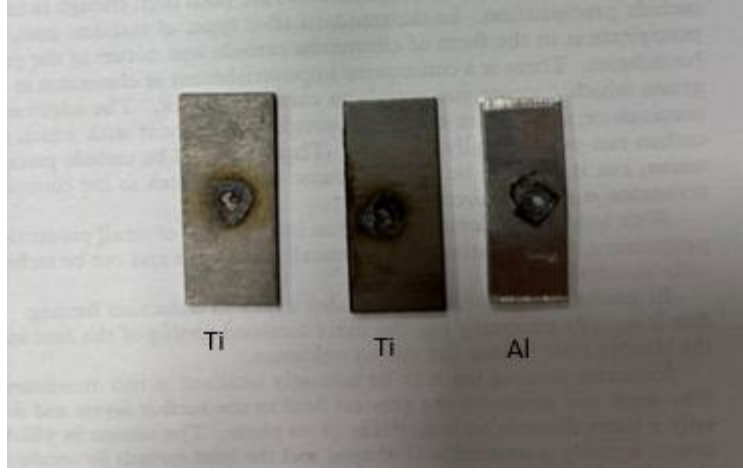
katmandaki Al'dan gelmiş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, joule ısıtma işlemi sırasındaki alaşımlandırmanın Al'un lehim içerisinde difüzyona maruz kaldığı düşünülmektedir. Bir önceki Ti-Al kombinasyonunda yapılan açıklamada belirtildiği gibi, Al'un Ag içerisindeki çözünürlüğü Al difüzyonu bağlamında geçerli bir argümandır ve en iyi seçenek olarak düşünülmektedir. Faz diyagramları açısından değerlendirmek gerekirse, çözünürlük sınırlarının daha düşük bir seviyede veya hiç olmadığı sistemlerdeki ikincil fazların yapının yumuşaması veya sertleşmesine veya matrisin sertleşmesine olan katkısı ve ardından lehimin içerisinde bulunan bazı elementlerin intermetalik bileşik yapmak için ayrışması ve matris içerisindeki efektif değerinin azalması bağlantı dayanımına etki etmektedir. (Şekil 4.7 a)'da görüldüğü gibi, lehim dolgu malzemesi yüksek miktarda alaşımlandırma ile, bu durumda Al, özellikleri ve ıslatma yeteneği kaybolmuştur.



Şekil 4.9 70Ag ile yapılmış Ti-Al (a, b) ve Al-Al (c, d) bağlantısının SEM görüntüsü ve EDX çizgi analizi

4.2.2.3 Nikel ve Bakır Kaplamalı Birleştirmeler

Ni ve Cu kaplama yapılan ve ardından ara dolgu malzeme tabakasız direnç nokta kaynak bağlantılarının optik görüntüsü (Resim 4.4)'da verilmiştir. (Resim 4.4)'da görüldüğü gibi, Cu veya Ni kaplamanın etkisi belirsiz ve aynı zamanda yetersiz olarak değerlendirilmektedir. Kaplama kalınlığının çok az olması ve homojen bir sürekli katmanın olmaması başarısız bağlantının nedeni olabilir. Bu çalışmaya kaplama ardından çıkan yüzey kirliliği ve kaplamanın etkisinin olmaması nedeniyle devam edilmemiştir. Resim 4.4'te Nikel ve Bakır kaplama ile yapılan birleştirmeler verilmiştir.



Resim 4.4 Nikel ve Bakır kaplama ile yapılan birleştirmeler

4.3 Mekanik Özellikler

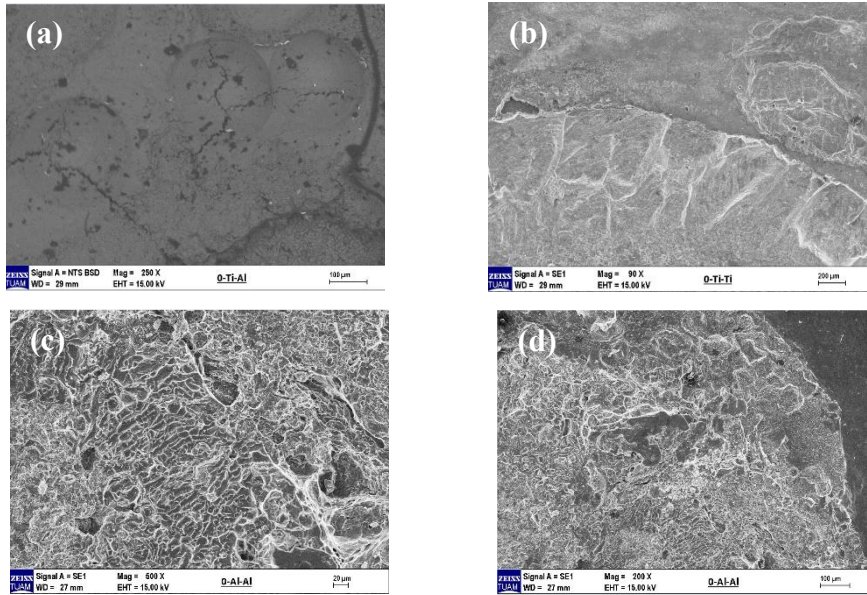
4.3.1 Ara Tabaka Lehim Kullanılmadan Yapılan Birleştirmeler

