

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

**İKİZ MERDANELİ DÖKÜM YÖNTEMİNDE BAKIR VE ÇELİK SHELL İLE
ÜRETİLEN 5005 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA ÜRETİM PARAMETRELERİNİN,
MEKANİK ÖZELLİKLERİN VE MİKROYAPILARIN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan Berkay TAMER

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2024

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

**İKİZ MERDANELİ DÖKÜM YÖNTEMİNDE BAKIR VE ÇELİK SHELL İLE
ÜRETİLEN 5005 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA ÜRETİM PARAMETRELERİNİN,
MEKANİK ÖZELLİKLERİN VE MİKROYAPILARIN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan Berkay TAMER

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serdar ASLAN

TEMMUZ 2024

Furkan Berkay TAMER tarafından hazırlanan “İkiz Merdaneli Döküm Yönteminde Bakır ve Çelik Shell ile Üretilen 5005 Alüminyum Alaşımlarında Üretim Parametrelerinin, Mekanik Özelliklerin ve Mikroyapıların İncelenmesi” adlı tez çalışması 16.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu 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 :	Doç. Dr. Mehmet UYSAL Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa AKÇİL Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA 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 Merdaneli Döküm Yönteminde Bakır ve Çelik Shell ile Üretilen 5005 Alüminyum Alaşımlarında Üretim Parametrelerinin, Mekanik Özelliklerin ve Mikroyapıların İncelenmesi” 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.

(16/07/2024).

Furkan Berkay TAMER





Biricik anneciğime ve sevgili eşime...



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Sn. Doç. Dr. Serdar ASLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı yürütmemde her türlü kaynak, makine, ekipman, teçhizata ulaşmam konusunda tüm imkanlarını kullanıma sunan ASAS Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın ASAS Alüminyum Ar-Ge merkezinde yürütülmesinde desteklerini esirgemeyen başta Yassı Mamuller Levha ve Folyo Ar-Ge yöneticisi Sn. Onur BİRBAŞAR ve Laboratuvar Uzman Yardımcısı Samet SEVİNÇ'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Bu zorlu süreçte her daim beni destekleyen ve yüreklendiren sevgili annem Aynur TAMER'e ve eşim Hilal UYGAN TAMER'e çok teşekkür ederim.

Furkan Berkay TAMER



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1.GİRİŞ	1
2.LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1.Alüminyumun Tarihçesi	3
2.2.Alüminyumun Özellikleri.....	4
2.3.Alüminyum Alaşımları	6
2.4.Alaşım Elementlerinin Alüminyum Alaşımlarına Etkisi	9
2.4.1.Bakır (Cu)	9
2.4.2.Silisyum(Si).....	9
2.4.3.Magnezyum (Mg)	9
2.4.4.Titanyum (Ti)	9
2.4.5.Krom (Cr)	10
2.4.6.Mangan (Mn).....	10
2.4.7.Nikel (Ni).....	10
2.4.8.Çinko (Zn)	10
2.5.Birincil Alüminyum Üretimi	10
2.5.1.Bayer prosesi.....	11
2.5.2.Hall – Heroult prosesi	13
2.6.İkincil Alüminyum Üretimi	15
2.7.Alüminyum Levha Üretim Yöntemleri	16
2.7.1.Doğrudan soğutmalı döküm yöntemi (Direct Chill-DC)	17
2.7.2.İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemi (TRC).....	18
2.7.2.1.TRÇ yönteminin tarihçesi	18
2.7.2.2.İkiz merdaneli döküm yönteminin prensipleri	19
2.7.2.3.Döküm öncesi uygulanan işlemler	21
2.7.2.4.Döküm kalitesine etki eden faktörler	28
2.7.2.5.Döküm hataları ve sebepleri.....	29
2.7.2.6.TRÇ döküm yöntemini avantaj ve dezavantajları	31
2.7.3.Soğuk Haddeleme	31
2.7.3.1.Haddeleme prosesinde uygulanan ısı işlemler	33
3.MATERYAL VE YÖNTEM	35
3.1.Materyal	35
3.2.Yöntem	36

3.3.Analizler	38
4.ARAŞTIRMA BULGULARI	43
4.1.Mikroyapı İncelemeleri	43
4.1.1.Döküm kalınlığında yapılan mikroyapı incelemeleri.....	44
4.1.2.Ara tav uygulaması mikroyapı incelemeleri	52
4.2.Mekanik Özellik İncelemeleri	53
4.2.1.Çekme testleri.....	53
4.2.2.Erichsen çökertme testleri	56
4.2.3.Sertlik testleri	58
4.2.4.Elektriksel iletkenlik testleri.....	59
5.TARTIŞMA VE SONUÇ	61
5.1.Üretim Parametreleri İnceleme Sonuçları	61
5.2.Mikroyapı İncelemeleri Sonuçları	62
5.3.Mekanik Özellikler İnceleme Sonuçları.....	63
5.4.Elektriksel İletkenlik İnceleme Sonuçları	64
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	71

