

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİZ MERDANE DÖKÜM TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMİŞ 1050
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE TANE İNCELTİCİNİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe YUNAK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

SUBAT 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİZ MERDANE DÖKÜM TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMİŞ 1050
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE TANE İNCELTİCİNİN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe YUNAK

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serdar ASLAN

ŞUBAT 2024

Tuğçe Yunak tarafından hazırlanan “İkiz Merdane Döküm Tekniği İle Üretilmiş 1050 Alüminyum Alaşımının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerine Tane İncelticinin Etkisi ” adlı tez çalışması 28.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Doç. Dr. Serdar ASLAN (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Mediha İPEK Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi Harun GÜL Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARINA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “İkiz Merdane Döküm Tekniği ile Üretilmiş 1050 Alüminyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Tane İncelticinin Etkisi” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(05/01/2024)

Tuğçe YUNAK



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca her zaman bana destek olan başta danışman hocam Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisi Sayın Doç. Dr. Serdar ASLAN'a ve Arş. Gör. Erhan DURU hocam ile birlikte bütün hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışmanın yürütülmesi için bütün fabrika imkanlarını önüme seren ve her daim bana destek olan başta Yassı Mamuller Ar-Ge yöneticimiz Onur BİRBAŞARA'a, Yassı Mamuller Proses Kalite Yöneticimiz Eren TORAMAN'a, Ar-Ge Laboratuvar Uzman Yardımcımız Samet SEVİNÇ'e, Mekanik Laboratuvar Teknisyenimiz Ahmet BİCAT ile birlikte bütün ASAŞ ALÜMİNYUM ailesine yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sürecinde her konu da beni destekleyen arkadaşlarım Dr. Salimeh GOHARİKOHNEHSHAHRİ'ye, İbrahim USTA'ya, Seda EĞRİ'e ve diğer tüm arkadaşlarıma yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ve en önemlisi hayatım boyunca beni maddi ve manevi hep destekleyen Canım Ailem'e çok teşekkür ederim.

Tuğçe YUNAK



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ETİK İLKE VE KURALLARINA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Alüminyum Ve Alüminyum Alaşımları	1
1.1.1. Alüminyum	1
1.1.2. Alüminyum alaşımları.....	2
1.1.2.1. Dövme (işlem) alaşımları.....	3
2. ALÜMİNYUM LEVHA ÜRETİMİNDE DÖKÜM YÖNTEMLERİ	7
2.1. Geleneksel İngot Döküm (Direct Chill) Yöntemi.....	7
2.2. İkiz Bant Döküm (Hazelett) Yöntemi	8
2.3. İkiz Merdaneli Sürekli Döküm	8
2.3.1. İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları	10
3. ALÜMİNYUM SEKTÖRÜNDE KULLANILAN TANE İNCELTİCİLER..	13
3.1. Tane İnceltici Olarak Titanyum Kullanımı	14
3.2. Tane İnceltici Olarak Bor Kullanımı	15
3.3. Tane İnceltici Olarak Titanyum Ve Bor Kullanımı	16
3.4. Çekirdeklenme Teorileri	17
3.4.1. Peritektik hulk teorisi	17
3.4.2. Hiper çekirdeklenme teorisi	18
4. ANODİK OKSİDASYON	19
4.1. Anodik Oksidasyonun Avantajları	19
4.2. Anodik Oksidasyon Ekipmanları	20
4.2.1. Anodik oksidasyon havuzu	21
4.2.2. Katot	22
4.2.3. Elektrolitik	22
4.2.4. Soğutma suyu	23
4.2.5. Karıştırma aparatı.....	23
4.2.6. Askılar	24
4.3. Anodik Oksidasyon İşlemi.....	24

4.3.1. Mekanik ön işlemler.....	25
4.3.2. Kimyasal ön işlemler.....	25
4.3.2.1. Yağ alma	26
4.3.2.2. Aşındırma (dağlama).....	26
4.3.2.3. Nötralizasyon	27
4.4. Anodik Oksidasyon İşleminin Uygulanması.....	27
4.5. Anodik Oksidasyon Yapısı.....	29
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
5.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler Ve Numunenin Üretimi	31
5.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar	32
5.2.1. Spektrometre cihazı.....	32
5.2.2. Sem (taramalı elektron mikroskobu) cihazı	32
5.2.3. Optik mikroskop.....	33
5.2.4. Frezeleme, Zımparalama, Parlatma ve Dağlama Cihazları.....	33
5.2.5. Makro-mikro sertlik cihazları.....	34
5.2.6. Çekme cihazı	35
5.2.7. Pürüzlülük cihazı.....	35
5.3. Deneysel Sonuçlar.....	36
5.3.1. Spektrometre analizi.....	36
5.3.2. Mikroyapı incelemeleri	36
5.3.3. Sem incelemeleri	38
5.3.4. Sertlik testi sonuçları.....	39
5.3.5. Çekme testi sonuçları	40
5.3.6. Pürüzlülük testi sonuçları	41
5.3.7. Eloksoal kaplama görüntüleri incelemesi	41
6. GENEL SONUÇLAR	43
KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	49

KISALTMALAR

AA : Alüminyum Standartı (Aluminum Association)

TRC : İkiz Merdaneli Döküm (Twin Roll Casting)

DC : Geleneksel İngot Döküm (Direct Chill Casting)

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)

DIN : Alman Standartlar Enstitüsü (Deutsches Institut für Normung)

ISO : Uluslararası Standartlar Teşkilatı (International Standard Organization)





SİMGELER

μm	: Mikrometre
cm	: Santimetre
m	: Metre
mm	: Milimetre
M	: Molarite
°C	: Santigrat
MPa	: Megapascal
GPa	: Gigapascal
Nm	: Nanometre
g	: Gram
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
kgf	: Kilogramkuvvet
gf	: Gramkuvvet
dk	: Dakika
HB	: Brinell Sertlik Testi
HV	: Vickers Sertlik Testi
Ra	: Aritmetik Ortalama Pürüzlülük
Rz	: On Noktadan Ortalama Pürüzlülük
Rq	: Kare Ortalama Pürüzlülük



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Döküm alaşımlarının AA standartlarında gösteriliş biçimleri (Demiral, 2015)	3
Tablo 1.2. İşlem alaşımlarının AA standartlarında gösteriliş biçimleri (Bala, 2023; Demiral, 2015; Serdarlı, 2011).....	3
Tablo 5.1. Çalışmada kullanılan alaşımların kimyasal bileşimi.....	36
Tablo 5.2. Çekme testi sonuçları.	40
Tablo 5.3. Pürüzlülük testi sonuçları.	41



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. DC döküm yöntemi akışı (Demiral, 2015)	7
Şekil 2.2. İkiz Bant Döküm Makinası Şematik Gösterimi (Demiral, 2015).....	8
Şekil 2.3. İkiz Merdane Döküm Yöntemindeki Katılaşma Ve Haddeleme Prensibi (Aktuğ, 2009)	9
Şekil 2.4. İkiz Merdaneli Döküm yöntemi (Karakoyun, 2007)	10
Şekil 3.1. Al-Ti Denge diyagramı (Yaman, Kocaman, & Barış, 2022; Yapıcı, 2012)	15
Şekil 3.2. Al-Ti sistemlerinde peritektik reaksiyonla α -Al'un çekirdeklenmesi (Onat, 2011; Yapıcı, 2012).....	15
Şekil 3.3. A356 alaşımında 3 farklı tane incelticinin tane boyutuna etkisi (Sigworth ve Kuhn 2007).	16
Şekil 3.4. Peritektik Hulk teorisinin modeli; a) $TiAl_3$ 'ün kısmı çözünmesi ve $TiAl_3$ 'e B'nin difüzyonu b) TiB_2 'nin partiküller halinde birikmesi. c) $TiAl_3$ üzerinde TiB_2 'nin koruyucu tabaka oluşturması d) Al ve Ti'nin koruyucu tabaka boyunca eş zamanlı büyümesi e) Çekirdek ve α -Al'un büyümesi (Gloria, 2001; Yapıcı, 2012).....	17
Şekil 3.5. Hiper Çekirdeklenme teorisi modeli, a) Eriyikte yoğun Ti miktarı ($Ti/B > 2.21$), b) TiB_2 -Sıvı metal yüzeyinde ayrışan serbest Ti, c) TiB_2 üzerinde $TiAl_3$ tabakasının oluşumu, d) Peritektik reaksiyonla α -Al çekirdeklenmesi (Gloria, 2001; Yapıcı, 2012).....	18
Şekil 4.1. Anodik oksidasyon işleminin şematik görünümü (Övündür, 2014).....	21
Şekil 4.2. Eloksal kaplama havuzları görünümü(Çoruhlu, 2023).....	21
Şekil 4.3. Anodik Oksidasyon Banyosu Dizaynı (Docplayer, 2023).	27
Şekil 4.4. Oksit tabakasının şematik gösterimi.....	29
Şekil 5.1. Eloksal kaplama işleminin şematik gösterimi.	32
Şekil 5.2. Spektrometre Cihazı	32
Şekil 5.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Cihazı	32
Şekil 5.4. Optik Mikroskop.....	33
Şekil 5.5. Freze Cihazı	33
Şekil 5.6. Zımparalama ve Parlatma Cihazı.....	34
Şekil 5.7. Dağlama Cihazı	34
Şekil 5.8. Makro-Mikro Sertlik Cihazları	35
Şekil 5.9. Çekme Cihazı	35
Şekil 5.10. Pürüzlülük Cihazı	36
Şekil 5.12. Al-5Ti-0,2 B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levhanın kesit mikroyapı görüntüleri.	37
Şekil 5.13. Al-5Ti-0,2 B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levhanın merdane yüzeyine yakın kesit mikroyapı görüntüleri.	38
Şekil 5.14. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levha kesit SEM görüntüleri.....	39

Şekil 5.15. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levha merkez hattı SEM görüntüleri.....	39
Şekil 5.16. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levhaların makro-sertlik ve mikro-sertlik değerleri.	40
Şekil 5.17. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levhaların çekme testi grafikleri.	41
Şekil 5.18. Eloksal kaplanmış numunelerin yüzey görüntüleri.	42



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Alüminyumun özellikleri (Can, 2022).....	2
Çizelge 4.1. Anodik oksidasyon işleminde kullanılan elektrolitler ve buna bağlı olarak değişen parametreler (Şişmanoğlu, 2009).....	23





İKİZ MERDANE DÖKÜM TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMİŞ 1050 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE TANE İNCELTİCİNİN ETKİSİ

ÖZET

Alüminyum alaşımları; özellikle hafiflik, işlenebilirlik, ısı-elektrik iletkenliği ve korozyona karşı dirençli olması gibi üstün özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Alüminyum alaşımlarında malzemenin mikroyapısı kontrol edilerek, üstün mekanik özellikler ve yüzey kalitelerisine ulaşabilmek için tane incelticiler kullanılmaktadır. Katılaşma işlemi sırasında kullanılan tane incelticiler ince ve eş eksenli tanelerin oluşumunu sağlayarak, malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileşmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, tane inceltici kullanılmış alüminyum malzemelerde beslenme kabiliyetlerinin yüksek olması porozitesiz ve homojen bir yapının oluşmasında alüminyum malzemelere avantaj sağlamaktadır. Alüminyum alaşımlarında yüzey dayanıklılığını artırmak için anodik oksidasyon (eloksallanma) işlemi yapılmaktadır. Fakat ikiz merdane döküm yöntemi ile üretilen malzemelerin yüzey kalitesi bu işlem için uygun olmamaktadır.

Bu çalışma, tane incelticilerin alüminyum alaşımlarının üzerindeki etkisini araştırmakta ve çeşitli endüstriyel uygulamalar için önemli çıkarımlar ortaya koymaktadır. Araştırmada, alüminyum levhalar üretmede hassasiyeti ve verimliliği ile tanınan ikiz merdaneli döküm metodundan yararlanılmıştır. Bu metod ile üretilen AA1050 alüminyum alaşımı üzerinde Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B olan iki farklı tane incelticinin malzemedeki mikroyapısal, mekanik ve yüzey kaliteleri üzerindeki incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin mikroyapısal, mekanik ve yüzey özelliklerini karşılaştırmak amacıyla spektrometre, optik mikroskop, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), pürüzlülük cihazı, çekme ve sertlik cihazları kullanılmıştır. Ayrıca eloksallanmadan sonraki nihai ürünün yüzey kalitesini incelemek için gözle kontrol gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, Al-5Ti-1B tane incelticisi kullanılan AA1050 alüminyum alaşımında daha fazla bulunan borun belirgin etkisi ortaya çıkarılmıştır. Bu alaşımı SEM analizinde incelediğimizde intermetalik yapıların azaldığını ve daha homojen bir yapının ortaya çıktığı net bir şekilde görülmüştür. Bunun ile birlikte optik mikroskop görüntülerinde tane boyutlarının küçüldüğü ve daha tanecikli bir yapı oluşmasına sebebiyet vermesinin yanında akma , çekme ve makro-mikro sertlik değerleri sırasıyla ortalama 75MPa, 97MPa, 27HB ve 32,9 HV ‘den 84MPa, 102MPa, 30HB ve 38,2HV ‘ye yükselmesi Al-5Ti-1B alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki iyileşmelerin net bir göstergesi haline gelmiştir. Mikroyapıda elde edilen bu gelişmeler ile özellikle ikiz merdane döküm tekniği ile üretilen malzemelerde anodik oksidasyon(eloksallanma) işleminin de uygulanabilirliğini ortaya koymuştur.



EFFECT OF GRAIN REFINER ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 1050 ALUMINUM ALLOY PRODUCED BY TWIN ROLLER CASTING TECHNIQUE

SUMMARY

Aluminum is a widely used metal globally, finding extensive applications across various industries. It is recognized for its lightweight nature, high strength-to-weight ratio, excellent formability, and corrosion resistance. These attributes make it a preferred choice, notably in industries such as aerospace, automotive, construction, food packaging, and the electrical sector. Additionally, aluminum is a recyclable material, which holds significant importance in terms of sustainability. Often utilized in alloy form, its properties can be enhanced by combining it with different elements. With its durability, lightweight structure, and ease of processing, aluminum enjoys broad applications within the industry.

Grain refiners are used in aluminum alloys to achieve superior mechanical properties and surface quality by controlling the microstructure of the material. Grain refiners used during the solidification process help improve mechanical properties by ensuring the formation of fine and equiaxed grains. In addition, the high nutritional capabilities of aluminum materials in which grain refiners have been used and the formation of a porosity-free and homogeneous structure provide an advantage for aluminum materials.

In the aluminum industry, grain refiners such as Al-Ti, Al-B, and Al-Ti-B are widely employed. Titanium particles create new nucleation sites, whereas boron supports the formation of fine and equiaxed grains. Due to boron's grain refining effect on aluminum material, the Al-Ti-B combination has become the most preferred grain refiner in use today.

Al-Ti-B grain refiners are a type of grain control agent commonly used in aluminum alloys, comprising a mixture of titanium and boron elements added to these alloys. This combination typically enhances the durability, strength, and workability of alloys, enabling the production of higher-performance materials. It contributes to the improvement of structural and mechanical properties of aluminum alloys, facilitating the customization of materials according to desired specifications.

The major advantage of Al-Ti-B grain refiner lies in preventing the dissolution of TiAl_3 in the liquid aluminum system and minimizing the tendency of TiB_2 particles to agglomerate. TiAl_3 particles are typically found to be around 30-40 μm in aluminum, while TiB_2 particles range from 1-2 μm in size. The distinct behavior and sizes of these particles in liquid aluminum have led several researchers to propose various nucleation theories.

This study investigates the effect of grain refiners on aluminum alloys and reveals important implications for various industrial applications. In the research, the twin-roll casting method, known for its precision and efficiency in producing aluminum sheets, was used. The twin-roll casting method presents several advantages when applied to

materials. This process facilitates the production of metal sheets or strips with enhanced properties, including improved surface quality and uniformity. One significant advantage lies in its ability to create materials with fine microstructures and reduced porosity, leading to enhanced mechanical properties such as increased strength and durability. Moreover, the twin-roll casting technique allows for precise control over the final product's thickness, enabling the production of thinner materials without compromising their integrity or structural integrity.

Various coating processes are preferred to increase surface durability in aluminum alloys. These methods encompass applications such as anodizing, chromium and nickel plating, plasma spraying, cathodic electrophoretic coating, and electrostatic painting. The anodizing method involves creating an Al_2O_3 layer on the surface, leveraging the oxidizing property of aluminum alloys. Through this technique, desired corrosion resistance can be achieved on the aluminum alloy surface, enhancing surface hardness for improved wear resistance, and achieving a more aesthetically pleasing appearance. However, the surface quality of materials produced by the twin-roll casting method is not suitable for this process.