Çizelge 4.1'de lehimsiz üretilen bağlantıların burma kopma mukavemeti ve burma kopma açısı verilmiştir. Bu sonuçlara göre, Ti-Ti bağlantıları en iyi sonucu vermiştir. Al-Ti ve Al-Al bağlantıları ise, oldukça düşük seviyede dayanım göstermişlerdir. Kırılma yüzeyleri ve bağlantı bölgelerinin analizinde de görüldüğü gibi, birleşme alanının az olması bu tür sonuçlara sebep olmaktadır. Normal olarak, Al-Al levhaların direnç nokta kaynağı (RSW) işleminde, bakır alaşımlı elektrotlar kullanılarak 40-100 ms süreyle 3-5 kN kuvvet ve 22-28 kA yüksek akım uygulanırken, 0,5-3 mm kalınlığındaki levhaları rahatlıkla birleştirir ancak kullanılan kaynak aparatları oldukça farklı olup lehimleme için uygun olmayabilir. Ancak alüminyumun düşük direnci, yüksek iletkenliği ve oksit

tabakası, 5 kaynak işleminden sonra elektrot kirlenmesi gibi zorluklar yaratır. Alüminyum, temiz yüzeyler (24-144 saat içinde asitle aşındırılmış veya tel fırçalanmış) ve oksidi kırmak ve tutarlı direnci korumak için sık elektrot temizliği (aseton/alkol) gerektirir; yüksek akımlar ve kısa süreler termal kayıpları önler, ancak aşırı enerjiden dolayı sıçrama, dikiş bozulması veya porozite gibi kusurlar ortaya çıkar. Ti-Ti malzemeler, tipik olarak Ti-6Al-4V veya Sınıf 2 levhaların (1-3 mm kalınlığında) direnç nokta kaynağı (RSW), oksidasyonu önlemek için inert atmosferlerde yoğun bir çekirdek oluşturur. Titanyumun yüksek mukavemeti ve düşük ısı iletkenliği, dışarı atılma veya çatlakları önlemek için hassas kontrol gerektirir. İnert gaz koruması, alfa fazının kırılma dayanımını önler ancak bu çalışmada Argon kullanılmadan da yüksek dayanım elde edilmiştir.

Çizelge 4.1 Ara tabakasız üretilen bağlantıların burma kopma kuvveti ve kopma açısı değerleri

Numune	Maksimum burulma kuvveti (N)	Maksimum burulma açısı (ϕ)
Ti-Ti	260±35	9.9±12
Al-Al	2.3±2	1.6±1.5
Ti-Al	6±10	2.2±2



Şekil 4.10 Ara tabakasız (a), Al-Al (b), Ti-Ti (c) ve Ti-Al (d) bağlantıların kırılma yüzeyleri

Al-Al bağlantısında ise, çok karmaşık bir kopma paterni ortaya çıkmıştır ki sünek malzemelerde hasar bu şekilde oluşmaktadır. Çekirdeğin orta bölgesinde düz ve yükselti alanların varlığı ve aynı zamanda kademeli kırılma veya deformasyona işaret eden katman oluşumları rahatlıkla görülmektedir (Şekil 4.10 b ve c). Ti-Al bağlantılarında ise, iki adet disk şeklinde oluşum mevcut olup, bu oluşumun yüzeyde bulunan veya lehim üzerinde bulunan buharlaşma sonucunda olduğu düşünülmektedir. Ancak geri kalan kaynak çekirdeğinin oldukça düz olduğu ve kırılmaya karşı direncin daha çok çekirdeğin orta kısmında oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca, kırılma yüzeylerinde çatlakların varlığı da dayanımın neden düşük çıktığına dair işaretler vermektedir.

4.3.2 50Ag ve 70Ag Sert Lehim Kullanılarak Yapılan Birleştirmeler

50Ag ve 70Ag sert lehimleri ile yapılan Al-Al ve Ti-Al bağlantıların SEM görüntüleri (Resim 4.5)'te verilmiştir. Resimlerde bağlantıların büyük çoğunluğunun lehimlerin ergimesi ile sorunlar yaşandığı görülmektedir. Lehimin ergimesi temel bir problem olarak kalmaktadır.