KISALTMALAR

AW	: A wrought product (işlenmiş ürün)
AA	: Aluminium Association (Alüminyum Birliği)
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BF	: Bright Field (Aydınlık Alan Modu)
CFF	: Ceramic Foam Filter (Seramik Köpük Filtre)
DBF	: Deep Bed Filter (Derin Yatak Filtresi)
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standardizasyon Enstitüsü)
DC	: Direct Chill Casting (Doğrudan Soğutmalı Döküm Yöntemi)
EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağılımlı Spektroskopi)
EN	: Euro Norm (Avrupa Normları)
HV	: Hardness Vickers (Vickers sertlik birimi)
HBW	: Hardness-Brinell-Wolfram (Brinell Sertlik Birimi)
HF	: Hidroflorik asit
IACS	: International Annealed Copper Standart
MHS	: Merkez Hattı Segregasyonu
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
TRC	: Twin Roll Casting (İkiz Merdaneli Döküm Yöntemi)



SİMGELER

gf	: gram force [gram]
kA	: Kilo amper
kHz	: Kilo hertz
MPa	: Mega Paskal
MS/m	: Mega Siemens/meter] (Elektriksel iletkenlik birimi)
μm	: Mikrometre
cm²	: santimetre kare
cm³	: santimetre küp
Cu	: Copper (Bakır)
St	: Steel (Çelik)
St/Cu Shell	: Çelik/Bakır Shell çifti
St/St Shell	: Çelik/Çelik Shell çifti
(t/h/m)	: Ton/Hour/Meter (Prodüktivite)
W/m.K	: Watt/metre.Kelvin



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Alüminyumun kullanım alanları.....	5
Tablo 2.2. Alüminyum alaşımlarının bazı özellik aralıkları.....	6
Tablo 2.3. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması ve ısıt işlemler uygulanabilirliği.	7
Tablo 2.4. Alüminyum alaşımlarının kondisyon kısaltmaları ve açıklamaları [11-13].	8
Tablo 3.1. EN 573-2 standardına göre EN AW-5005 alüminyum alaşımı kompozisyonu.....	36
Tablo 3.2. Her iki shellin de döküldüğü ergitme fırınından alınan numunenin spektral analiz sonucu.....	36
Tablo 4.1. 500X, 1000X ve 2000X büyütme oranında alınan SEM görüntüleri.....	48
Tablo 4.2. EDS alan taraması 1 ve 2’de pik veren elementler ve % ağırlıkça oranları (Çelik/çelik shell çifti).....	50
Tablo 4.3. EDS alan taraması 1 ve 2’de pik veren elementler ve % ağırlıkça oranları (Çelik/çelik shell çifti).....	51
Tablo 4.4. Farklı aşamalarda uygulanmış çekme test sonuçları.....	54
Tablo 4.5. Proses 1 – 8 için nihai numunelere uygulanmış Erichsen test sonuçları..	56
Tablo 4.6. Çelik/çelik ve çelik/bakır shell çiftlerinde her iki yüzeylerden alınan sertlik değerleri.....	58
Tablo 4.7. 480 kHz frekansında MS/m cinsinden alınan elektriksel iletkenlik sonuçları.....	59



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. 1973 yılında Dünyadaki Alüminyum üretiminin ülkelere göre dağılımı.....	4
Şekil 2.2. Alüminyumun genel özellikleri.	4
Şekil 2.3. Alüminyumun kullanım alanları pasta dilimi grafiği.	6
Şekil 2.4. Bayer Prosesi akış şeması.	11
Şekil 2.5. Boksit cevherinden birincil alüminyum üretimine akış şeması.	13
Şekil 2.6. Soderberg ve Prebake elektroliz hücre sistemleri.	14
Şekil 2.7. Alüminyum metalinin ikincil üretim akış şeması.	16
Şekil 2.8. DC döküm yönteminin şematize edilmiş resmi.	17
Şekil 2.9. DC yöntemi ile alüminyum yassı mamül üretim proses akışı.	18
Şekil 2.10. İkiz Merdaneli Sürekli Döküm Hattı Şeması.	19
Şekil 2.11. TRC yönteminde katılaşma anının şematize gösterimi.	19
Şekil 2.12. TRC yöntemi şematize gösterimi ve kısımları.	20
Şekil 2.13. İkiz merdaneler ve ergimiş metal arasındaki etkileşimin şematize resmi.	21
Şekil 2.14. Sıvı Alüminyum içerisinde sıcaklığa bağlı olarak üstel artan hidrojen çözünürlüğü grafiği.	24
Şekil 2.15. Gaz gözenekliliğinin tipik mikrografı. Orijinal büyütme: 100X.	25
Şekil 2.16. a) Gaz porozitesi bulunmayan ve yoğunluğu 2.70 g/cm ³ b) Gaz porozitesi bulunan ve yoğunluğu 2.58 g/cm ³ olan Al döküm parçaları.	25
Şekil 2.17. Statik lanslı ve dağıtıcılı veya dönen şaftlı/rotorlu gaz giderme işlemi ve şematize resmi.	25
Şekil 2.18. Alpur® gaz giderme cihazı ve sıvı metal ve rotor yüzeyinde biriken hidrojen gazı.	26
Şekil 2.19. Derin Yatak Filtreleme Ünitesi (DBF) ve içerisinde bulunan alümina toplar.	27
Şekil 2.20. Seramik Köpük Filtre (CFF).	27
Şekil 2.21. Haddeleme prosesinin şematize edilmiş resmi.	32
Şekil 2.22. Toparlanma ve yeniden kristalleşmenin tane yapısına etkisinin şematize gösterimi.	34
Şekil 3.1. 5-7 mm aralığında farklı shell malzemeleri ile üretilen döküm numuneleri.	35
Şekil 3.2. Delta marka laboratuvar ölçekli hadde makinesi.	37
Şekil 3.3. Nabertherm marka laboratuvar tav fırınları.	37
Şekil 3.4. Yapılan çalışmalarda uygulanan proseslerin rota akış şemaları.	38
Şekil 3.5. Struers marka elektrolitik dağlama cihazı.	39
Şekil 3.6. Zeiss marka optik mikroskop.	39
Şekil 3.7. ZEISS marka SEM cihazı.	40
Şekil 3.8. Zwick/Roell test cihazı a) çekme testi b) Erichsen testi.	40
Şekil 3.9. Future-tech Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı.	41
Şekil 3.10. Fischer marka iletkenlik ölçüm cihazı.	41
Şekil 3.11. Uygulanan frekansa göre yüzeyden nüfuziyet derinliği grafiği.	42