In this study, AA1050 alloy produced by twin roll casting method was used. At the same time, two different grain refiners were used in the study: Al-5Ti-0.2B and Al-5Ti-1B. The study started by preparing the alloy consisting of 99.5% aluminum, which was subjected to a controlled melting process in a furnace operating at temperatures between 700-750 °C. The molten aluminum was then transferred to the holding furnaces without interruption. From these designated holding furnaces, the liquefied aluminum is directed towards the runners leading to the rolls at a precisely determined angle. The liquid, which passed through the addition of grain refiner (Al-5Ti-0,2 / Al-5Ti 1B), hydrogen removal and mechanical filtering, was transferred to the tundish system through aluminum runners and fed to the rollers through the type. As soon as the liquid aluminum transferred between the rollers came into contact with the water-cooled roller surfaces moving in opposition to each other, solidification occurred and plate production took place.

Elemental analysis was performed to determine the chemical composition of the produced sheets. Scanning electron microscope (SEM) was used to examine the surface topography of the samples taken from the plate. An optical microscope was used to examine the microstructure images of samples selected from the plate. In order to obtain a better appearance in terms of morphology, the samples were removed from cold bakelite and left to dry for 24 hours before polishing and polishing. After the bakelite samples were frozen, they were sanded. 500, 1200 and 2400 SiC drilling operations were performed on the sanding device, respectively. Application of silica, lubricant and diamond resolution method for polishing process. Etching was carried out with an electrolytic etching device using tetraflora boric acid. Macro-hardness properties are checked with a steel ball of 2.5 mm in diameter by applying a force of 62.5 kgf. A load of 50 gf was applied to the cross-sectional samples taken for microhardness measurements for 10 seconds, and this load was applied to the sample in 5 different ways for more accurate measurements, and the average cross-section value was determined as the data value. A device with a capacity of 50 kN was used for the tensile test. The test speed for the samples was determined as 10 mm/min and the measurement length was set as 50 mm. All sample measurements were carried out on a total of four samples, two for each diluent, in the 0° and 90° directions, in accordance with the DIN EN ISO 6892-1 test capacity.

The results showed that in the spectral analysis, the amount of boron in the AA1050 aluminum alloy plate using Al-5Ti-1B grain refiner was 5 times higher than Al-5Ti-0.2B. When we examined this alloy in SEM analysis, it was clearly seen that the intermetallic structures decreased and a more homogeneous structure emerged. In addition to this reduction in grain sizes determined via optical microscope. This reduction in grain size result in increase in mechanical properties namely yield strength increased from 75MPa to 84 MPa, tensile Strength increased from 97 MPa to 102 MPa, hardness in brinell increased from 27 HB to 30 HB and brinell in Vickers increased from 32,9 HV to 38,2 HV. These developments in microstructure have demonstrated the applicability of the anodic oxidation (anodizing) process, especially in materials produced by the twin roll casting technique.





1. GİRİŞ

1.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

1.1.1. Alüminyum

Bakır kurşun gibi bazı ağır metaller Milattan önce 6000-7000 yıllarında üretilip kullanılırken, alüminyum ve magnezyum gibi metaller ancak 19.yy'ın başlarında keşfedilmeye ve üretilmeye başlanılmıştır. Bunun nedeni alüminyum gibi hafif metallerin üretiminin ağır metallerden farklı olmasıdır. Elektriğin keşfi ve onun endüstriyel ölçüde kullanılmasıyla birlikte hafif metallerin üretiminin keşfi gerçekleşmiştir (Demiral, 2015).

1807'de alüminyum elementine ismini vermeyi öneren Humphry Davy, ilk alüminyumu demir alaşımının bir bileşeni olarak keşfetmiştir. 1821'de Fransa'nın Arles yakınındaki Les Baux yerleşkeden adını alan alüminyumun hammaddesi boksit bulunmuştur. Alüminyum ilk kez 1825 'te Danimarkalı bilgin Oersted tarafından potasyum amalgam ile birlikte alüminyum klorürü indirgeyerek tam anlamıyla hayatımıza girmiştir. 1854'te ünlü Fransız kimyacı Deville, katı kütle olarak alüminyum üretmeyi başarmıştır (Demiral, 2015).

Alüminyum, dünyada en çok bulunan elementler arasındadır. Fakat saf halde bulunması zordur. Görünüşü mat gümüş rengine benzer. Fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyi olması nedeniyle otomotiv, havacılık, inşaat ve gıda gibi bir çok sektörün vazgeçilmezi haline gelmiştir (Can, 2022; Pozan, 2022).

Alüminyumun genel özellikleri;

- Doğada çok bulunan, ucuz ve düşük yoğunluğa sahip bir malzemedir.
- Elektrik ve ısı iletkenliği yüksektir.
- Diğer metal gruplarına göre daha yumuşaktır ve işlenebilirliği yüksektir.
- Spesifik mukavemeti (esneklik modülü/yoğunluk oranı) yüksektir.
- Sertliği az olduğu için aşınma direnci düşüktür.
- Alüminyumu üzerinde oluşan koruyucu oksit tabakası korozyona karşı dirençli olmasını sağlar.

- Ergime sıcaklığının yüksek olmaması ısıtma işlemlerinde yüksek sıcaklıklara rahat çıkılmasını sağlar.
- Patlama, yanma ve alev almaya karşı dirençlidir.
- Mukavemetini artırıcı işlemlerin yapılmasına müsait bir yapısı vardır.
- Geri dönüştürülebilirler.
- Süper iletkenlerdir (Can, 2022).

Çizelge 1.1. Alüminyumun özellikleri (Can, 2022)

Özellik	Değer
Yoğunluk, g/cm ³	2,70 ^[10]
Esneklik Modülü, GPa	68,9 ^[6,11]
Mukavemet, MPa	290 ^[6,11]
Akma Mukavemeti, MPa	30 ^[10]
Spesifik Mukavemet, Nm/kg	11,1 ^[10]
Isıl İletkenlik, W/m°C	221 ^[6,11]
Isıl Genleşme Katsayısı ($\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) (25–100°C)	23,6 ^[6,11]

1.1.2. Alüminyum alaşımları

Alüminyum alaşımları, genellikle döküm veya dövme işlemleri gibi teknikler ile üretilir. Bu işlemler farklı özelliklere sahip alaşımların elde edilmesine olanak sağlar.

Döküm alüminyum alaşım sıvı haldeki malzemenin spesifik olarak tasarlanmış bir kalıbın boşluğuna dökülüp sertleşmesiyle oluşur. Bu alaşımlar genellikle düşük mukavemet ve yüksek şekillendirilebilirlik özelliklerine sahiptir. Döküm alaşımları genellikle basınçlı döküm, kum döküm veya kokil döküm gibi farklı döküm teknikleri ile üretilir.

Dövme alüminyum alaşımları ise genellikle dövme alaşımlara göre daha yüksek mukavemet, sertlik ve dayanıklılık gösterir. Bu alaşımlar, bükme, damgalama, ekstrüzyon, haddeleme ve katı durumdaki işlemler yoluyla, genellikle plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup kolayca şekillendirilebilen alaşım türleridir. Dövme işlemi, alaşımın kristal yapısını sıkıştırarak daha homojen ve daha sağlam bir yapı elde etmeye yardımcı olur.

Alüminyum alaşımları, farklı endüstriyel gereksinimlere uygun olarak çeşitli kompozisyonlarda ve özelliklerde üretilebilir. Bu alaşımların döküm veya dövme işlemleriyle şekillendirilmesi, kullanım amacına, dayanıklılık gereksinimlerine ve işlenme kolaylığına bağlı olarak tercih edilir (Gökşahin, 2007; Serdarlı, 2011).

Tablo 1.1. Döküm alaşımlarının AA standartlarında gösteriliş biçimleri (Demiral, 2015)

Döküm Alaşımları	Ana Alaşım Elementi	Isıl İşlem Yapılabilir
1XX.X	Ticari Saflıkta Alüminyum	Hayır
2XX.X	Al- Cu	Evet
3XX.X	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Bazıları
4XX.X	Al-Si	Hayır
5XX.X	Al-Mg	Hayır
6XX.X	Kullanılmamış seri	-
7XX.X	Al-Mg-Zn	Evet
8XX.X	Al-Sn	Evet
9XX.X	Kullanılmamış seri	-

Tablo 1.2. İşlem alaşımlarının AA standartlarında gösteriliş biçimleri (Bala, 2023; Demiral, 2015; Serdarlı, 2011).

İşlem Alaşımları	Ana Alaşım Elementi	Isıl İşlem Yapılabilir
1XXX	Min %99 Saflıkta Alüminyum	Hayır
2XXX	Al-Cu ve Al-Cu-Li	Evet
3XXX	Al-Mn	Hayır
4XXX	Al-Si Al-Mg-Si	Evet
5XXX	Al-Mg	Hayır
6XXX	Al-Mg-Si	Evet
7XXX	Al-Mg-Zn	Evet
8XXX	Al-Li, Sn, Zr, B	Evet
9XXX	Kullanılmayan Seri	-

1.1.2.1. Dövme (işlem) alaşımları

1.1.2.1.1. İşlem alaşımları 1xxx serisi

1XXX serisi %99,5 Al. ve %0,5'i diğer elementlerden oluşur. Bu alaşım yüksek saflıkta alüminyum içermektedir.

- **1XXX Serisi alüminyumun alaşımasının özellikleri:**

Yüksek İşlenebilirlik: Dislokasyonların hareketlerine karşı çok az engel içerdiğinden dolayı kolay şekillenebilmektedir. Bu alaşımın işlenmesi kolaydır ve dövülme, bükülme, haddeleme işlemleri gibi birçok işlem için uygundur.

Düşük Mukavemet: 1XXX serisi alüminyum alaşımı yüksek işlenebilirlik özelliğine sahip olmakla birlikte düşük mukavemete sahiptir. Bu sebeple daha çok işlenebilirlik odaklı uygulamalarda tercih edilir.

Korozyon Direnci: Genel olarak alüminyum alaşımları, doğal olarak oksitlenerek koruyucu bir tabaka oluştururlar. Bu tabaka, alaşımın çoğu ortamda korozyona karşı dayanıklı olmasını sağlar.

İletkenlik ve Termal Özellikler: Elektriksel iletkenlik özellikleri iyi olan 1XXX serisi alüminyum alaşımı, düşük sıcaklıklarda dahi iyi performans gösterir.

Hafiflik: Alüminyum, düşük yoğunluğa sahip bir metaldir. Bu özelliği sayesinde yapısal olarak kullanıldığında hafiftir.

1XXX serisi alüminyum alaşımı, genellikle genel amaçlı uygulamalarda, elektrik ve elektronik sektöründe, kaplama ve dekoratif amaçlı kullanımlarda tercih edilir. Yüksek işlenebilirlik ve kolay şekillendirme özellikleri nedeniyle işlenmiş ürünlerin imalatında da sıklıkla kullanılır. Bunların haricinde kaynak yapılabilme kabiliyetinede sahiptir (Aktuğ, 2009; Kaya, 2019).

1.1.2.1.2. İşlem alaşımları 2xxx serisi

Bu alaşımda alüminyumun yanında yüksek oranda bakır elementi içerir. Yüksek sıcaklıklarda mukavemeti koruyabilen, ısıl işlem ile birlikte çeliklerin mekanik özelliklerine benzer özellikler gösterirler. Uçak tasarımlarında etkin bir şekilde kullanılmaktadırlar (Aktuğ, 2009; Kaya, 2019).

1.1.2.1.3. İşlem alaşımları 3xxx serisi

Bu alaşımda alüminyumun yanında yüksek oranda mangan elementi bulunur. Şekil değiştirme ve kaynak kabiliyetinin yanında korozyona direnci de yüksektir. Kimyasal kaplar, içecek kutuları, borular, endüstriyel çatılarda kullanılır (Aktuğ, 2009; Kaya, 2019).

1.1.2.1.4. İşlem alaşımları 4xxx serisi

Bu alaşımda alüminyumun yanında yüksek oranda silisyum elementi bulunur. Aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek ve termal genleşme katsayısı düşük alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha imalatında ve yüksek sıcaklığa dayanıklı parçaların imalatında kullanılır (Aktuğ, 2009; Kaya, 2019).

1.1.2.1.5. İşlem alaşımları 5xxx serisi

Bu alaşımda alüminyumun yanında yüksek oranda magnezyum elementi bulunur. Magnezyum ilavesi arttıkça korozyon dayanımı, sertlik, mukavemet, deformasyon hızı artar, süneklik azalır. Gemi sanayi, vinç parçaları, otomotiv sektöründe kullanılmaktadır (Aktuğ, 2009; Kaya, 2019).

1.1.2.1.6. İşlem alaşımları 6xxx serisi

Bu alaşımda alüminyumun yanında yüksek oranda silisyum ve magnezyum elementi bulunur. İşlenebilirlikleri, kaynaklanabilirlikleri ve korozyon dirençleri yüksektir. Sac, levha, ekstrüzyon ürünlerinde, mimari uygulamalarda, köprü korkuluklarında ve kaynaklı yapılarda kullanılır (Aktuğ, 2009; Kaya, 2019).

1.1.2.1.7. İşlem alaşımları 7xxx serisi

Bu alaşımda alüminyumun yanında yüksek oranda çinko elementi bulunur. Ayrıca mukavemeti arttırmak için Mg, Cu, Mn ve Cr elementleri de kullanılmaktadır. Bu seri alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Hava kuvvetlerinde kullanılmaktadır (Aktuğ, 2009; Kaya, 2019).

1.1.2.1.8. İşlem alaşımları 8xxx serisi

Bu alaşımda alüminyumun yanında yüksek oranda lityum elementi bulunur. Bu alaşımlar yüksek dayanıma ve sertliğe sahiptir. Uçak ve uzay yapılarında, nükleer enerji tesislerinde kullanılmaktadır (Aktuğ, 2009; Kaya, 2019).

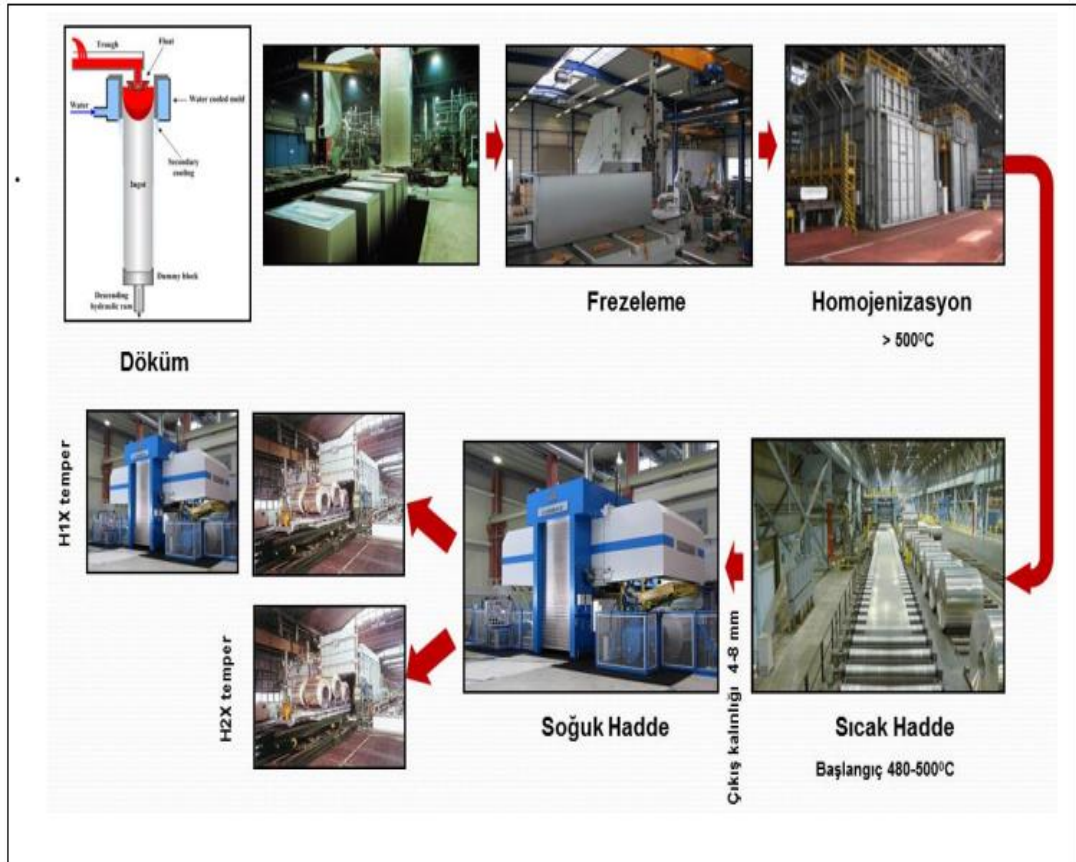


2. ALÜMİNYUM LEVHA ÜRETİMİNDE DÖKÜM YÖNTEMLERİ

2.1. Geleneksel İngot Döküm (Direct Chill) Yöntemi

Demir dışı metallerinin silindir ve kare ingotlarının döküm yöntemine verilen addır. İngotların şarjı gerçekleştirildikten sonra döküm öncesi rafinasyon işlemi yapılarak, oluşturulan slabların yüzeyindeki oksit tabakası giderilir ve homojenizasyon ısı işlemi yapılır. Daha sonra 480-500° de sıcak haddeleme işlemi yapıp, 4-8 mm malzemeyi soğuk haddede haddeledikten sonra temperleme (menevişleme) işlemi ile birlikte DC levha döküm prosesi gerçekleşmiş olur (Atlı, 2007; Malcıoğlu, 2022).