Cu-Zn-Ni gibi dolgu alaşımları, Ag bazlı alaşımlara kıyasla üstün sertlik ve kesme mukavemeti sağlar ve nikel, arayüz özelliklerini geliştirir. Lehimli bağlantılar, uyumlu malzemeler kullanıldığında mükemmel korozyon direnci ve termal iletkenlik de sunar. Alaşımlara gümüş (Ag) ilavesi, genellikle farklı kristal yapıları ve morfolojileri olan Ag bakımından zengin fazların çökmesini teşvik ederek ikincil faz oluşumunu etkiler. Zn-Ag alaşımlarında, Ag tipik olarak Zn₄Ag gibi metalik bileşikler oluşturur ve bunlar tane sınırlarında ve matris içinde çöker. Ag atomları, yaşlanma veya ısı işlem sırasında mevcut çökeltilere dahil olma veya yeni Ag bakımından zengin fazlar oluşturma eğilimindedir ve bu ikincil fazların boyutunu, dağılımını ve hacim fraksiyonunu etkiler. Örneğin, bazı alaşımlarda Ag, çökeltilerin hacim oranını artırarak dağılımlarını iyileştirir ve bazen çökeltilerin morfolojisini (iğne veya çubuk benzeri) değiştirir. İkincil fazlardaki bu değişiklikler, çökeltme sertleşmesi yoluyla mekanik mukavemeti artırabilir, ancak aynı zamanda korozyon davranışını da etkileyebilir, çünkü Ag bakımından zengin fazlar, iyi dağılmadıkları takdirde mikrogalvanik korozyonu hızlandıran katodik bölgeler olarak işlev görebilirler. Çinko bazlı sert lehim alaşımları, genellikle gümüş gibi alaşım elementleriyle geliştirilmiş olarak kabul edilebilir çekme mukavemetlerine ve yumuşak

çelik uygulamalarında pirinçle karşılaştırıldığında yüksek gerilme-gerinim davranışına sahip bağlantılar üretir. Paslanmaz çeliklerde 910°C'de 15 dakika boyunca lehimlenen Cu-Ag-Mn-Zn dolgularda bindirmeli kesme mukavemetleri 213 MPa' ya kadar ulaşır ve ıslanabilirliği artıran ve taneler arası penetrasyonu azaltan Ni kaplamalardan optimum performans elde edilir. Mikrosertlik ve kesme özellikleri Zn ve Cd'nin buharlaşmasıyla değişerek yüksek sıcaklıklarda gözenekliliğe yol açarken Ag-Zn matrislerindeki kırılmalar birleşme bütünlüğünü desteklemektedir. 50Ag ve 70Ag lehimleri ile üretilen bağlantıların burma kopma kuvveti ve burma kopma açısı değerleri Çizelge 2.7'de verilmiştir.

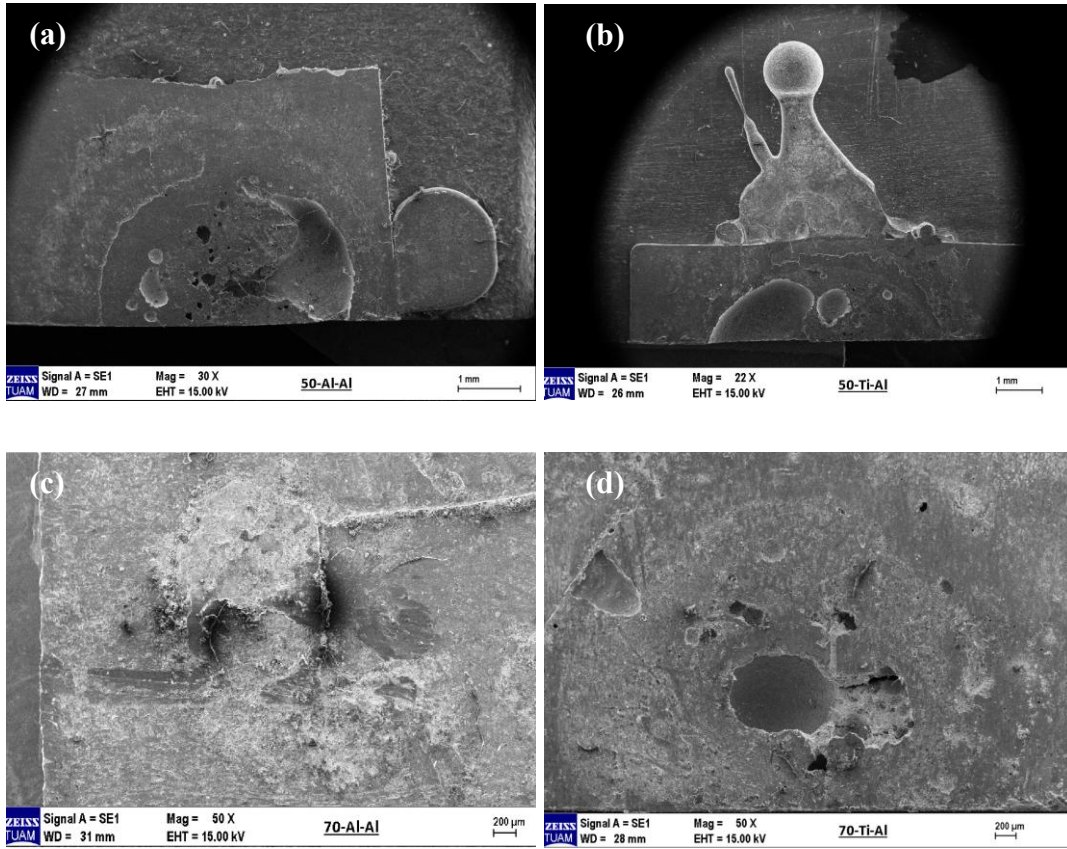
Çizelge 4.2 50Ag ve 70Ag lehimleri ile üretilen bağlantıların burma kopma kuvveti ve burma kopma açısı değerleri