İngot alüminyuma şekil vermek kolaydır ve dayanımı yüksektir. Geniş katılaşma aralığına sahip olmasından kaynaklı birçok alaşım türünde üretilebilme imkanı vardır (Atlı, 2007; Malcıoğlu, 2022).

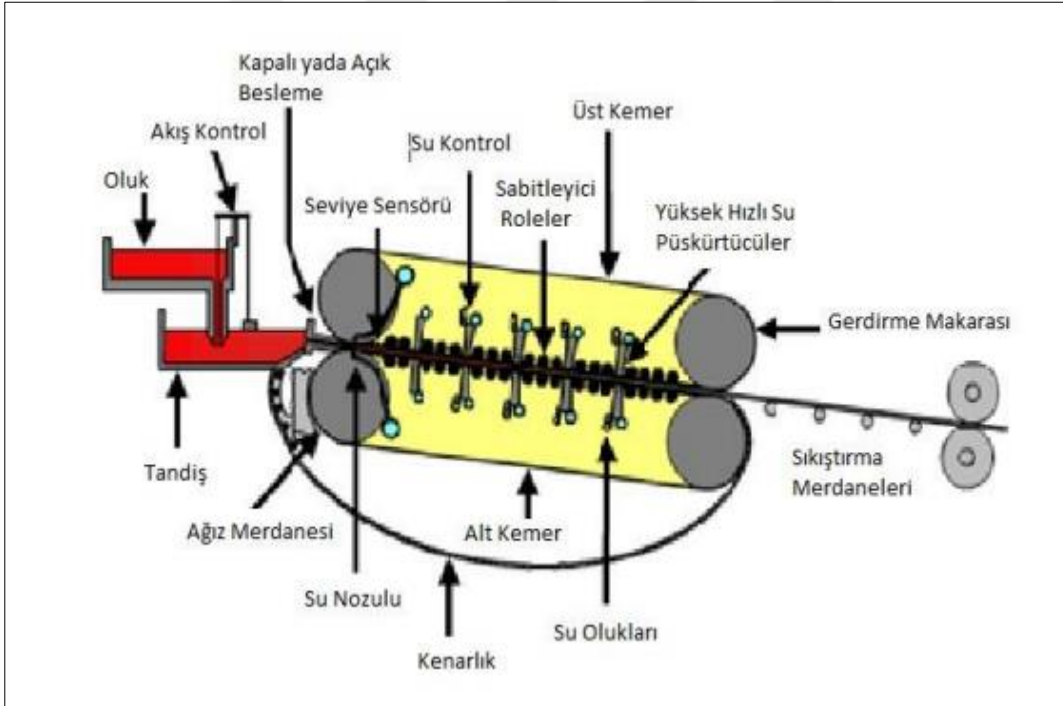


Şekil 2.1. DC döküm yöntemi akışı (Demiral, 2015)

2.2. İkiz Bant Döküm (Hazelett) Yöntemi

Hazelett döküm hattı; birbirine paralel olan alt ve üst 2 banttan ve yan tarafında dişli blokların olduğu bir sistemden oluşmaktadır. Bantlar dişli makaraların çevresine sarılmış haldedir. Bantların arasındaki mesafe slabın kalınlığını (12mm - 75mm), kenarlara yerleştirilen paslanmaz çelik ile de malzemenin genişliği kontrol edilmektedir. Üst bant ön ısıtma ve su spreysi ile soğutma özelliklerine sahiptir. Bu özellik bantın sıcak döküm bölgesine girmeden önce genişmesini sağlar ve ayrıca su spreynin tatbik edildiği bölgede termik çarpılmaların azalması sağlanır. Alt banttaki dişliler bantın gerginliğini sağlarken aynı zamanda eksendeki sapmaları da önler (Bayseçkin, 2002).

İkiz bant yönteminin devamında haddeleme bölümüne gelene kadar sıkıştırma merdaneleri vardır. Bu merdaneler haddeleme bölümüne gelene kadarki malzemeyi koruma ve ilk sıkıştırma işlemini yapmak için kullanılmaktadır (Bayseçkin, 2002).



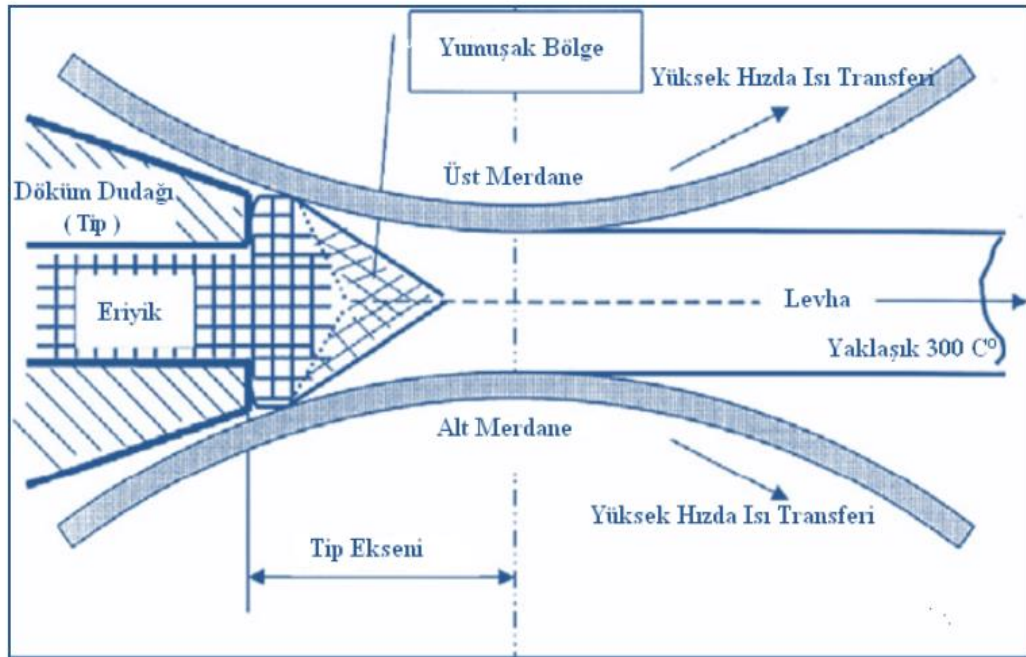
Şekil 2.2. İkiz Bant Döküm Makinası Şematik Gösterimi (Demiral, 2015)

2.3. İkiz Merdaneli Sürekli Döküm

İkiz merdane döküm makinesinin tasarımı Henry Bessemer tarafından 1846 yılında tasarlanmıştır. Hunter Engineering ve Pechiney firmaları 1950'li yıllarda bu tasarımı hayata geçirmeyi başarmıştır.

Bu tasarım diğer döküm yöntemleri ile kıyaslanınca çeşitli ürün yelpazesine sahip olması ve ekonomik avantajlarından dolayı kısa sürede alüminyum sektörünün gözde döküm yöntemlerinden biri haline gelmiştir (Eken, 2018; Gazioğlu, 2019).

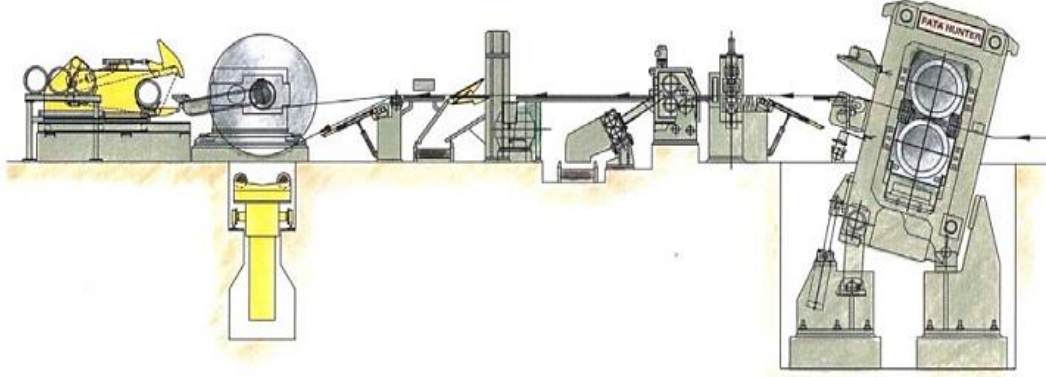
İkiz merdaneli döküm yöntemi; ön işlemleri ve rafinasyonu yapılmış olan sıcak alüminyum ergitme fırınından yolluklara doğru iletirilir. Daha sonra döküm dudağı (seramik besleyici, tip) dediğimiz alana doğru gönderilir ve tip eksen(döküm dudağı çıkışı merdane arası) dediğimiz alandan geçen sıcak alüminyum su ile soğutulan ve birbirine zıt hareket eden iki merdane arasına yönlendirilir. Merdanelere temas ettiği an katılarak, haddelenme işlemine tabi kaldıktan sonra levha halini almış olan alüminyumun merdanelere yapışmaması için grafit tozu veya bor nitrür kullanılır. Sıcak alüminyum merdanelerden geçtikten sonra kenarlarda oluşabilecek çatlaklar ve bu bunun gibi problemleri ortadan kaldırmak için kenar kesme işlemi gerçekleştirilir. Kenar kesme işleminden sonra levha sarılarak bobin haline getirilir (Eken, 2018; Gazioğlu, 2019).



Şekil 2.3. İkiz Merdane Döküm Yöntemindeki Katılma ve Haddelenme Prensipleri (Aktuğ, 2009)

İkiz merdaneli döküm yönteminin yatay ve dikey olarak iki çeşidi vardır ve bunların merdane boyutları farklıdır. Bu yöntemde ayrıca sıvı alüminyumda istenilmeyen bileşikler uzaklaştırabilmek için flakslama işlemi yapılır. Flaks ile gaz giderme , temizleme , rafinasyon , oksidasyon ve oksijen giderme gibi işlemler gerçekleştirilir.

Gaz giderme işlemi ; sıvı alüminyum ergitme fırınından merdanelere ulaştırılmasında refrakter yolluklar kullanılır ve arzu edilmeyen safsızlıkları uzaklaştırmak için gaz giderme (degasser) işlemi yapılır (Kaya, 2019).



Şekil 2.4. İkiz Merdaneli Döküm yöntemi (Karakoyun, 2007)

Şekil 2.4’ te gösterildiği üzere ikiz merdaneli döküm yönteminin bölümleri şu şekildedir;

- 1) Ergitme fırını
- 2) Tutma fırını
- 3) Gaz giderme ünitesi
- 4) Tane küçültücü besleme istasyonu (TiB)
- 5) Eriyik metal filtrasyon ünitesi
- 6) Eriyik metal seviye kontrol sistemi
- 7) Merdaneli döküm sistemi (Kaya, 2019)

2.3.1. İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

İkiz merdaneli döküm yönteminde soğuma, katılaşma ve şekil alma işlemleri aynı anda gerçekleşir. Ayrı ayrı dökme ve haddeme işlemi yapılmadan tek seferde üretim yapılmış olmaktadır. Bu yöntem ile diğer döküm yöntemlerine göre daha avantajlı bir hal alır (Aktuğ, 2009; Kaya, 2019; Küçük, 2020).

İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemlerinin avantajları;

1. Yüksek Hassasiyet : Bu yöntemle, ince metal levhaların hassas bir şekilde çalışmasını sağlar. Ürün boyutları ve kalınlığı açısından yüksek hassasiyet sağlar.

2. Hızlı Üretim : İkiz merdaneli döküm, yüksek üretim hızı ile seri üretim için ideal bir yöntemdir. Yüksek üretim hızı, büyük verimin hızla artmasını sağlar.
3. Çok yönlülük : Çelik, alüminyum, bakır ve diğer alaşımlar dahil olmak üzere çeşitli metal malzemeleri işlemek için tasarlanabilir ve bu da yöntemi oldukça çok yönlü hale getirir.
4. Düşük Atık : İkiz merdaneli döküm, malzeme atığını minimumda tutar. Malzeme kesme veya işleme ihtiyacını azaltarak malzeme kullanımını optimize eder.
5. Yüzey Kalitesi: Bu yöntemle üretilen ürünler genellikle yüksek yüzey kalitesi sergilerler. Pürüzsüz ve homojen bir yüzey elde etmek daha kolaydır.
6. Enerji Verimliliği: İkiz merdaneli döküm genellikle enerji açısından verimlidir ve işleme sırasında enerji maliyetlerini azaltabilir (Karakoyun, 2007).
7. Az İşçilik : Bu yöntem diğer yöntemlere kıyasla daha az işçilik gerektirir (Yeşilbağ, 2014)

Bu avantajlar, ikiz merdaneli dökümün birçok endüstri için tercih edilen bir üretim yöntemi haline getirilmesini sağlar.

İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemlerinin dezavantajları :

1. Sınırlı Ürün Kalınlığı : İkiz rulo döküm, ince levhalar veya şeritler üretmek için daha uygundur.
2. Kısıtlı Malzeme Üretimi : Bu yöntem alüminyum, bakır ve demir içermeyen malzemeler için kullanılan bir yöntemdir. Çelik gibi demirli metaller için pek uygun olmayabilir.
3. Ekipman Maliyeti : İkiz merdaneli döküm için gerekli makinelerin kurulumu ve bakımı pahalı olabilir. Bu ilk yatırım maliyeti, küçük üreticiler için bir engel olabilir.
4. Kurulum ve Bakım Zorlukları : Ekipman kurulumu karmaşık ve zaman alıcı olabilir, ürünlerin kaliteli ve uzun ömürlü olması için sık sık bakım yapılması gerekmektedir (Karakoyun, 2007).



3. ALÜMİNYUM SEKTÖRÜNDE KULLANILAN TANE İNCELTİCİLER

1930'lu yıllarda alüminyumda tane inceltme işlemi ilk kez titanyum beslenerek gerçekleşmiştir. Özellikle alüminyum alaşımlarında metallerin tane yapısını kontrol etmek ve inceltmek için kullanılmıştır. Katılaşma işlemi sırasında ince ve eş eksenli tanelerin oluşumu ve mükemmel beslenebilirliği sayesinde porozitesiz ve homojen bir yapı oluşturmuştur.

Tane inceltme işlemi, mukavemet, sızdırmazlık, döküm kalitesi gibi özelliklerin geliştirilmesine katkı sağladığı için uygulanan alaşımın mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki iyileşme net bir şekilde görülebilmektedir. Bu yüzden de bu işlem giderek yaygınlaşmıştır.

Al-Ti-B üçlü faz sistemine ait Al-Ti, Al-B ve Al-Ti-B master alaşımlar alüminyum alaşımları için yaygın kullanılan tane incelticilerdir. Çubuk veya filmaşın formda bulunan master alaşımlar sıvı alüminyum alaşımlarına eklenerek, eriyik içerisinde heterojen çekirdeklenme mekanizması ile ince taneli çekirdeklerin oluşumunu sağlarlar (Can, 2022; Maraşlıoğlu, 2005; Pozan, 2022; Yapıcı, 2012).

Tane incelticilerin kullanılması ile gerçekleşen iyileşmeler Hall-Petch denklemine dayandırılmaktadır.

$$\sigma = \sigma_0 + k d^{-1/2} \quad (3.1)$$

Hall-Petch denkleminde; σ akma mukavemeti, σ_0 dislokasyon hareketini başlatmak için gerekli olan gerilim miktarı, k malzemeye özgü mukavemet katsayısı, d tane boyutu değerlerine karşılık gelmektedir.

Hall-Petch denklemi, malzeme biliminde kristal yapıdaki tanelerin boyutunun ve bu taneler arasındaki sınırların, malzemenin mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini açıklayan önemli bir denklemdir. Bu denklem, malzemenin dayanıklılığı ve mukavemeti ile tane boyutu arasındaki ilişkiyi vurgular.

Kristal yapıdaki taneler arasındaki sınırlar, malzemenin mekanik davranışı üzerinde belirleyici bir faktördür. Daha küçük taneler genellikle daha fazla tane sınırına sahiptir. Bu tane sınırları, malzemenin dayanıklılığını ve mukavemetini etkileyerek mekanik

özelliklerini önemli ölçüde artırabilir (Immanuel, Panigrahi, Racineux, & Marya, 2017).

Hall-Petch denklemi, iki temel prensibe dayanır:

1. Tane Boyutu ve Mukavemet: Malzeme taneleri küçüldükçe, genellikle malzemenin mukavemeti artar. Daha küçük taneler, daha fazla tane sınırına sahip olduğundan, çatlakların yayılmasını engelleyebilir veya plastik deformasyonu zorlaştırabilir.
2. Tane Sınırları ve Plastik Deformasyon: Yük veya stres uygulandığında, tane sınırları plastik deformasyonu sınırlayabilir. Bu, malzeme içindeki deformasyonu kontrol altında tutarak daha yüksek bir mukavemet sağlayabilir.

Bu denklem, malzeme tasarımı ve işlenmesinde tane boyutunun kritik önemini vurgular. Malzeme biliminde ve endüstriyel uygulamalarda, Hall-Petch denklemine dayalı olarak malzeme işleme ve tasarımında tane boyutu kontrolü büyük bir önem taşır (Immanuel et al., 2017).

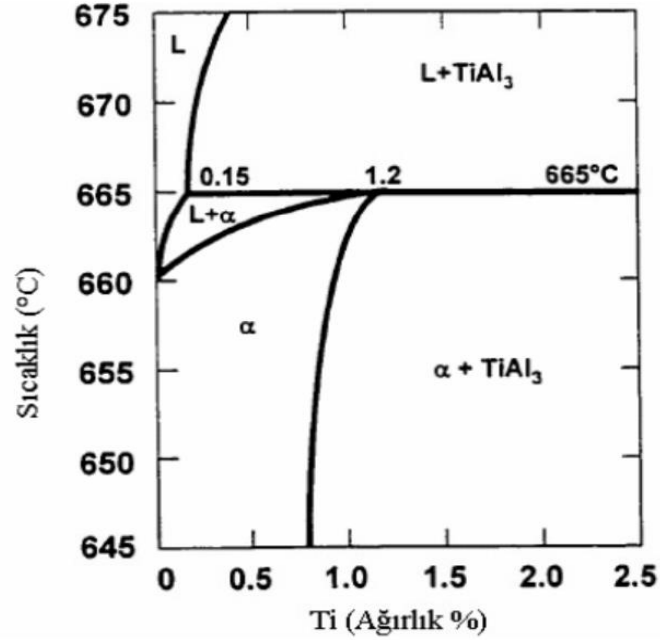
3.1. Tane İnceltici Olarak Titanyum Kullanımı

Titanyum yeryüzünde en çok bulunan altıncı elementtir. Doğada gri renkte bulunur. Simgesi Ti'dir. Hafif, mukavemetli, korozyona dayanıklı, yüksek ısı dayanımlı , düşük iletkenlikli ve biyouyumludur. Yüksek ergime noktasına sahip olması yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmasını sağlar.

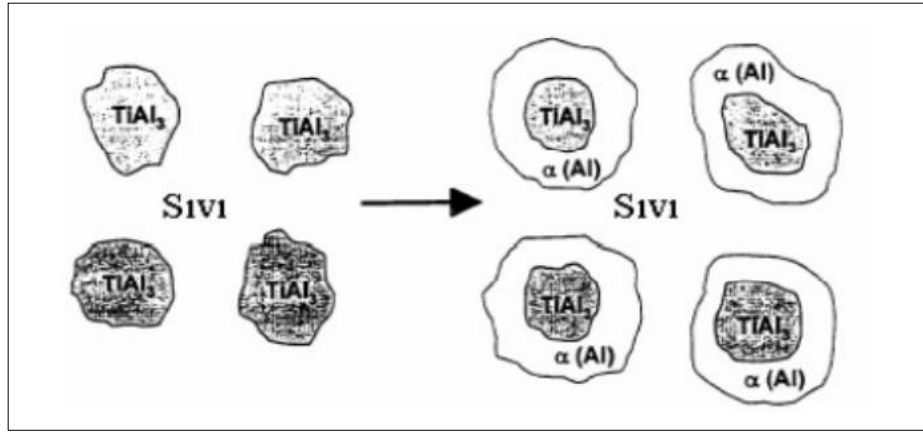
Alüminyum-titanyum tane incelticileri ise endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Tipik olarak alüminyum alaşımlarına küçük miktarlarda eklenirler; burada titanyum parçacıkları, ince alüminyum taneciklerinin oluşumu için çekirdeklenme görevi görmektedir. Bu, rafine bir tane yapısına ve gelişmiş mekanik özelliklere yol açmaktadır (Immanuel et al., 2017).

Crossley ve Mondolfo adındaki iki bilim insanı Al-Ti faz diyagramındaki peritektik teorisini ortaya koymuştur. Bu teori; alüminyum alaşımına titanyumun ilavesi ile tane yapısının incelendiğini göstermektedir. Peritektik reaksiyon Al-Ti faz diyagramında titanyum oranı %1,2 ve 665°C'de olduğunda gerçekleşmektedir. Alüminyum alaşımının içerisine yeterli miktarda (>%0,15) Ti elementi eklenilmesi ile birlikte peritektik olarak hareket eden $TiAl_3$ oluşmaktadır. $TiAl_3$ genellikle alüminyum atomları etrafında oluşmaya başlar ve titanyum atomları bu yapıya dahil olur. $TiAl_3$

büyümeye başlar ve sıvı alüminyum içerisinde $TiAl_3$ parçacıkları dağılarak çekirdeklenme için heterojen yapı oluşturur. Oluşturulan bu heterojen yapı sayesinde mikroyapının daha ince taneli katılaşmasına olanak sağlamaktadır (Immanuel et al., 2017).



Şekil 3.1. Al-Ti Denge diyagramı (Yaman, Kocaman, & Barış, 2022; Yapıcı, 2012)



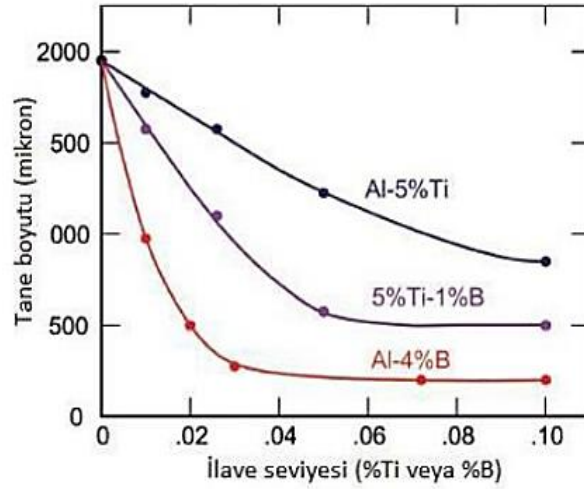
Şekil 3.2. Al-Ti sistemlerinde peritektik reaksiyonla α -Al'un çekirdeklenmesi (Onat, 2011; Yapıcı, 2012)

3.2. Tane İnceltici Olarak Bor Kullanımı

Simgesi B olan sert ve ısıya dayanıklı olması ile bilene bor elementi, alüminyum-bor tane incelticisi olarak alüminyum alaşımlarına eklenmiştir. Bor ilavesi, katılaşmış alüminyumda ince ve eş eksenli taneciklerin oluşumunu desteklemiştir. Bu rafineriler

özellikle yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında kullanılmaktadır (Ibarra, 1999).

1981 yılında Lu, Kung ve Wang'ın A356 alaşımı üzerinde yaptıkları bir çalışmada bor içeren katkıların tane inceltmede etkili olduğu gösterilmiştir (Sigworth & Kuhn, 2007).



Şekil 3.3. A356 alaşımında 3 farklı tane incelticinin tane boyutuna etkisi (Sigworth ve Kuhn 2007).

3.3. Tane İnceltici Olarak Titanyum Ve Bor Kullanımı

Al-Ti-B tane incelticileri, genellikle alüminyum alaşımlarında kullanılan bir tür tane kontrol ajanıdır ve bu alaşımlara titanyum ve bor elementlerinin bir karışımı olarak eklenir. Titanyum, alaşımın kristal tane boyutunu kontrol ederken, bor elementi kristal yapının düzenlenmesine yardımcı olur. Bu kombinasyon, genellikle alaşımların dayanıklılığını, mukavemetini ve işlenebilirliğini artırarak daha yüksek performanslı malzemelerin üretimini sağlar. Alüminyum alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunur ve malzemenin istenen özelliklere uygun olarak özelleştirilmesine olanak sağlar (Can, 2022; Ramachandran, Sharma, & Balasubramanian, 2008; Yapıcı, 2012).

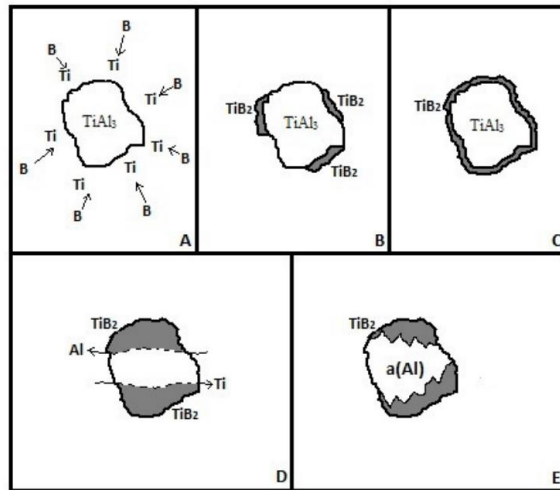
Al-Ti-B tane incelticisinin en büyük avantajı, sıvı alüminyum sisteminde bulunan $TiAl_3$ 'ün çözünmesini engellemek ve TiB_2 partiküllerinin ise topaklanma eğilimini ortadan olabildiğince kaldırmaktır. $TiAl_3$ partikülleri alüminyum içerisinde 30-40 μm büyüklüğünde bulunurken, TiB_2 partikülleri ise 1-2 μm büyüklüğünde bulunmaktadır. Bu partiküllerin sıvı alüminyum içerisindeki farklı davranış ve boyutlarından dolayı

bir çok araştırmacı farklı çekirdeklenme teorisi ortaya atmıştır (Can, 2022; Ramachandran Et Al., 2008; Yapıcı, 2012).

3.4. Çekirdeklenme Teorileri

3.4.1. Peritektik hulk teorisi

Dong ve Backerud tarafından önerilen Hulk teorisi, sıvı metal içerisindeki $(AlTi)B_2$ 'ler tamamen çözünür iken; tanelerin çevresi titanyum ile kaplanarak $TiAl_3$ partikülleri kısmen çözünürler. Taneler etrafındaki titanyum konsantrasyonunun artması ve TiB_2 partiküllerinin $TiAl_3$ üzerinde birikmesi ile bir TiB_2 tabakası oluşturarak alüminyum fazının yüzeyine çökelmektedir. Zamanla alüminyum ve titanyumun koruyucu tabaka boyunca eş zamanlı büyümesi ile sıcaklık peritektik sıcaklık olan $665^\circ C$ 'ye ulaştığı zaman peritektik taneler heterojen çekirdeklenmeye başlar. Bu durumdan sonra $\alpha(Al)$ tarafından sıvı metal içerisinde büyüme devam eder (Gloria, 2001; Yapıcı, 2012).

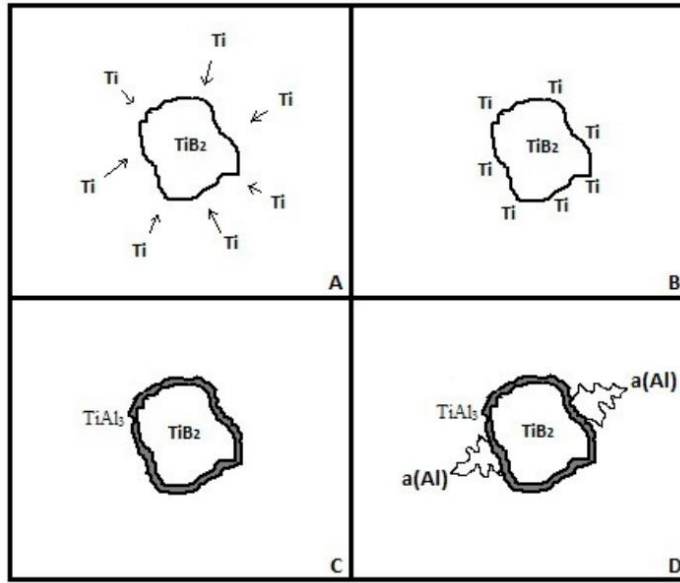


Şekil 3.4. Peritektik Hulk teorisinin modeli; a) $TiAl_3$ 'ün kısmi çözünmesi ve $TiAl_3$ 'e B 'nin difüzyonu b) TiB_2 'nin partiküller halinde birikmesi. c) $TiAl_3$ üzerinde TiB_2 'nin koruyucu tabaka oluşturması d) Al ve Ti 'nin koruyucu tabaka boyunca eş zamanlı büyümesi e) Çekirdek ve $\alpha-Al$ 'un büyümesi (Gloria, 2001; Yapıcı, 2012).

$Al-Ti-B$ master alaşımları, genellikle alüminat fazını çevreleyen veya bazen bu fazın içinde bulunan borürlerin karışımını içermektedir. Bu, $TiAl_3$ fazının çözünmeye karşı korunmasına yardımcı olur. İki bileşenli bu partiküllerin tane inceltme etkisi, zamanla alüminatların tamamen çözünmesiyle azalır gibi görünse de, bazı diğer yazarlar, inceltme etkisinin kaybının borür partiküllerinin çökmesinden kaynaklandığını savunmaktadır (Gloria, 2001; Yapıcı, 2012).

3.4.2. Hiper çekirdeklenme teorisi

Pearson ve Jones tarafından öne sürülen Hiper Çekirdeklenme Teorisi, sıvı alüminyumun içerisinde Ti/B oranı 2,21 'in üzerinde olduğu zaman, serbest haldeki titanyum TiB_2 'nin yüzeyine segrege olur ve $TiAl_3$ katmanını oluşturmaktadır. Soğuma işlemi sonucunda peritektik reaksiyon ile alüminyum alaşımları çekirdeklenmektedir (Gloria, 2001; Yapıcı, 2012).



Şekil 3.5. Hiper Çekirdeklenme teorisi modeli, a) Eriyikte yoğun Ti miktarı ($Ti/B > 2.21$), b) TiB_2 -Sıvı metal yüzeyinde ayrılan serbest Ti, c) TiB_2 üzerinde $TiAl_3$ tabakasının oluşumu, d) Peritektik reaksiyonla α -Al çekirdeklenmesi (Gloria, 2001; Yapıcı, 2012).

Al-Ti-B tane incelticileri, havacılık, otomotiv, inşaat ve diğer mühendislik alanlarında kullanılmak üzere alaşımların endüstriyel uygulamalarında yaygın olarak tercih edilir (Ibarra, 1999; Yapıcı, 2012).

4. ANODİK OKSİDASYON

Endüstriyel uygulamalarda, yüzeylerin dayanıklılığını artırmak amacıyla genellikle çeşitli kaplama işlemleri tercih edilmektedir. Ticari gereksinimlerden dolayı ve geniş bir kullanım yelpazesi bulunduğu alüminyum alaşımları için çeşitli yüzey kaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında anodik oksidasyon, krom, nikel, plazma püskürtme, katodik elektroforez kaplama ve elektrostatik boya gibi uygulamalar bulunmaktadır. Bengough ve Stuart 1923 yılında alüminyum ve alaşımlarının korozyona karşı dayanıklılığı ile ilgili çalışmalarında ilk defa anodik oksidasyon yönteminden bahsedilmiştir. Anodik oksidasyon yöntemi, özellikle alüminyum alaşımının oksitlenme özelliğini kullanarak, yüzeyinde Al_2O_3 tabakası oluşturmayı içerir. Bu yöntemle, alüminyum alaşımının yüzeyinde istenilen korozyon direnci sağlanabilir, yüksek yüzey sertliği elde edilerek aşınma direnci artırılabilir ve estetik açıdan daha çekici bir görünüm de elde edilebilir (Ibarra, 1999).

Alüminyum malzemelerinin bir elektrolitik hücre içerisinde anodik bir malzeme olarak hareket ederek alüminyumun yüzeyine oksit tabakası oluşturma yöntemine “anodik oksidasyon yöntemi” denilmektedir. Anodik oksidasyon yönteminde, alüminyumun yüzeyinde oksit tabakasının oluşumu ile başlar, tüm yüzey boyunca ilerleyen oksit tabakası malzemenin aşınma ve korozyona karşı dirençli olmasını sağlamaktadır.

Anodik oksidasyon teknolojisinin gözle görülür bir şekilde ilerleyişi 1950-1960 yılları arasında olmuştur (Ibarra, 1999).