Numune	Maksimum burulma kuvveti (N)	Maksimum burulma açısı (°)
50Ag		
Ti-Ti	264	11.93
Al-Al	15	2.06
Ti-Al	58	3.52
Numune	Maksimum burulma kuvveti (N)	Maksimum burulma açısı (°)
70Ag		
Ti-Ti	319	11.53
Al-Al	12	4.33
Ti-Al	93	6.11

Gümüş ilavesi, Zn50 alaşımlarında çekme mukavemetini önemli ölçüde artırırken, Cu-Ag dolgu alaşımlarındaki Mn ve Zn erime noktalarını düşürür (yaklaşık 810°C likit) ve lehimleme sonrası ana metal özelliklerinden ödün vermeden ıslanabilirliği artırır. Diğer alaşımlardaki küçük Zn ilaveleri (ağırlıkça %0,5) çekme mukavemetini korurken sert lehimin uygulama veya lehimleme sırasındaki vizkozitesini akışkanlık anlamında iyileştirir. Galvanizli saclarda, Zn kaplamalardan kaynaklanan bölgesel mikroyapı farklılıkları çekme, sertlik ve yorulma performansını etkiler. Birleşim yerleri, Mn/Zn/Ni varyasyonları ile Cu/Ag bakımından zengin katı çözeltiler gösterir; burada Ti Cu fazları ve ara yüzeylerdeki intermetalikler aşırı miktarda olduğunda sünekliği azaltabilir. Zn-Al

dolgu alaşımları düşük erime noktaları ve çelik birleştirme için iyi dökülebilirlik veya daha doğru bir tabirler akıcılık sağlar, ancak lehimleme sırasındaki elemental buharlaşma, lehim bağlantısında gözeneklilik riski taşır (Vaynman ve Fine 1999). Genel olarak, bu alaşımlar yumuşak çelik ve paslanmaz uygulamalar için yüksek mukavemetli bağlantı eldesi ve düşük sıcaklıkta yapılan sert lehimlemeye uygundur.

Resim 4.5'te Ti-Ti, Al-Al ve Ti-Al bağlantılarının kırılma yüzeyleri verilmiştir. Ti-Ti bağlantısına ait kırılma yüzeyi Resim 4.5'a kademeli kırılmayı işaret eden sünek katmanlardan oluşmaktadır. Bu şekildeki oluşumlar genellikle, kırılma başlangıç noktasının klivaj olarak başladığı ve yüksek kuvvetin lokal olarak uygulandığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Kırılma yüzeylerinde gevrek kırılmayı işaret eden düzlemsel bölgeler bulunmamaktadır. Düzlemsel bölgelerin daha çok orta kısımda ancak çok az bir alanı kapsadığı görülmektedir. Lehim çekirdeğinin kenarlarındaki dikey lineer oluşumların, burma sırasında kademeli kopmadan dolayı oluştuğu düşünülmektedir.



Resim 4.5 50Ag (a,b) ve 70Ag (c,d) sert lehimleri ile yapılan bağlantıların SEM görüntüleri

70Ag sert lehim sistemlerinde ergimenin daha yoğun olduğu düşünülürse, ergime noktasının düşük olması ve bu ergime ile beraber lehimin Ti alaşım altlık malzeme üzerine akması, kaynak çekirdek bölgesindeki boşluğun sebebini açıklamaktadır. Ayrıca 50Ag Al-Al bağlantısı ve 70Ag Ti-Al bağlantısındaki benzer ergime paternlerinin olması dayanım düşüklüğünün nasıl olduğu hakkında bilgi vermektedir ve kopmaya maruz kalan birleşme alanının dar veya az olması veya boşluklardan dolayı yüzey alanının azalması dayanım düşüklüğüne sebep olduğunu düşündürmektedir. 70Ag ile yapılan Ti-Al bağlantılarında, çekirdek bölgesindeki, kırılma oldukça bariz bir şekilde görülmektedir.

Çinko bazlı sert lehim alaşımları, genellikle Ag gibi alaşım elementleriyle özellikleri iyileştirilir ve çekme mukavemetleri belirgin oranda artar ve yumuşak çelik uygulamalarında pirinçle karşılaştırıldığında daha iyi gerilme-gerinim davranışına sahip bağlantılar üretir. Paslanmaz çeliklerde ise 910°C'de 15 dakika boyunca lehimlenen Cu-Ag-Mn-Zn dolgularda bindirmeli kesme mukavemetleri 213 MPa'ya kadar ulaşırken, yüzey gerilimini arttırıp bununla birlikte ıslanabilirliği artıran ve taneler arası penetrasyonu azaltan Ni kaplamalardan optimum performans elde edilmiştir. Burma dayanımları hakkında hiç bilgi bulunmamaktadır. Ancak Zn'nin diğer alaşım elementlerine göre dezavantajı vardır. Zn'nin buharlaşması yüksek sıcaklıklarda gözenekliliğe yol açarken Ag-Zn matrislerindeki çatlak oluşumları birleşme dayanımını azaltır. Ag ilavesi, Zn50 alaşımlarında çekme mukavemetini önemli ölçüde artırırken, Cu-Ag dolgu metallerindeki Mn ve Zn erime noktalarını düşürür (yaklaşık 810°C likit) ve lehimleme sonrası ana metal özelliklerinden ödün vermeden ıslanabilirliğini artırır. Diğer alaşımlardaki küçük Zn ilaveleri (ağırlıkça %0,5) çekme mukavemetini korurken sert lehim akışını iyileştirir ve Zn'nin Ag den sonraki en iyi özelliği ergime noktasını düşürme dışında bu özelliktir. Galvanizli saclarda, Zn kaplamalardan kaynaklanan bölgesel mikroyapı farklılıkları çekme, sertlik ve yorulma performansını etkiler. Cu içeren ara yüzeylerdeki intermetalikler aşırı olduğunda sünekliği azaltabilir ve çatlak oluşumunu tetikler. Muhtemeldir ki hem 50Ag ve hem de 70Ag lehimlerinde çatlak oluşumunun temel nedeni budur. Zn-Al dolgu maddeleri düşük erime noktaları ve çelik birleştirme için iyi lehimleme sunar, ancak buharlaşmayla beraber gözeneklilik riski ortaya çıkmaktadır ki bu çalışmada Ti-Al sisteminde bu durum görülmüştür. Genel olarak, bu alaşımlar yumuşak çelik ve paslanmaz uygulamalar için yüksek mukavemetli

düşük sıcaklıkta sert lehimlemeye uygundur. Her iki alaşım sisteminde ergime problemi bağlantı dayanımını düşürecek şekilde etkilemektedir. Ancak, bu durum, Al'nin tarafında daha çok karşımıza çıkar. En önemli sebebi ise Al'nin Ag, Cu, Zn ile yaptığı alaşım sisteminde sırasıyla, 565.8 °C (Int. Kyn. 1), 548 °C (Şekil 2.4), 382 °C (Şekil 4.3'a) ötektik sıcaklıklarına sahip olmasıdır ve ayrıca bu dönüşüm / ötektik sıcaklıklarının, bağlantının Al tarafında düşük ergime sıcaklığı ile beraber daha akıcı bir lehim oluşumuna sebep olduğu görülmektedir. Öte yandan, Ag-Cu sistemindeki ötektik sıcaklığın 780 °C (Int. Kyn. 2) olması kısmen sıvı dönüşüm sıcaklığını artırsa da çok yüksek miktarda Al bulunması bu sistemi diğerlerine göre daha etkisiz kılmaktadır. Zn-Cu (Şekil 4.3b) alaşım sisteminin 419 °C olan ötektik sıcaklığı da ergime sıcaklığının daha düşük kalmasına sebep olmakta ve lehim akma sorununa yol açmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Al-Al, Ti-Al ve Ti-Ti kombinasyonları sert ara tabaka kullanmadan ve sert lehim ara tabaka kullanılarak sabit akım değerleri ve sabit sürede, elektrik akımı kullanılarak lehimlenmiştir. Sert lehimlemede ara tabaka amacı için kullanılan sert lehimler, Zn, Al, Cu ve Ag den oluşacak şekilde dizayn edilmiş ve üretilmiştir. Üretilen lehimler daha sonra haddelenerek inceltilmiş ve 250 mikron kalınlığında iken lehim arayüzeyi olarak kullanılmıştır. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Ara tabaka kullanılmadan yapılan kaynaklarda, Al-Al, Ti-Al kombinasyonları yeterince dayanım gösterememiştir. Buna karşın Ti-Ti bağlantıları oldukça başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.
- Al-Al, Ti-Al ve Ti-Ti ara tabakalı sert elektrik direnç nokta sert lehimleme ile üretilen parçaları burma testi uygulanmıştır. Oluşturulan malzeme çiftlerinde en yüksek Ti-Ti birleştirmesinde yaklaşık olarak 102 MPa kesme dayanımı ölçülmüştür.
- Zn-Al-Cu-Ag dörtlü sisteminden iki tür Ag içeren lehim üretilmiştir. Bu lehimlerin ilkinde 50Ag, %12 oranında Ag varken ikinci türde ise %21 oranında Ag içeriği tespit edilmiştir.
- Ara tabaka olarak ürettiğimiz 50Ag sert lehimi uygulamasında Cu oranının fazla olması nedeniyle, daha kırılğan bir kaynak metali elde edilmiş ve kaynaklarda dayanım düşüklüğüne yol açacak olan birleşmeme sorununu ortaya çıkarmıştır.
- Ara tabaka olarak ürettiğimiz 50Ag'nin yüksek miktardaki Cu oranı özellikle Ti tarafında bir sorun çıkarmazken, Al tarafında oksidasyona bağlı olarak gevrek kırılma izleri ile hasara uğradığı görülmüştür.
- Ara tabaka olarak ürettiğimiz 70Ag ile yapılan sert lehimlemeli kaynaklarda, Ti-Ti sistemleri oldukça başarılı olmuş ve 70Ag lehim ara tabakası kaynak arayüzeyinde ıslatma problemi oluşturmadığından burma dayanım değerleri diğer Al-Al ve Ti-Al bağlantılarına göre daha iyidir.
- 70Ag sert lehimi ile yapılan lehimlerde, birleşme bölgesinde ergime problemi ortaya çıkmıştır. Bu ergimenin daha çok lehim arayüzeyinde meydana geldiği ve ardından lehim bölgesinin dışına taşarak toplanma eğilimi göstermiştir.