4.1. Anodik Oksidasyonun Avantajları

Anodik oksidasyon yönteminin alüminyum malzemenin yüzeyinde ve kendisinde bir dizi iyileşmeler sağlamaktadır. Anodik oksidasyon yönteminin avantajlarını sıralayacak olursak;

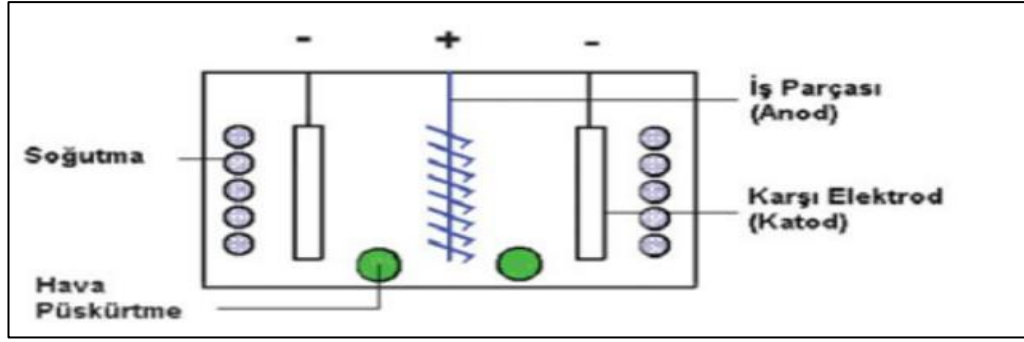
- **Koruyucu Kaplama:** Anodik oksidasyon, malzeme yüzeyinde kalın ve dayanıklı bir oksit tabakası oluşturur. Bu tabaka, malzemenin korozyona, aşınmaya ve çizilmelere karşı dayanıklılığını artırır.

- **Estetik Görünüm:** Bu yöntem, malzemenin estetik görünümünü geliştirir. Oluşan oksit tabakası, farklı renk ve tonlarda olabilir ve dekoratif amaçlarla kullanılabilir.
- **İşlenebilirlik ve Yüzey Sertliği:** Anodik oksidasyon, malzeme yüzeyinde yüksek sertlik sağlar. Bu, malzemenin dayanıklılığını artırırken, aynı zamanda çeşitli mekanik işlemlere daha dayanıklı hale getirebilir.
- **Elektriksel ve Dielektrik Özellikler:** Oluşan oksit tabakası, elektriksel yalıtkanlık özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, elektrik endüstrisinde yalıtkan olarak veya elektriksel izolasyon gerektiren uygulamalarda kullanılabilir.
- **Kimyasal Direnç:** Anodik oksit tabakası, kimyasallara karşı dayanıklıdır. Bu özellik, malzemenin çeşitli kimyasallara maruz kaldığı ortamlarda kullanılmasını sağlar.
- **Biyomedikal Uygulamalar:** Biyolojik uyumluluğu ve inert yapısı nedeniyle, anodik oksitasyon kaplamaları tıbbi implantlarda ve biyomedikal cihazlarda kullanılabilir.
- **Çevre Dostu Yöntem:** Anodik oksidasyon işlemi, genellikle çevre dostu olarak kabul edilir. Yöntem, genellikle çözücü veya zararlı kimyasalların az kullanılması veya kullanılmaması ile gerçekleştirilebilir.

Bu avantajlar, anodik oksidasyon yönteminin geniş bir endüstriyel kullanım alanı bulmasına ve malzemelerin dayanıklılığını, estetik görünümünü ve işlenebilirliğini artırmasına katkıda bulunur (Aerts, Dimogerontakis, De Graeve, Fransaer, & Terry, 2007; Celis, Drees, Huq, Wu, & De Bonte, 1999; Şişmanoğlu, 2009).

4.2. Anodik Oksidasyon Ekipmanları

Anodik oksidasyon işlemi için kullanılan ekipmanlar, oluşacak oksit tabakasının kalitesini doğrudan etkileyebilecekleri için belirli özelliklere sahip olmalıdır. Bu işlem için gerekli olan ekipmanlar arasında anodik oksidasyon tankı, katot, elektrolit çözeltisi, soğutma sistemi, karıştırma cihazı, güç kaynağı ve askılar gibi unsurlar bulunmaktadır (Aerts Et Al., 2007; Celis Et Al., 1999; Şişmanoğlu, 2009).



Şekil 4.1. Anodik oksidasyon işleminin şematik görünümü (Övündür, 2014).

4.2.1. Anodik oksidasyon havuzu

Anodik oksidasyon işleminin gerçekleştirildiği özel bir tank veya kaplama banyosudur. Bu havuzlar, genellikle asit bazlı elektrolit çözeltisi içerir ve alüminyum gibi metallerin yüzeylerine dayanıklı bir oksit tabakası oluşturmak için kullanılır. Havuzun içinde, işlem sırasında metalin anot olarak kullanılacağı özel bir bölüm bulunur. İşlem sürecinde, elektrik akımı kullanılarak malzeme yüzeyindeki anodik oksidasyon gerçekleştirilir ve bu oksidasyon işlemi sonucunda malzemenin yüzeyinde istenen kalınlıkta ve özelliklerde bir oksit tabakası oluşur. Havuz, işlem sırasında belirli sıcaklık, akım yoğunluğu, asit konsantrasyonu gibi parametrelerin kontrol edilmesini sağlayacak ekipmanlarla donatılmıştır. Anodik oksidasyon havuzları, endüstriyel ölçekte malzemelerin işlenmesi ve yüzeylerine koruyucu kaplama uygulanması için kullanılır ve çeşitli endüstrilerde yaygın olarak bulunur, özellikle metal işleme, otomotiv, elektronik ve dekoratif kaplama sektörlerinde tercih edilir. Bu havuzlar, belirli teknikler ve koşullar altında yüzeylerde istenilen özelliklerin kazanılmasını sağlayarak malzemelerin performansını artırabilir (Şişmanoğlu, 2009).



Şekil 4.2. Eloksal kaplama havuzları görünümü(Çoruhlu, 2023).

4.2.2. Katot

Anodik oksidasyon işlemi sırasında anot ile birlikte elektrolit çözeltisi içinde yer alan bir elektrottur. Anot malzemesi (genellikle alüminyum), katottan farklıdır ve bu iki elektrot arasındaki farklı potansiyeller, elektrik akımının akmasını sağlar. Anot oksitlenirken (yani oksit tabakası oluştururken), katot bu işlemde aktif bir rol oynamaz. Bunun yerine, katot, elektrik devresinde akımın dengelenmesini sağlayarak ve işlem sırasında elektriksel dengeyi koruyarak anot ile birlikte çalışır.

Katot, genellikle malzeme işlemi sırasında korunması gereken ve oksitlenmesi istenmeyen bir elektrot tipidir. Anodik oksidasyon işleminde, anot oksitlenirken katotun korunması ve oksitlenme sürecine dahil olmaması amaçlanır. Bu sayede, istenmeyen oksitlenme veya kaplama oluşumu katot üzerinde minimum seviyede tutulur. Katot, işlemin doğru ve kontrol edilebilir bir şekilde ilerlemesini sağlayarak oksit tabakasının kalitesine ve işlemin başarılı olmasına katkıda bulunur (Şişmanoğlu, 2009).

4.2.3. Elektrolitik

Anodik oksidasyon işlemi sırasında kullanılan asidik veya bazik esaslı bir çözeltidir. Bu çözelti, elektriksel iletkenlik sağlamak ve kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için kullanılır. Elektrolit, anot ve katot arasındaki bağlantıyı kurar ve işlem sırasında metal yüzeyindeki oksidasyon sürecini tetikler. Bu çözelti, işlem sırasında oksitlenme reaksiyonunun gerçekleşmesini sağlamak için elektrik akımını iletir. Elektrolit seçimi, işlem sırasında kullanılan malzemeye göre belirlenir ve oksidasyon sürecinin kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir (Şişmanoğlu, 2009).

Elektrolit, işlem sırasında belirli sıcaklık, asitlik oranı ve kimyasal bileşenlerin dengesi gibi faktörlerin kontrol edilmesi gereken bir çözeltidir. Doğru elektrolit seçimi ve uygun koşullar altında kullanılması, istenen oksit tabakasının oluşmasını sağlamanın yanı sıra işlemin başarılı olmasına da katkıda bulunur. Bu nedenle, elektrolitin bileşimi ve özellikleri, anodik oksidasyon işleminin kalitesini etkileyen önemli faktörlerden biridir (Şişmanoğlu, 2009).

Çizelge 4.1. Anodik oksidasyon işleminde kullanılan elektrolitler ve buna bağlı olarak değişen parametreler (Şişmanoğlu, 2009).

Elektrolit Türü	Konsantrasyon (g/l)	Sıcaklık (°C)	Voltaj (V)	Tabaka Kalınlığı (µm)
Sülfürik Asit	150-200	18 - 20	12 - 22	5 - 100
Sülfürik /Okzalik Asit	160-180	10 - 20	12 - 25	5 - 35
Kromik Asit	30-100	25 - 55	30 - 70	2 - 8
Fosforik Asit	120-250	20 - 30	30 - 120	1 - 30
Borik Asit	40-50	70 - 100	50 - 5000	Maks. 0,5
Tartarik Asit	20-40	70 - 80	120 - 150	Maks. 0,16

4.2.4. Soğutma suyu

Prosesin sıcaklığını kontrol etmek ve istenmeyen ısınmaları önlemek için kullanılır. Bu su, genellikle bir soğutma sistemi vasıtasıyla proses tankına veya işlem alanına aktarılır ve elektrolit çözeltisinin ısınmasını önler ve işlem sırasında ortaya çıkan ısıyı uzaklaştırarak malzeme üzerinde istenmeyen termal etkilerin oluşmasını engeller.

Elektrolit sıcaklığının artması, akım yoğunluğunu yükselterek oksit ve elektrolit arayüzeyinde gerçekleşen çözünme oranını artırabilir. Yüksek elektrolit sıcaklığı, oksit tabakasının düzenliliğini bozarak mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu yüzden soğutma suyu kullanmak, oksitlenme işlemi esnasında malzeme üzerinde oluşabilecek termal hasarı Azaltmaya ve istenen oksit tabakasının kalitesini artırmaya yönelik bir önlemdir (Aerts Et Al., 2007; Şişmanoğlu, 2009).

4.2.5. Karıştırma aparatı

Anodik oksidasyon işlemi sırasında kullanılan karıştırma aparatı, elektrolit çözeltisini homojen bir şekilde karıştırmak ve dengeli bir dağılım sağlamak için kullanılır. Bu aparat, çözeltinin içindeki sıcaklık, bileşenler ve diğer faktörlerin eşit olarak dağılmasını sağlar.

Anodik oksidasyon işlemi sırasında uygulanan voltaj, çözeltinin ısınmasına neden olmaktadır. Bu durum, çözelti içinde yerel olarak sıcaklık artışlarına yol açar . Bu yerel yüksek elektrolit sıcaklıkları, oksit tabakasının mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Bu tür yerel sıcaklık artışlarını önlemek amacıyla çözelti genellikle düşük basınçlı hava veya mekanik bir karıştırıcıyla homojen hale getirilir. Karıştırma aparatı aynı zamanda işlem süreci boyunca elektrolit çözeltisinin bileşenlerinin dengeli bir

şekilde dağılmasını sağlayarak istikrarlı bir oksidasyon işlemi gerçekleştirilmesine yardımcı olur (Aerts et al., 2007; Vorobyova, Outkina, & Khodin, 2007).

4.2.6. Askılar

Anodik oksidasyon sırasında kullanılan askılar, işlenen alüminyum veya alaşım parçalarının oksidasyon tankı içinde sabitlenmesi ve elektriksel iletişiminin sağlanması için kullanılır. Askılar, parçaları işlem tankına yerleştirmek için kullanılan özel tutuculardır. Bu askılar, alüminyum parçaları elektrik devresine bağlamak ve anot ile bağlantıyı sağlamak için kullanılır. Oksidasyon işlemi sırasında parçaların homojen bir şekilde oksitlenmesini ve istenilen oksit tabakasının oluşumunu sağlamak için parçaların belirli bir düzen içinde tank içinde asılı bir şekilde tutulması gerekmektedir. Bu sayede, işlem sırasında istenmeyen çözelti akışlarından kaynaklanan dengesizlikler minimize edilir ve daha tutarlı sonuçlar elde edilir (Aerts et al., 2007; Vorobyova et al., 2007).

Anodik oksidasyon işlemi sırasında malzemelerin sabitlenmesi için en çok alüminyum veya titanyumdan oluşan bağlantı elemanları ve askılar tercih edilmektedir. Alüminyum askı kullanabilmek için iki yol bulunmaktadır. Bunlardan birincisi anodize edilecek malzemenin alaşımı ile askı malzemesinin alaşımının aynı olmasıdır. İkincisi de bakır elementi bulundurmayan bir alüminyum malzemesinin kullanılmasıdır (Demiral, 2015; Şişmanoğlu, 2009).

Genellikler yüksek maliyetli olsa da, titanyumdan yapılmış malzemeler çözelti içerisinde reaksiyona girmezler. Endüstriyel alanda, ticari saflıktaki titanyum askılar ve ayırıcılar sıkça tercih edilir. Bu askı malzemeleri, özel bir izolasyon işlemine ihtiyaç duymadan kullanılabilirler. Ancak, titanyum askılar düşük çözelti sıcaklıklarında ve yüksek voltajla gerçekleştirilen sert anodik oksidasyon işlemi için uygun değildir. Titanyumun düşük sıcaklıklardaki düşük iletkenlik özelliği, ısınmasına yol açabilir ve bağlı olduğu alüminyum malzemesinde yanıklara sebep olabilir (Demiral, 2015; Şişmanoğlu, 2009).

4.3. Anodik Oksidasyon İşlemi

Yüzey temizliği anodik oksidasyon işlemi için çok kritiktir. Bu nedenle, yüzeyin oksidasyon öncesinde belirli işlemlerle hazırlanması gerekmektedir. Anodik oksidasyon öncesi hazırlık işlemleri genellikle iki ana amaçla gerçekleştirilir.

Birincisi, üretim sürecinden kaynaklanan yağlar gibi organik maddelerin temizlenmesi; ikincisi ise oksit tabakası, pas veya diğer korozyon artıkları gibi inorganik maddelerin uzaklaştırılmasıdır. Bu işlemler duruma göre birden fazla kez tekrarlanabilir. Yüzeyin hazırlanması işlemi, genellikle mekanik ve kimyasal ön hazırlık olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir (Demiral, 2015).

4.3.1. Mekanik ön işlemler

Anodik oksidasyon öncesinde mekanik ön hazırlama işlemleri, yüzeyin temizlenmesi ve düzeltilmesi için çeşitli adımları içerir. Bu adımlar şunları içerebilir:

- Yüzey Temizliği: Yüzey, yağlar, gresler veya diğer kirleticiler gibi organik maddelerden arındırılır. Genellikle deterjanlar veya özel temizleyiciler kullanılarak gerçekleştirilir.
- Değirmenleme (Aşındırma): Yüzeydeki düzensizlikleri gidermek ve pürüzsüz bir yüzey elde etmek için mekanik aşındırma veya taşlama gibi yöntemler kullanılabilir.
- Talaşlı İşlemler: Yüzeydeki kesikleri veya işaretleri gidermek için talaşlı işlemler yapılabilir. Bunlar, kesme, frezeleme veya tornalama gibi işlemleri içerebilir.
- Fırçalama veya Zımparalama: Yüzeydeki küçük kusurları düzeltmek veya pürüzlü yüzeyleri düzeltmek için fırçalama veya zımparalama işlemleri uygulanabilir.

Bu mekanik ön hazırlama işlemleri, yüzeyin oksidasyon öncesi temiz ve düzeltilmiş bir halde olmasını sağlar. Bu sayede, anodik oksidasyon işlemi sırasında istenen oksit tabakasının daha homojen ve istikrarlı bir şekilde oluşması mümkün olur (Demiral, 2015).

4.3.2. Kimyasal ön işlemler

Malzemelerin yüzeyine oksidasyon işlemi yapılmadan önce kimyasal ön hazırlama işlemi yapılmaktadır. Malzemelerde istenilen yüzey görünümlerine göre kimyasal işlemler değişmektedir. Sodyum-hidroksit içeren eriyikler kullanılarak kostikleme işlemi yapıldığında mat yüzey görüntüsü elde edilmektedir. Oluşan mat yüzeyde yapısal çizgiler ve galvaniz benzeri izler bulunabilirken, paslanmaz çelik bilyelerin alüminyum yüzeye püskürtülmesi ile oluşan mat yüzeyde bahsedilen kusurlar gözle

gürülmeyecek seviyeye gelir. Bu nedenle, temiz ve pürüzsüz bir mat yüzey elde etmek için genellikle kumlama yöntemi kullanılmaktadır.

Fosforik, sülfürik, nitrik, kromik asitlerin hepsi veya birkaçı ile kimyasal daldırma veya elektrokimyasal parlatma metodları uygulanır. Daha sonra yağ alma işlemi uygulanarak bir temizleme yapılır. Yüzeyde oluşacak reaksiyon kalıntılarını temizlemek için de kostikleme ve parlatma işlemi uygulanır. Banyolara kirlilik taşınmaması için her kimyasal işlemten sonra durulama banyosu kullanılmaktadır (Demiral, 2015).