- 50 Ag ile yapılan sistemlerde nadiren görülen bu ergime probleminin sert lehim uygulama sıcaklığının yüksek olmasından kaynaklandığı veya kaynak bölgesinin veya lehim bölgesinin yeterince soğutulmamasından kaynaklanacağı düşünülmektedir.
- Kırılma yüzeyleri, Al-Al sisteminde ve Ti-Al sisteminde klivaj kırılma şeklinde oluşurken, Ti-Ti sisteminde ise parça koparma şeklinde meydana gelmiştir. Bu durumda, Ti-Al ve Al-Al bağlantılarının daha çok gevrekleşmesinin lehim uyumsuzluğu olabileceği düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Adeosun S O, Balogun S A, Osoba, AyoolaL O, Oladoye W A, 2011, Effect of Cu and Zn Addition on the Mechanical Properties of Structural Aluminum Alloy, *Journal of Modern Manufacturing Technology*, 103-110.
- Ahlers M, 1986, Martensite and equilibrium phases in Cu-Zn and Cu-Zn-Al alloys, *Progress in Materials Science*, 30(3), 135-186.
- Alam M T, Ansari A H, 2017, Review on Aluminium and Alloys for Automotive Applications, *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 5(5), 278-294.
- Aldirmaz E, Celik H, Aksoy I, 2013, SEM and X-Ray Diffraction Studies on Microstructures in Cu-26.04%Zn-4.01%Al Alloy, *Acta Physica Polonica A*, 124, 87-89.
- Anonim, 2003, Alüminyum Tarihçesi, Gelişimi, Mevcut Durumu ve Hedefleri, Ankara Alüminyum Sanayicileri Derneği, Ankara
- Anselme K and Bigerelle M, 2005, Topography Effects of Pure Titanium Substrates on human osteoblast long-term adhesion, *Acta Biomaterialia*, 1(2), 211–222.
- Asanovic V, Delijic K, Jaukovic N, 2008, A Study of Transformations of β -Phase in Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys. *Scripta Materialia*, 58(7), 599-601.
- Brazing Handbook (5th Edition), 1991, American Welding Society.
- Chaturvedi M C, 2012, *Welding and Joining of Aerospace Materials*, Woodhead Publishing Ltd, Philadelphia.
- Chen Y C, Nakata K, 2009, Microstructural Characterization and Mechanical Properties İn Friction Stir Welding of Aluminum and Titanium Dissimilar Alloys, *Materials Design*, 30(3), 469-474
- Dagdelen F, Gokhan T, Aydogdu A, Aydogdu Y, Adigüzel O, 2003, Effects of Thermal Treatments on Transformation Behaviour in Shape Memory Cu-Al-Ni Alloys. *Materials Letters*, 57(5-6), 1079-1085.