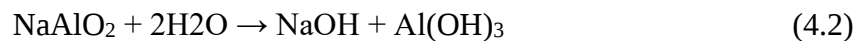
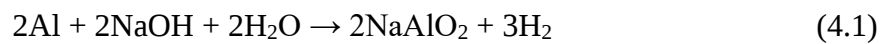
4.3.2.1. Yağ alma

Mekanik ön işlemler sırasında malzemenin yüzeyinde kalan yağların veya yağlayıcı maddelerin giderilmesi için yağ alma işlemi uygulanır. Yağ alma eriyikleri su bazlı eriyikler olup, fosfat, karbonat, ıslatıcı ajan ve bazen de bir kompleks yapıcı içeren yaklaşık 60°C sıcaklıktaki bazik eriyiklerdir. Bu eriyikler yerine trikloretilen veya buna benzer kimyasallar da kullanılarak malzeme yağlardan arındırılabilir (Yavuz, 2018).

4.3.2.2. Aşındırma (dağlama)

Yüzeyin mat görünmesi amacı ile yapılan %4 konsantrasyonlu NaOH (sodyum hidroksit) kullanılan bu işlem sayesinde malzemenin yüzeyinde beyazımsı bir renk oluşturulmaktadır. Bu işlem yaklaşık 40-50°C arasında gerçekleşmektedir. Dağlama işlemi süresinin uzun olmaması için ise öncesinde kumlama işlemi yapılmaktadır. Alüminyum malzemesi çözelti ile reaksiyona girmesi sonucu malzemenin yüzeyinden alüminyum çözünerek belli bir seviyeden sonra banyonun dibine çökmektedir. Bu durum malzemenin yüzey kalitesini etkileyeceğinden banyoların yüzey konsantrasyonları bu yüzden sürekli kontrol edilmektedir (Henley, 2013).

Aşındırma(dağlama) işlemi anında meydana gelen reaksiyonlar sırasıyla (4.1) reaksiyonu dağlama, (4.2) reaksiyonu sodyum alüminatın çözünmesi ve (4.3) reaksiyonu alüminyum hidroksitin çözünmesi şeklinde aşağıda gösterilmektedir (Henley, 2013).



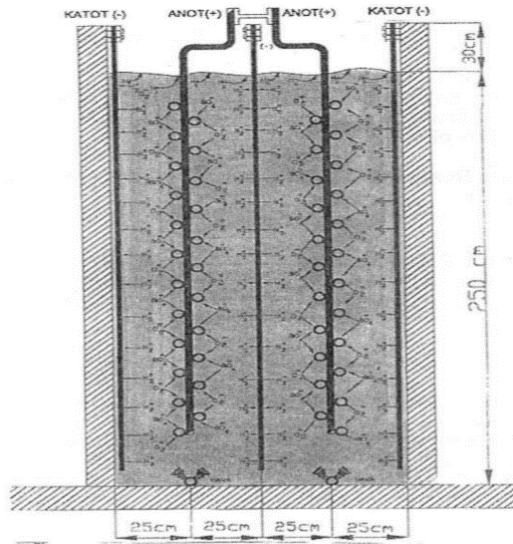
Anodik oksidasyon işleminin nihai görüntüsü dağlama işlemi ile gerçekleştirildiğinden bu işlem yeteri kadar yapılmazsa, eloksal ve renklendirme işlemlerinin malzemeye bir katkısı olmayacaktır (Henley, 2013).

4.3.2.3. Nötralizasyon

Dağlama ve parlatma işlemlerinden sonra dağlama işleminden kalan bakır, mangan, silisyum gibi elementlerin bıraktığı siyah lekeler ve çözünmeyen alaşım bileşenleri malzemelerin yüzeyinde kalabilmektedir. Bu sebeple malzemeler dağlama ve parlatma işleminden sonra durularak 1-20 dk periyotlarda 50-70°C sıcaklıklarda nötralizasyon işlemine tabi tutularak anodik oksidasyon işlemi öncesinde yüzey temizlenmektedir. Bu temizleme işlemi için %20-30 konsantrasyonlu sülfürik asit veya nitrik asit banyoları kullanılmaktadır (Henley, 2013).

4.4. Anodik Oksidasyon İşleminin Uygulanması

Anodik oksidasyona tabi tutulacak parçalar anoda yani doğru akım güç kaynağının olduğu pozitif uca bağlanır. Güç kaynağının negatif ucu ise paslanmaz çelik, platin, kurşun, nikel ya da anodizasyon banyosu ile reaksiyona girmeyecek inert bir iletken bağlanır (Henley, 2013).



Şekil 4.3. Anodik Oksidasyon Banyosu Dizaynı (Docplayer, 2023).

Şekil 4.3’de anodizasyon banyosunda anottan katota doğru bir elektron akışı sayesinde çeşitli kimyasallar ile metalin yüzeyinde ince bariyer oksit tabakası ve onun üzerinde de kalın ve gözenekli bir oksit tabakası daha oluşturduğu bilinmektedir. Bu oluşan

oksit tabakasının ismi kısaca eloksaldir ve iki alüminyum iyonu ve üç oksijen iyonunun birleşmesinden Al_2O_3 tabakası oluşmaktadır. Al_2O_3 oluşma reaksiyonu eşitlik (4.4) te verilmiş olup, bu reaksiyon esnasında hidrojen gazı ortaya çıkmaktadır (Demiral, 2015; Berk, 2004).



Anodik oksidasyon prosesine akım verildiğinde su ve sülfürik asit ayrışır ve eşitlik (4.5) ve eşitlik (4.6) da bu reaksiyon verilmiştir. Parçalanma sonucu H^+ iyonları eksi yüklü katoda giderek hidrojen gazına indirgenmektedir ve eşitlik (4.7) de verilmiştir (Şişmanoğlu, 2009).

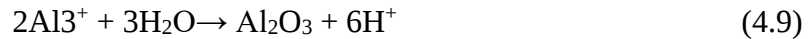


Ayrışmalar sonucunda hidroksit, oksit, sülfat gibi eksi yüklü anyonlar artı yüklü anoda doğru yönelirler. Akımın verilmesi ile alüminyum metali çözünerek Al^{3+} iyonları oluşmaktadır. Oluşan Al^{3+} iyonları alüminyum oksit formunu oluşturmak için yüzeydeki oksit/hidroksit iyonları ile reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyondan sonra eşitlik 4.8, eşitlik 4.9 ve eşitlik 4.10'daki reaksiyonlarla işlem devam etmektedir (Şişmanoğlu, 2009).

Metal/oksit ara yüzeyinde oksijen anyonları ile alüminyumun reaksiyonu,



Oksit/elektrolit ara yüzeyinde alüminyum katyonları ile suyun reaksiyonu,



Alüminanın elektrolit içerisine çözünme reaksiyonu,



Oksit yapısı içerisinde sülfat iyonlarının azlığı O^{2-} ve Al^{3+} iyonlarının SO_4^{2-} 'ye göre hareketliliklerinin fazla olmasından kaynaklanırken, sülfat iyonlarının varlığı da hücre potansiyelini azaltmakta ve hidrojen iyonlarının hareketini kolaylaştırmaktadır (Şişmanoğlu, 2009).

Anodik oksidasyon işlemi 18-20°C arasında %15'lik sülfürik asit çözeltisi içerisinde gerçekleşmektedir. Sıcaklık 18-20°C arasından az veya fazla olduğunda oluşacak oksit

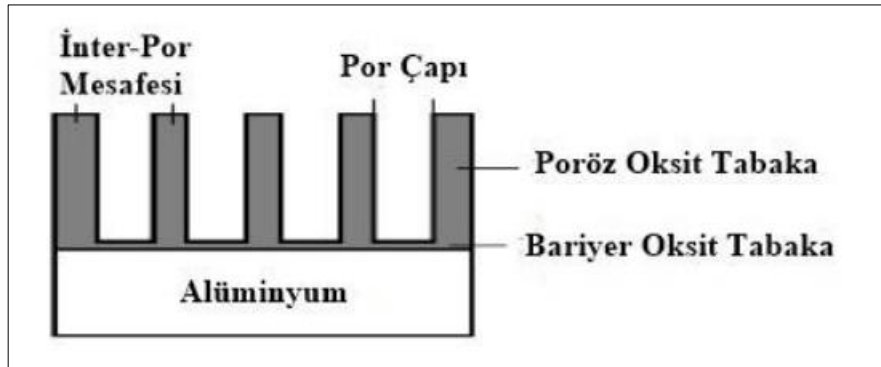
tabakası zayıflamaktadır. Sülfürik asit kullanılan çözeltilerde 12V ve 22V arasında voltaj verilmektedir. Havuzdaki çözeltinin sıcaklığının homojen bir şekilde dağılması için çalkalama işlemi gerçekleşir (Şişmanoğlu, 2009).

Çözelti demir, flor, bakır ve klor gibi kirleticilerden uzak tutulmalıdır ve çözeltide 5 g/lt ile 15 g/lt arasında alüminyum bulunmalıdır. Çözeltideki bu alüminyum miktarlarının azalması veya artması banyonun fazla ısınmasına veya çözeltideki iletkenliğin azalmasına sebebiyet vermektedir.

Anodik oksidasyon işlemi bir kaplama değil oksitlenmedir. Metalin yüzey kısmı bir yandan çözünürken bir yandan da oksitlenir (Şişmanoğlu, 2009).

4.5. Anodik Oksidasyon Yapısı

Elektrolitik konsantrasyonuna, anodize edilen alaşıma, uygulanan voltaja ve elektrolitik sıcaklığına bağlı olarak anodik oksidasyon yapısı oluşmaktadır. Düşük sıcaklık ve yüksek akım yoğunluğunda sert ve yoğun bir oksit tabakası oluşturulurken, yüksek sıcaklık ve düşük akım yoğunluğunda yüzeyde ince ve porözlü bir oksit tabakası oluşmaktadır. Artan voltaj ile birlikte por çapları, hücre boyutları ve bariyer oksit tabakasının kalınlığı ile birlikte artmaktadır (Şişmanoğlu, 2009).



Şekil 4.4. Oksit tabakasının şematik gösterimi

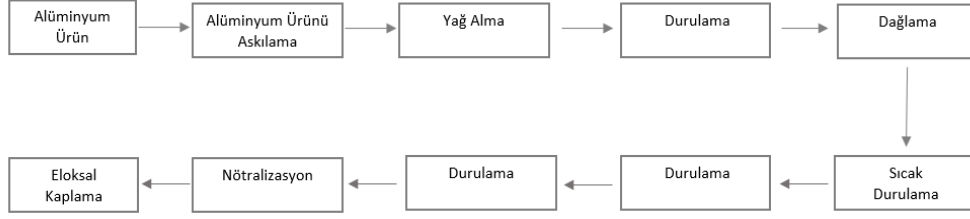


5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler Ve Numunenin Üretimi

Bu çalışmada ikiz merdane döküm yöntemiyle üretilmiş AA1050 alaşımı kullanılmıştır. Aynı zamanda çalışmada Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B olmak üzere iki farklı tane inceltici kullanılmıştır. Çalışma, 700-750 °C aralıktaki sıcaklıkta çalışan bir fırında kontrollü bir ergitme işlemine tabi tutulan %99,5 alüminyumdan oluşan alaşımı hazırlamak ile başlamıştır. Daha sonra erimiş alüminyum, tutma fırınlarına kesintisiz bir şekilde aktarılmıştır. Bu belirlenmiş tutma fırınlarından sıvılaştırılmış alüminyum, hassas bir şekilde belirlenmiş bir açıyla merdanelere giden yolluklara doğru yönlendirilmiştir. Tane incelticinin (Al-5Ti-0,2 / Al-5Ti-1B) ilavesi, hidrojen giderimi ve mekanik filtrelemelerden geçen sıvı alüminyum yolluklar vasıtasıyla tundish sistemine aktarılıp tip vasıtasıyla merdanelere beslenmiştir. Merdaneler arasına transfer edilen sıvı alüminyum birbirine zıt halde hareket eden su soğutmalı merdane yüzeylerine temas eder etmez katılma meydana gelerek levha üretimi gerçekleşmiştir.

Üretilen bu levhalar belirlenen boyutlarda kesilip, askılama sistemine sabitlenerek eloksallama işlemi için hazır hale getirmiştir. Hazırlanan levhalar yağ alma işlemi için alficlean ve su bulunan banyo içerisine yerleştirilmiştir. Bu işlemten sonra dağlama işlemine geçmeden 50m³ su bulunan banyoda durulama işlemine tabi tutulup; NaOH, alfisatin ve su bulunan 60-65°C dağlama banyosunda tutulmuştur. Daha sonra yaklaşık 50°C 'lık sıcak durulama ve 2 normal durulama banyosunun ardından; H₂SO₄ ve su bulunan banyoda nötralizasyon işlemi gerçekleştirilerek malzemenin yüzeyinde mat bir görüntü oluşturulmaktadır. Eloksallama işlemi için ise 16-21°C arasında H₂SO₄ ve su bulunan banyoda istenilen kaplama kalınlığına göre belirlenen sürelerde tutularak malzemenin yüzeyinde eloksallama oluşturulmuştur.



Şekil 5.1. Eloksal kaplama işleminin şematik gösterimi.

5.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar

5.2.1. Spektrometre cihazı

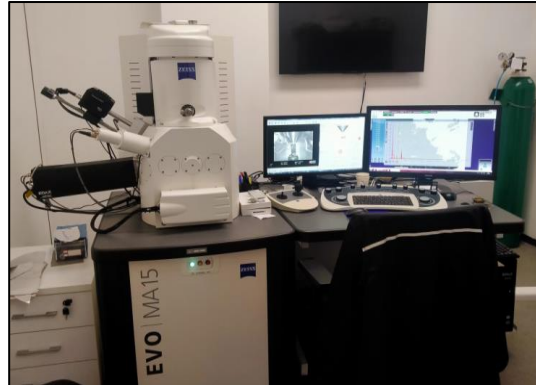
Üretilen levhaların kimyasal bileşimlerin tespiti için elementel analiz yapılmıştır. Elementel analiz Thermo Scientific marka ARL 4460 OES model optik emisyon spektrometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2. Spektrometre Cihazı

5.2.2. Sem (taramalı elektron mikroskobu) cihazı

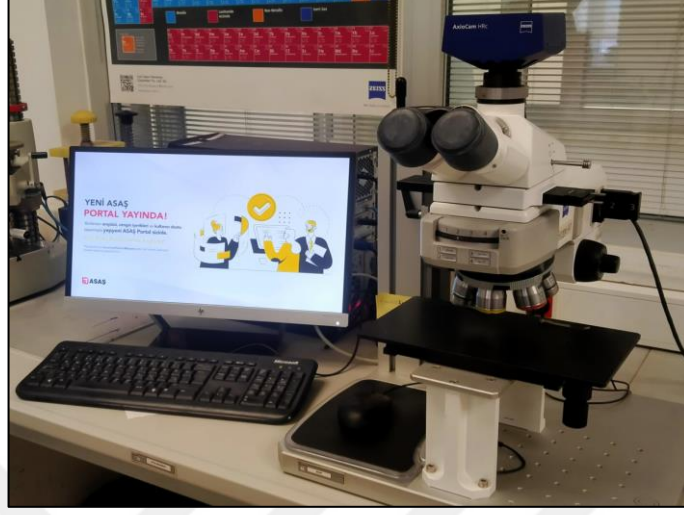
Levhadan alınan numunelerin yüzey topografisini inceleyebilmek için ZEISS marka EVO MA 15 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 5.3. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Cihazı

5.2.3. Optik mikroskop

Levhadan alınan numunelerin mikroyapı görüntülerini inceleyebilmek için ZEISS marka Scope.A1 model optik mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 5.4. Optik Mikroskop

5.2.4. Frezeleme, zımparalama, parlatma ve dağlama cihazları

Morfoloji açısından daha iyi görünüm elde edebilmek için zımparalama ve parlatma öncesi numuneler EpoFix Resin soğuk bakalite alınmış 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Bakalite alınan numuneler Herzog marka freze makinesi ile frezelandikten sonra zımparalama işlemine geçmiştir.



Şekil 5.5. Freze Cihazı



Şekil 5.6. Zımparalama ve Parlatma Cihazı

Zımparalama cihazında sırasıyla 500, 1200 ve 2400 SiC zımparalama kağıtları kullanılarak zımparalama işlemi yapılmıştır. Parlatma işlemi için de silika, kaydırıcı ve elmas süspansiyon kullanılarak Struers marka Tegramin-30 cihazı ile parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7. Dağlama Cihazı

Tetreflora borik asit kullanılarak Struers marka elektrolitik dağlama cihazı ile dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

5.2.5. Makro-mikro sertlik cihazları

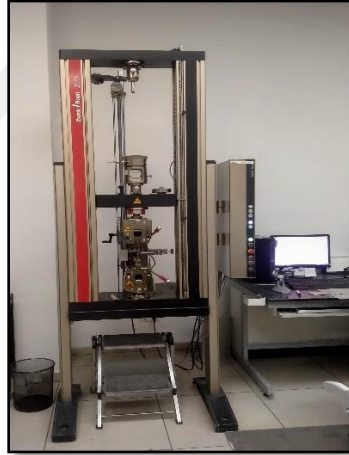
Makro-sertlik ölçümü Bulut Makina markalı BMS 200-RB cihazı ile 62,5 kgf' luk kuvvet uygulanarak çapı 2,5 mm olan çelik bilye ile gerçekleştirilmiştir. Mikro-sertlik ölçümü için Leica marka VMHT MOT model sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri için hazırlanan kesit numunelerine 10 sn boyunca 50 gf yük uygulanmış olup, bu yük daha doğru sonuç elde edebilmek için numunenin 5 farklı bölgesine uygulanmış, ortalama sertlik değeri asıl sertlik değeri olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.8. Makro-Mikro Sertlik Cihazları

5.2.6. Çekme cihazı

Çekme testi, ZwickRoell marka 50 kN kapasiteli cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler için test hızı 10 mm/dk olarak belirlenmiş olup, ölçme boyu 50 mm olarak ayarlanmıştır. Tüm numune ölçümleri DIN EN ISO 6892-1 test standartlarına uygun olarak 0° ve 90° yönlerinde her bir inceltici için ikişer adet olmak üzere toplamda dört numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.9. Çekme Cihazı

5.2.7. Pürüzlülük cihazı

5 mm ve 3 mm levhalardan alınan numunelerin Ra, Rz, Rt değerlerini ölçebilmek için Time marka TR200 model pürüzlülük cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.10. Pürüzlülük Cihazı

5.3. DeneySEL Sonuçlar

5.3.1. Spektrometre analizi

Alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimini tespit edebilmek için kapsamlı bir spektrometrik analiz yürütülmüştür. Ardından gelen kimyasal bileşim verileri dikkatli bir şekilde derlenmiş ve Tablo 5.1.'de metodik olarak açıklanmıştır. Tablo 5.1.'de görüldüğü gibi Al- 5Ti-1B tane inceltici kullanılan alaşımın Al- 5Ti-0,2B tane inceltici kullanılan alaşıma göre içerdiği B miktarı yaklaşık 5 kat daha fazladır.

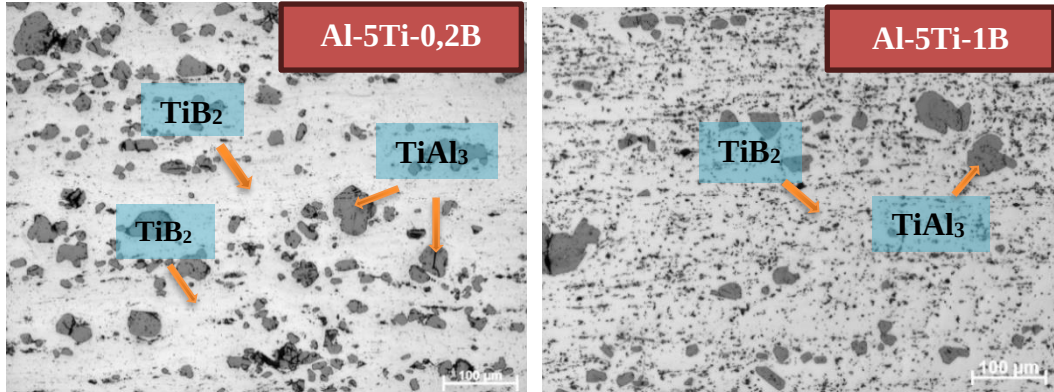
Tablo 5.1. Çalışmada kullanılan alaşımların kimyasal bileşimi.

İnceltici Türü	Al (%)	Ti (%)	B (%)
Al - 5 Ti - 0,2 B	99.552	0.023 -0.025	0.0005 -0.0010
Al - 5 Ti - 1 B	99.515	0.023 -0.025	0.0025 -0.0035

5.3.2. Mikroyapı incelemeleri

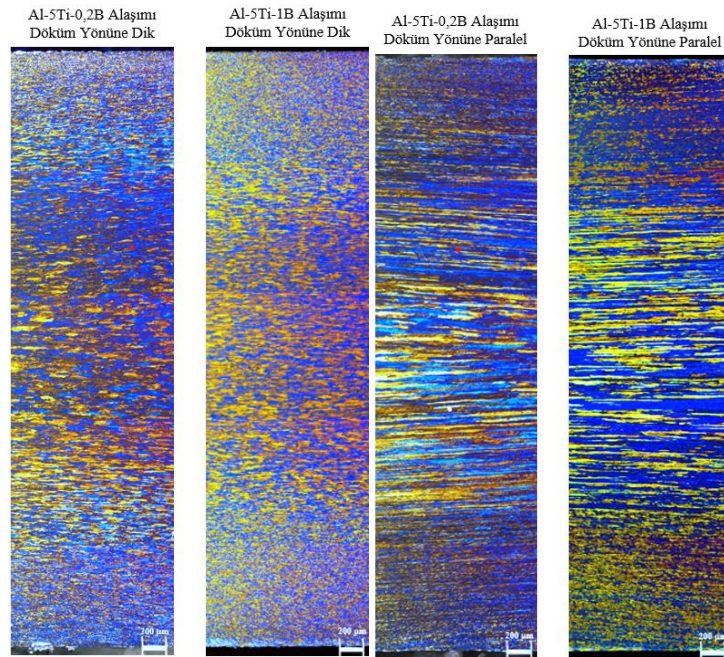
Şekil 5.11'de alüminyum alaşımlarında kullanılan Al-5Ti-0,2 B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerin ışık mikroskobu kesit mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. İki tane inceltici arasında kompozisyondan da anlaşılacağı gibi içerdikleri bor elementi oranları farklıdır. Dolayısıyla mikroyapıda yer alan TiB_2 partikül miktarlarında resimlerden görüleceği üzere bazı farklılıklar göstermektedir. Al-5Ti-1B tane inceltici çok sayıda TiB_2 partikül içerirken Al-5Ti-0,2 B daha az sayıda TiB_2 içermekle birlikte $TiAl_3$ partiküllerinin nispeten çok sayıda ve büyük boyutlu olduğu anlaşılmaktadır. Tane inceltme mekanizmasında TiB_2 partiküllerinin heterojen çekirdeklenme mekanizması ile tane inceltmede daha etkin olduğu bilinmektedir. Çalışmada kullanılan Al-5Ti-1B tane incelticinin mikroyapıda diğer incelticiye göre çok daha

küçük tane yapısı sağladığı Şekil 5.11.'de açık bir şekilde görülmektedir(Arslan ve ark., 2019; Hu ve ark. 2021).

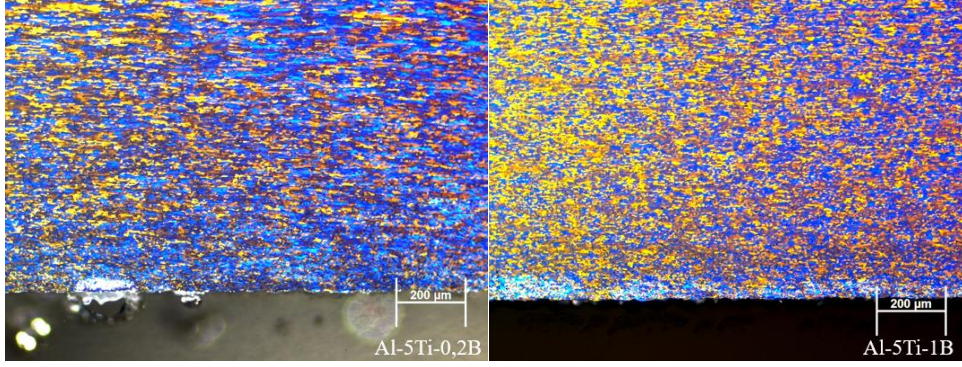


Şekil 5.11. Al-5Ti-0,2 B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerin mikroyapısal analizi.

Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B alaşımlarının mikro yapısal analizi ve tane büyüklüklerini karşılaştırmak amacıyla optik mikroskop kullanılarak mikroyapıları görüntülenmiştir (Şekil 5.12. , Şekil 5.13). İncelemelerde farklı tane inceltici kullanımı ile mikroyapıda daha ince ve eş eksenli yapı oluşumu elde edilmiştir. Bu tekdüzelik, tane dağılımı, metaller arası yapılar ve yüzey düzensizlikleri ile ilgili potansiyel sorunların önlenmesinde çok önemlidir. Böylesine homojen bir mikroyapı, olağanüstü yüzey kalitesi ve dayanıklılıkla karakterize edilen sağlam ürünlerin yaratılması için temel oluşturur (Lin ve ark., 2007; Luo, 2022).



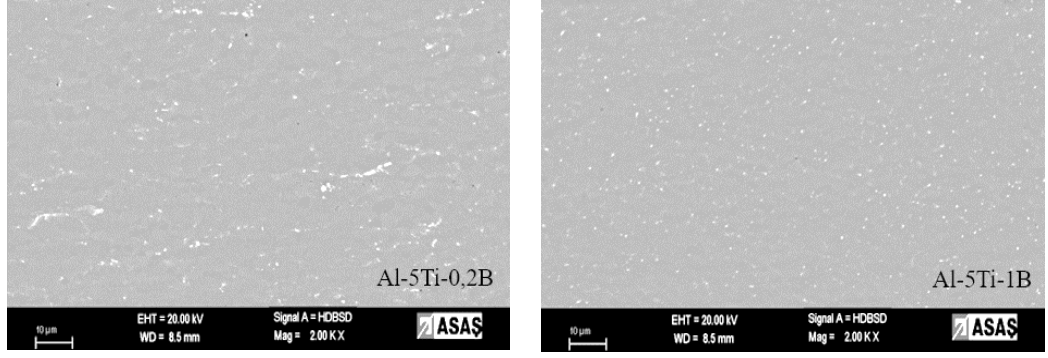
Şekil 5.12. Al-5Ti-0,2 B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levhanın kesit mikroyapı görüntüleri.



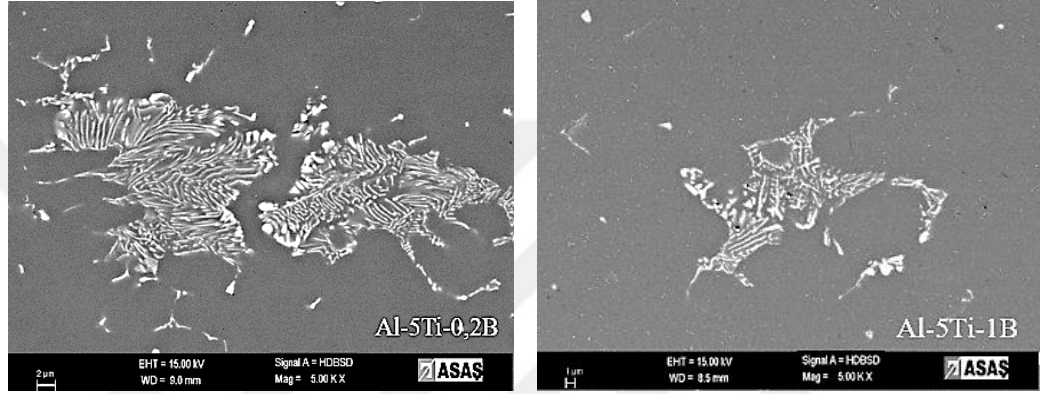
Şekil 5.13. Al-5Ti-0,2 B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levhanın merdane yüzeyine yakın kesit mikroyapı görüntüleri.

5.3.3. Sem incelemeleri

Al-5Ti-0,2 B ve Al-5Ti-1B alaşımlarının yüzey ve intermetalik incelemeleri için SEM cihazı kullanılmıştır. İnceleme sonucunda; optik mikroskoptaki görüntüyü destekler nitelikte malzemenin homojen dağılımı net bir şekilde gözler önüne serilmiştir. Hem optik mikroskop görüntüleri hem de SEM görüntüleri Al-5Ti-1B alaşımının daha ince taneli olduğunu göstermektedir. Ayrıca Şekil 5.14.’de Al-5Ti-0,2B alaşımının içerisindeki beyaz olarak görülen intermetalik faz bölgelerin homojen bir şekilde dağılmadığı ve lokal bölgelerde toplandığı görülmektedir. Böylece; Al-5Ti-1B alaşımının üstün çekirdeklenebilme yeteneği ile homojen bir dağılım sağlaması sayesinde intermetalik yapısı ve tane yapısındaki bu gelişim eloksallama gibi bu tür mikroyapısal etmenlere bağlı olan bir proses için olumlu bir etki yaratmaktadır. Şekil 5.15.’te ayrıca levha kesit merkez hattında gözlemlenen merkez hattı segregasyonlarına ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Resimde görülen merkez hattı segregasyonu ötektikvari morfolojide Fe-Si-Al esaslı intermetalik fazlardan oluşmaktadır. Al-5Ti-1B tane incelticisinin katılma ve tane yapısında yarattığı etki nedeniyle merkez hattı segregasyonunun şiddetinin azaldığı görülmektedir. Daha etkin tane oluşumu ile matriste hapsolan elementler daha geç katılan merkez hattına difüze olamadan yapıda yer alıp merkez hattı segregasyonun şiddetinin azalmasına neden olmuştur(Basak ve ark., 2021; Ashassi-Sorkhabi ve ark., 2008).



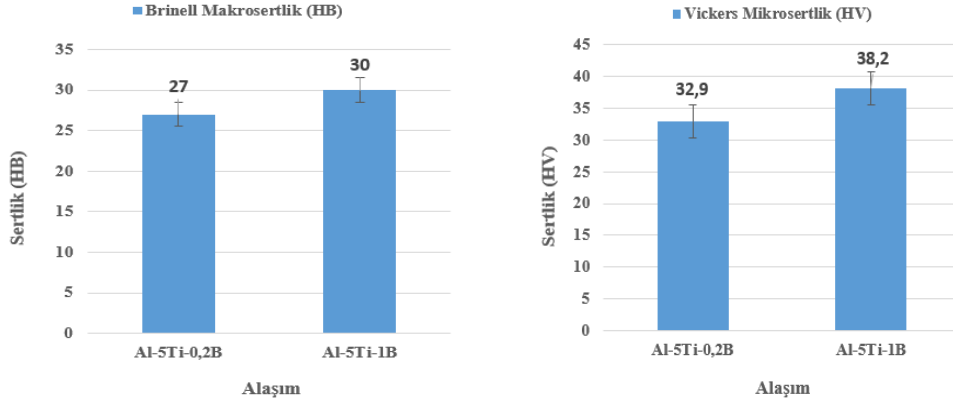
Şekil 5.14. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levha kesit SEM görüntüleri.



Şekil 5.15. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levha merkez hattı SEM görüntüleri.

5.3.4. Sertlik testi sonuçları

Şekil 5.16.'te iki alaşımın makro ve mikro sertlikleri karşılaştırılmıştır. Numunelerin yüzeyden Brinell makrosertlik ölçümleri yapıldığında; Al-5Ti-0,2B alaşımının ortalama yüzey sertlik değeri 27 HB iken, Al-5Ti-1B alaşımının ortalama yüzey sertliği 30 HB olarak ölçülmüştür. Numunelerin kesitten Vickers mikrosertlik ölçümleri yapıldığında ise Al-5Ti-0,2B alaşımının ortalama sertlik değeri 32,9 HV iken, Al-5Ti-1B alaşımının ortalama sertliği 38,2 HV olarak ölçülmüştür. Al-5Ti-1B tane inceltici kullanılan alaşımda çekirdeklenmenin artması, tane yapısının homojen ve ince bir morfolojiye bürünmesi ile birlikte alaşımın sertliğinin artmasında çok büyük rol oynadığı görülmektedir (Can, 2023; Izcankurtaran ve ark., 2021; Pattnaik ve ark., 2015).



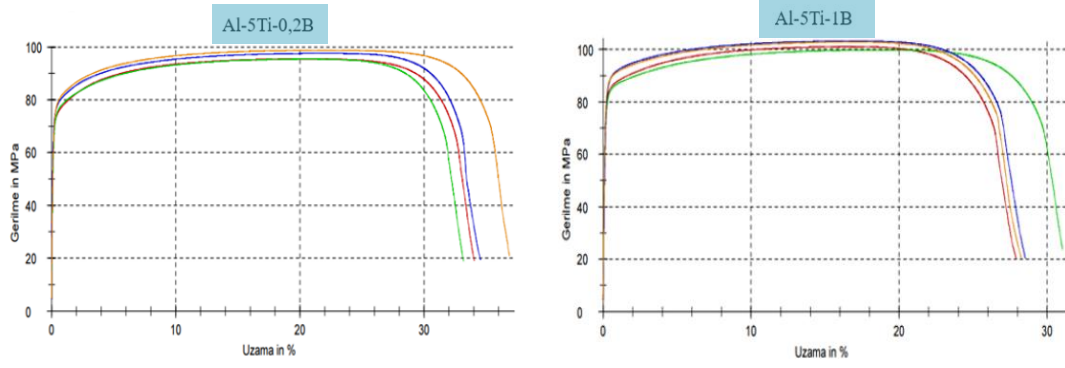
Şekil 5.16. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levhaların makro-sertlik ve mikro-sertlik değerleri.