- Dehghani K, Nekahi A, Mirzaie M A M, 2010, Optimizing the bake hardening behavior of Al7075 using response surface methodology, *Materials and Design*, 31(3), 1768-1705
- Demiral F, 2015, İkiz Merdane Sürekli Döküm Yöntemiyle Üretilen AA 1050 Alüminyum Alaşımına Anodik Oksidasyon (Eloksal) İşleminin Uygulanabilme Kabiliyetinin İncelenmesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri. Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 102s, Kocaeli.
- Demirtas M, Purcek G, Yanar H, Zhang Z J, Zhang Z F, 2015, Effect of Chemical Composition and Grain Size on RT Superplasticity of Zn-Al alloys processed by ECAP. *Letters on Materials*, 5(3) 328-334
- Dezellus O, Arróyave R, Fries S G, 2011, Thermodynamic Modelling of the Ag-Cu-Ti Ternary System, *International Journal of Materials Research*, 102(3),286-297.
- DPT İhtisas Raporu, 2001, Sekizinci Beş Yıllık kalkınma Planı, Madencilik ÖİK Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri I (Asbest-Grafit-Kalsit-Fluorit-Titanyum) Çalışma Grubu Raporu, DPT:2618 – ÖİK:629, s.91, Ankara.
- Ensarioğlu C ve Çakır M C, 2005, Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü, *Mühendis ve Makina*, 46(546), 36- 46.
- Fang L, vd., 2023, Study on the Effects of Ag Addition on the Mechanical Properties and Oxidation Resistance of Sn–Zn Lead-Free Solder Alloy by High-Throughput Method, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34, 322.
- Fujii H, 1998, Strengthening of $\alpha + \beta$ Titanium Alloys by Thermomechanical Processing, *Materials Science and Engineering A*, 243(1–2), 103–108.
- Greitemeier D, Dalle Donne C, Syassen F, Eufinger J and Melz T, 2016, Effect of Surface Roughness on Fatigue Performance of Additive Manufactured Ti–6Al–4V, *Materials Science and Technology*, 32(7), 629–634.
- Guerioune M, Amiour Y, Bounour W, Guellati O, Benaldjia A, Amara A, 2008, SHS of Shape Memory CuZnAl Alloys, *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*,17(1), 41-48.

- Haraldsson J and Johansson M T, 2018, Review of Measures for Improved Energy Efficiency in Production-Related Processes in the Aluminium Industry- from Electrolysis to Recycling, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 93, 525-548.
- Hatch J E, 1984, *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*, American Society for Metals.
- Henriques V A R, Galvani E T, Petroni S L G, Paula M S M and Lemos T G, 2010, Production of Ti-13Nb-13Zr Alloy for Surgical Implants by Powder Metallurgy, *Journal of Materials Science*, 45(21), 5844–5850.
- Jacobson D M and Humpston G, 2005, *Principles of Brazing*, ASM International.
- Kejzlar P, MachutaIva J, Nová N, 2017, Comparison of the Structure of CuZn40MnAl Alloy Casted into Sand and Metal Moulds, *Manufacturing Technology*, 17(1), 44-48.
- Kenevisi M S, Mousavi Khoie S M, 2012, A Study on the Effect of Bonding Time on the Properties of Al7075 to Ti–6Al–4V Diffusion Bonded Joint, *Materials Letters*, 76,144-146.
- Li vd., 2024, Current-Induced Solder Evolution and Mechanical Property of Sn-3.0Ag-0.5Cu Solder Joints Under Thermal Shock Condition, *Journal of Alloys and Compounds*, 970, 172519.
- Li S, Du D., Zhang L, Song X, Zheng Y, Huang G, Long W, 2021, A Review on Filler Materials for Brazing of Carbon-Carbon Composites, *Reviews on Advanced Materials Science*, 60(1), 91-111
- Liang S M, Schmid-Fetzer R, 2016, Thermodynamic Assessment of The Al-Cu-Zn System, Part III: Al-Cu-Zn Ternary System. *Calphad*, 52, 21-37.
- Ma N, Murakawa H, 2010, Numerical and Experimental Study on Nugget Formation in Resistance Spot Welding for Three Pieces of High Strength Steel Sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2045–2052.
- Massalski T B, 1987, *Binary Alloy Phase Diagrams*, ASM International, Metals Park.