5.3.5. Çekme testi sonuçları

Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B alaşımlarının çekme testi sonuçları Şekil 5.17.'de verilmiştir. Bu alaşımların sırasıyla 0° ve 90° yönündeki akma ve çekme mukavemetleri Tablo 5.2.'de verilmiştir. Al-5Ti-1B tane inceltici içeren alaşımların ince taneli olması, dolayısıyla daha fazla tane sınırı içermesi anlamına gelmektedir. Tane sınırları dislokasyon hareketini sınırladığı için daha fazla tane sınırı içeren alaşımların mukavemetinin ve sertliğinin daha yüksek olacağı anlamına gelmektedir. Hall-Petch bağıntısı da malzemelerin tane inceliği ile mukavemetleri arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır (Wen ve ark. , 2023; Alipour , 2023)

Tablo 5.2. Çekme testi sonuçları.

Numune Adı	Numune Yönü	Akma Dayanımı %0,2 (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama A50 (%)
Al-5Ti-0,2B	0°	72	95	34
Al-5Ti-0,2B	0°	73	95	33,1
Al-5Ti-0,2B	90°	76	98	34,5
Al-5Ti-0,2B	90°	77	99	36,8
Al-5Ti-1B	0°	83	101	27,9
Al-5Ti-1B	0°	81	100	31
Al-5Ti-1B	90°	86	103	28,5
Al-5Ti-1B	90°	87	103	28,2



Şekil 5.17. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levhaların çekme testi grafikleri.

5.3.6. Pürüzlülük testi sonuçları

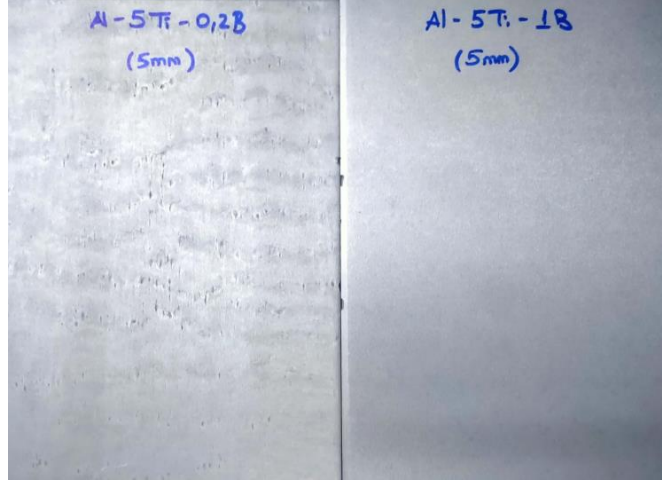
Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B alaşımlarının pürüzlülük testi sonuçları Tablo 5.3'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre Al-5Ti-1B alaşımının daha ince taneli ve homojen bir yapıda olmasından kaynaklı yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı net bir şekilde görülmektedir.

Tablo 5.3. Pürüzlülük testi sonuçları.

Numune	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
Al-5Ti-0,2B	1,868	2,24	8,803
Al-5Ti-1B	1,152	1,397	5,364

5.3.7. Eloksal kaplama görüntüleri incelemesi

Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B alaşımlarının eloksallama işlemi sonrasındaki yüzey görüntüleri Şekil 5.18.'de verilmiştir. Bu görüntülere baktığımızda Al-5Ti-0,2B alaşımının yüzeyinde beneklenme problemi dediğimiz pürüzlü bir yüzey görülmektedir. Al-5Ti-1B alaşımında ise bu problemin ortadan kalktığı net bir şekilde görülmüştür. Al-5Ti-1B tane inceltici kullanılan alaşımlarda fazla borun etkisi ile oluşan tane yapısı ve intermetaliklerdeki boyut ve dağılımlarındaki değişimler eloksallama yüzey işleminde istenilen yüzey kalitesine ulaşmasında olanak sağlamıştır.



Şekil 5.18. Eloksal kaplanmış numunelerin yüzey görüntüleri.

6. GENEL SONUÇLAR

Çalışmada farklı bor içeriğine sahip Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticileri 1050 alüminyum alaşımı içerisine dahil edilerek başarılı bir şekilde üretilmiştir. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B alaşımları arasındaki temel fark borun (B) varlığında yatmaktadır. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B arasındaki farklar şunlardır:

- Mikroyapı Etkisi: Al-5Ti-1B'un alüminyum alaşımına dahil edilmesi, alaşımın mikroyapısının homojenliğine yol açmıştır. Ayrıca; sertleşebilirliği geliştirmiş ve tane yapısını iyileştirerek intermetaliklerin oluşumu en aza indirilerek diğer mikroyapısal ve mekanik özellikleri de geliştirilmiştir. Al-5Ti-0,2B'un bor bileşiminin düşük olmasından dolayı aynı mikroyapısal değişiklikleri göstermemektedir.
- Mekanik Özellikler: Al-5Ti-1B 'de borun varlığı potansiyel olarak artan mukavemet ve sertlik gibi gelişmiş mekanik özelliklerle sonuçlanmıştır. Al-5Ti-0,2B ise bu özelliklerde aynı seviyede bir gelişme göstermemektedir.
- SEM ve optik mikroskop görüntülerinden Al-5Ti-1B tane inceltici kullanılarak üretilen levha mikroyapısının ince taneli, homojen olduğu ve bunun yanında daha az şiddette merkez hattı segregasyonu oluşumuna katkı sağladığı belirlenmiştir.
- Daha yüksek bor içeriğine sahip Al-5Ti-1B tane inceltici içeren alaşımın diğer incelticiye göre AA 1050 alaşımı için daha fazla yeni çekirdekleyici bölgelerin oluşumunu destekleyerek tane boyutunu incelttiği ve bu nedenle sertlik ve mukavemet özelliklerini daha fazla geliştirdiği kanıtlanmıştır.
- Al-5Ti-1B tane inceltici kullanımıyla tane yapısı ve intermetalik boyut ve dağılımlarında meydana gelen gelişimler yüzey pürüzlülüğünü de azaltarak eloksallama yüzey işleminin istenen yüzey kalitede elde edilmesine olanak sağlamıştır.



KAYNAKLAR

- Aerts, T., Dimogerontakis, T., De Graeve, I., Fransaer, J., & Terryn, H. (2007). Influence Of The Anodizing Temperature On The Porosity And The Mechanical Properties Of The Porous Anodic Oxide Film. *Surface And Coatings Technology*, 201(16-17), 7310-7317.
- Aktuğ, S. L. (2009). İkiz Merdane Döküm Yöntemiyle Üretilmiş Aa1050 Ve Aa3003 Alüminyum Alaşımlarının Termomekanik İşlemler Sonrası Mikro Yapı İncelemesi. *Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Alipour, M. (2023), "The Comparison of Effects of Ultrasonic Treatment, SIMA Process and Al-5Ti-1B Grain Refiner on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-15%Mg2Si in-situ Composite," *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 97–114, doi: 10.22068/IJMSE.2957
- Arslan, İ., E. Gavgalı, E., And Çolak, M., (2019) "Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde AL5Ti1B ve AL10SR İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi", *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 2, pp. 237–244, doi: 10.21541/APJES.424920.
- Ashassi-Sorkhabi, H., Moradi-Haghighi, M. and Hosseini, M. G.,(2008), "Effect of rare earth (Ce, La) compounds in the electroless bath on the plating rate, bath stability and microstructure of the nickel-phosphorus deposits," *Surf Coat Technol*, vol. 202, no. 9, pp. 1615–1620, doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.07.019.
- Atlı, K. C. (2007). The Effects Of Solidification Conditions On The Formability Of The Twin-Roll Cast AA1050. *Boğaziçi University, Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, Mechanical Engineering(Master of Science)*.
- Bala, B. (2023). AA1050 Alüminyum Alaşımının Bilyalı Dövme Sonrası Mekanik Davranışlarının, Yüzey Morfolojilerinin Ve Yüzey Topografyalarının İncelenmesi. *Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Basak, S., Biswas, P., Patra, S., Roy, H. and Mondal, M. K.(2021) "Effect of TiB₂ and Al₃Ti on the microstructure, mechanical properties and fracture behaviour of near eutectic Al-12.6Si alloy," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 28, no. 7, pp. 1174–1185, doi: 10.1007/S12613-020-2070-8/METRICS.
- Bayseçkin, E. (2002). Sürekli Döküm Yöntemiyle Üretilen Alüminyum Levhalarda Döküm ve Homojenleştirme Sürecinde Mikro Yapısal Değişimin İncelenmesi. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*.

- Berk, V., (2004), “Yüzey İşlemler Teknolojileri I”, 1. Baskı, Galvanoteknik Yayınları
- Can, R. (2022). Alüminyum Tane İncelticilerin Toz Metalurjisi İle Üretimi Ve Döküm Performansının İncelenmesi. *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.*
- Can, R. et al.,(2023) “Toz Metalurjisi Yöntemi ile Tane İnceltici Üretimi ve Döküm Performansının İncelenmesi,” *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, vol. 15, no. 1, pp. 151–163, doi: 10.29137/UMAGD.1167854.
- Celis, J.-P., Drees, D., Huq, M., Wu, P.-Q., & De Bonte, M. (1999). Hybrid Processes—A Versatile Technique To Match Process Requirements And Coating Needs. *Surface And Coatings Technology*, 113(1-2), 165-181.
- Çoruhlu, İ. (2023). 5754 Alüminyum Alaşımına Uygulanan Eloksal Kaplama İşleminin Cevap Yüzey Metodu İle Optimizasyonu, *Samsun Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*.
- 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, Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*.
- Docplayer, (2023). <https://docplayer.biz.tr/69516059-Eloksal-anodik-oksidasyon.html> adresinden 13 Aralık 2023 tarihinde alınmıştır.
- Eken, T. Y. (2018). İkiz Merdane Sürekli Döküm Tekniği İle Üretilen Hadde Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Davranışı Ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. *Bursa Teknik Üniversitesi, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Gazioğlu, B. H. (2019). Pitting Corrosion Of Aa1050 Sheets Produced By Dc Casting And Twin-Roll Casting Techniques *Chemical Engineering Yeditepe University Natural And Applied Sciences İn Partial Fulfillment Of The Requirements(Master Of Science)*.
- Gloria, I. D. (2001). Control Of Grain Refinement Of Aluminum-Silicon Alloys By Thermal Analysis.
- Gökşahin, E. (2007). Sert Eloksal İle Kaplanmış 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışının İncelenmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Henley, V. (2013). *Anodic Oxidation Of Aluminium And Its Alloys: The Pergamon Materials Engineering Practice Series*: Elsevier.
- Hu, M., Wang, F., Jiang, B., Wang, H., Liu, Y., & Ji, Z. (2022). Fabrication of Al–Ti–B Grain Refiner Using Machining Ti Chips, Reaction Mechanisms and Grain Refinement Performance in Pure Al. *Metals and Materials International*, 1-9, 2021, doi: 10.1007/s12540-021-01011-9
- Ibarra, G. (1999). Control Of Grain Refinement Of Al-Si Alloys By Thermal Analysis.

- Immanuel, R., Panigrahi, S., Racineux, G., & Marya, S. (2017). Investigation On Crashworthiness Of Ultrafine Grained A356 Sheets And Validation Of Hall-Petch Relationship At High Strain-Rate Deformation. *Materials Science And Engineering: A*, 701, 226-236.
- Izcankurtaran, D., Tunca, B., & Karatay, G. (2021). Investigation of the effect of grain refinement on the mechanical properties of 6082 aluminium alloy. *Open Journal of Applied Sciences*, 11(6), pp. 699-706, Jun. 2021, doi: 10.4236/ojapps.2021.116051
- Karakoyun, F. (2007). The Effects Of Alloying Elements On The Microstructure And Annealing Behavior Of The Twin-Roll Cast AA1050 Strip. *Mechanical Engineering Boğaziçi University Science And Engineering İn Partial Fulfillment Of The Requirements(Master Of Science)*.
- Kaya, A. (2019). 1050 Alüminyum Alaşım Ve H00 Kondisyonda Farklı Silisyum Oranlarının Mekanik Özelliklere Etkileri. *Metallurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*.
- Küçük, İ. (2020). Characterization Of The Corrosion Behaviour Of Modified 3003 Aluminium Finstock Alloys Made By Direct Chill Casting And Twin Roll Casting Routes Used İn Car Heat Exchange Systems Using Electrochemical Tests. *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, 35(4), 1985-1996.
- Lin, S., Aliravci, C. and Pekgülyüz, M. O., (2007), "Hot-Tear Susceptibility of Aluminum Wrought Alloys and the Effect of Grain Refining," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 5, no. 38, pp. 1056–1068, doi: 10.1007/S11661-007-9132-7.
- Luo, Y. et al., (2022), "Effect of Warm Rolling on the Grain-Refining Performance of Al-5Ti-1B Grain Refiner in Al," *JOM*, vol. 74, no. 3, pp. 1210–1217, doi: 10.1007/S11837-021-05137-4.
- Malcıoğlu, A. U. (2022). İkiz Merdane Döküm Yöntemiyle Dökülen 3xxx Alaşımların Alternatif Termo-Mekanik Proses Sonrası Mikroyapı Ve Korozyon Davranışının İncelenmesi. *Metallurji Ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi*.
- Maraşlıoğlu, D. (2005). Titanyum Diborür (TiB₂) Üretimi *Gazi Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi .
- Onat, N. (2011). Dökümcülere Pratik Bilgiler. *Alüminyum Döküm Teknolojisi Tüdöksad*.
- Övündür, M. (2014). Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Mikroark Anodik Oksidasyon ve Anodik Oksidasyon İşlemlerinin Karşılaştırılması. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Pattnaik, A. B., Das, S., Jha, B. B. and Prasanth, N., (2015) "Effect of Al-5Ti-1B grain refiner on the microstructure, mechanical properties and acoustic emission characteristics of Al5052 aluminium alloy," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 171–179, doi: 10.1016/J.JMRT.2014.10.017.

- Pozan, M. (2022). A356 Alaşımı Parçaların Mekanik Özelliklerinin Toz Formlu Tane İncelticiler Kullanılarak Geliştirilmesi. *Zmir Katip Çelebi Üniversitesi Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Ramachandran, T., Sharma, P., & Balasubramanian, K. (2008). *Grain Refinement Of Light Alloys*. Paper Presented At The Proceedings Of The 68th Wfc-World Foundry Congress, Chennai, India.
- Serdarlı, O. (2011). A Study On The Production And Properties Of In-Situ Titanium Diboride Particulate Reinforced Aluminum A356 Alloy Composite. *Natural And Applied Science Of Middle East Technical University, Metallurgical And Materials Engineering (Master Of Science)*.
- Sigworth, G. K., & Kuhn, T. A. (2007). Grain Refinement Of Aluminum Casting Alloys. *International Journal Of Metalcasting*, 1(1), 31-40.
- Şişmanoğlu, T. (2009). Anodik Oksidasyon Yöntemiyle 2024, 6082 Ve 7075 Kalite Alüminyum Alaşımlarının Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji Ve Malzeme Anabilim Dalı Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Vorobyova, A., Outkina, E., & Khodin, A. (2007). Self-Organized Growth Mechanism For Porous Aluminum Anodic Oxide. *Russian Microelectronics*, 36, 384-391.
- Wen, Y., Wu, Y., Gao, T., Wei, Z. and Liu, X. (2023), "Effect of Al-5Ti-0.25C-0.25B and Al-5Ti-1B Master Alloys on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-9.5Si-1.5Cu-0.8Mn-0.6Mg Alloy," *Materials* 2023, Vol. 16, Page 1246, vol. 16, no. 3, pp. 1246, doi: 10.3390/MA16031246.
- Yaman, M. B., Kocaman, E., & Barış, A. (2022). Al7075 Alaşımına İlave Edilen Al-5Ti-1b Tane İncelticinin Yaşlanma, Mikroyapı, Sertlik Ve Korozif Özellikleri Üzerindeki Etkisi. *Gazi University Journal Of Science Part C: Design And Technology*, 10(4), 870-883.
- Yapıcı, C. (2012). Alti5b1 Master Alaşımının Alüminyum Basınçlı Döküm Yönteminde Tane İnceltici Olarak Kullanımının İncelenmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Yavuz, S. (2018). Silah Gövde Malzemesi Aa7075-T6 Alaşımının Anodik Oksidasyonu. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Yeşilbaş, B. (2014). İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Yöntemiyle Eloksoal Kalite AA5005 Alüminyum Alaşımı Levha Üretimi Ve Karakterizasyonu. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Tuğçe YUNAK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2024, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2018-2019 yılları arasında Anadolu Döküm Sanayi A.Ş. ve Assan Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de Mühendislik Stajı yaptı.
- 2022' den beri Asaş Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- YUNAK, T., Erhan, D. U. R. U., SEVİNÇ, S., & ASLAN, S. (2023). Al-5Ti-0, 2B ve Al-5Ti-1B Tane İncelticilerin AA 1050 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri. *Open Journal of Nano*, 8(2), 99-106.