- Messler R W, 1999, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. Wiley VCH.
- Mostefa B, Abdelkrim A, Ali B, Mohamed B, 2012, Effect of Hardening Induced by Cold Expansion on Damage Fatigue Accumulation and Life Assessment of Aluminum Alloy 6082 T6, Materials Research, 15(6), 981- 985
- Nicholas M G, 1998, Joining Processes: Introduction to Brazing and Diffusion Bonding. Kluwer Academic.
- Nturanabo F, Masu L and Kirabira J, 2015, Novel Applications of Aluminium Metal Matrix Composites, Web of Science, Materials Science Forum, 485.
- O'Brien R L, 1991, Welding Handbook, Vol 2, Welding Processes (8th ed.). American Welding Society.
- Oerlikon Metco, 2014, An Introduction to Brazing. Oerlikon Metco (4).
- Oyar P, 2015, Titanyum ve Özellikleri, Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi, 11, 151-159.
- Sharma A, Srivastava A K, Ahn B, 2019, Microstructure, Mechanical Properties, and Drop Reliability of CeO₂ Reinforced Sn-9Zn Composite for Low Temperature Soldering, Materials Research Express 6, 056520.
- Sherepenko O, Kazemi O, Rosemann P, Wilke M, Halle T, Jüttner S, 2020, Transient Softening at the Fusion Boundary of Resistance Spot Welds: A Phase Field Simulation and Experimental Investigations for Al-Si-coated 22MnB5. Metals, 10(1), 10
- Sohn W H, Bong H H, Hong S H, 2003, Microstructure and Bonding Mechanism of Al/Ti Bonded Joint Using Al-10Si-1Mg Filler Metal, Materials Science and Engineering: A, 355, 1-2, 231-240.
- Subramanian C, 1987, Wear Properties of Aluminium Based Alloys, Black Cat Blades Ltd, Canada.
- USGS, 2019 (The United States Geological Survey). National Minerals Information Center, Titanium Statistics and Information. Annual Publications.
- Uzun H, 2018, Sert Lehimleme Prensipleri, Değişim Yayınları.

- Vuorinen V, Kouhia R, Könönen M, Kivilahti J K, 2024, Bonding of Ceramics to Silver-Coated Titanium—A Combined Theoretical and Experimental Study, *Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials*, 112:e35407.
- Vaynman S and Fine M E, 1999, Development of Fluxes for Lead-Free Solders Containing Zinc, *Scripta Materialia*, 41 1269–1271
- Wang S Q, Patel V K, Bhole S D, Wen G D, Chen D L, 2015, Microstructure and Mechanical Properties of Ultrasonic Spot Welded Al/Ti Alloy Joints, *Materials & Design*, 78, 33-41.
- Weissbach W, 1993, *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi* (Çev: S. Anık, S. Anık ve M. Vural). İstanbul: Birsen Kitabevi.
- Woodruff L G, Bedinger G M, Piatak N M, 2017, USGS (The United States Geological Survey), 23, Virginia.
- Yağcıgil, H, 1997, *Alüminyum Mamulleri Sanayi*, Türkiye İş Bankası A.Ş. Genel Müdürlük, İktisadi Araştırma ve Planlama Müdürlüğü.
- Yalçın H ve Gürü M, 2012, “Malzeme Bilgisi”, *Palme Yayınları*, 3, Ankara.
- Yaman K, 2018, *Ti6Al4V Alaşımı Yüzeyinde Hidrotermal Yöntemi ile Hidroksiapatit (Hap) Oluşturulması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Zhecheva A, Sha W, Malinov S and Long A, 2005, Enhancing the Microstructure and Properties of Titanium Alloys Through Nitriding and Other Surface Engineering Methods. *Surface & Coatings Technology*, 200(7), 2192-2207.
- Zhou K, Wang H P, Chang J, Wei B, 2011, Specific Heat Measurement of Stable and Metastable Liquid Ti–Al Alloys, *Applied Physics A* 103(1),135-137.
- Zhou L, Yuan T, Tang J, He J and Li R, 2019, Mechanical and Corrosion Behavior of Titanium Alloys Additively Manufactured by Selective Laser Melting – A Comparison Between Nearly β Titanium, α Titanium and $\alpha + \beta$ Titanium, *Optics and Laser Technology*, 119, 1–12.

İnternet Kaynakları

- 1-<https://computherm.com/al-ag>, erişim tarihi 02.12.2025
- 2-<https://computherm.com/ag-cu>, erişim tarihi 02.12.2025
- 3- <https://www.mta.gov.tr/titanyum>, erişim tarihi 03.12.2025
- 4- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Titanyum>, erişim tarihi 03.12.2025
- 5- <https://standards.globalspec.com/std>, erişim tarihi 03.12.2025
- 6- <http://www.world-mining data.info/pdf/WMD2018. Pdf>, erişim tarihi 04.12.2025

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Uğur TOSUN
Doğum Yeri ve Tarihi : Tokat/02.07.1995
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon / e-posta) : 0530 285 95 60/ugrrtsn@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Avcılar Endüstri Meslek Lisesi (2009 – 2013)
Önlisans : Süleyman Demirel Üniversitesi, Makine Teknolojisi Böl.
(2013-2015)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Otomotiv Müh. Böl. (2018–
2022)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Hava Kuvvetleri Komutanlığı (2019 – Devam Ediyor)