Şekil 4.1. Mikroyapı görüntülemesinde döküm ya da haddeleme yönüne göre numune hazırlama yönleri.....	44
Şekil 4.2. Çelik / Çelik shell ile dökülen mikroyapı görüntüleri a) T yönü BF görüntüsü b) T yönü polarize görüntüsü c) L yönü BF görüntüsü d) L yönü polarize görüntüsü.....	44
Şekil 4.3. Çelik / Bakır shell ile dökülen mikroyapı görüntüleri a) T yönü BF görüntüsü b) T yönü polarize görüntüsü c) L yönü BF görüntüsü d) L yönü polarize görüntüsü.....	45
Şekil 4.4. Dökme alüminyum levhaların farklı shell ile temas eden yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış polarize görüntüleri a) çelik shell b) bakır shell.....	46
Şekil 4.5. a) Çelik/çelik shell b) Çelik/bakır shell L yönünden BF görüntüleri ve MHS konumları.....	47
Şekil 4.6. Çelik/çelik shell çifti ile üretilen döküm numunesinde MHS'dan alınan SEM görüntüsü ve alan taramaları.....	49
Şekil 4.7. Alan taraması 1'e ait EDS grafiği (Çelik/çelik shell çifti).....	49
Şekil 4.8. Alan taraması 2'ye ait EDS grafiği (Çelik/çelik shell çifti).....	49
Şekil 4.9. Çelik/bakır shell çifti ile üretilen döküm numunesinde MHS'dan alınan SEM görüntüsü ve alan taramaları.....	50
Şekil 4.10. Alan taraması 1'e ait EDS grafiği (Çelik/bakır shell çifti).....	50
Şekil 4.11. Alan taraması 1'e ait EDS grafiği (Çelik/bakır shell çifti).....	51
Şekil 4.12. Hem çelik/çelik hem de çelik/bakır shell ile dökülen numunelerin ara tav öncesi-sonrası polarize mikroyapı görüntüleri.....	52
Şekil 4.13. Tavlama sıcaklığının sertlik, mukavemet ve süneklik üzerine etkisi.....	55
Şekil 4.14. Erichsen test düzeneği ve test uygulanmış numune örnek görselleri.....	56
Şekil 4.15. Proseslere ait Erichsen test sonuçları grafiği.....	57
Şekil 4.16. Her iki shell numunelerinden L yönünde kesit boyunca alınan sertlik ölçümleri grafiği.....	58
Şekil 4.17. Çelik/çelik ve çelik/bakır shell numunelerinin kıyaslamaları elektriksel iletkenlik grafikleri.....	60

İKİZ MERDANELİ DÖKÜM YÖNTEMİNDE BAKIR VE ÇELİK SHELL İLE ÜRETİLEN 5005 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA ÜRETİM PARAMETRELERİNİN, MEKANİK ÖZELLİKLERİN VE MİKROYAPILARIN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışma, yassı mamül üretim yöntemlerinden biri olan ikiz merdaneli döküm yönteminde katılaşmanın meydana geldiği merdaneler üzerine gerçekleştirilmiştir. Katılaşmanın meydana geldiği merdaneler kor ve shell olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır ve kor ile shell arasında dolaşan su ile de shell malzemesi soğutulmaktadır. Shell ile kor malzemesi birbirine sıkı geçme yöntemiyle geçirilmektedir. Döküm merdaneler katılaşma esnasında yüksek yüklere ve termal çevrime maruz kaldığından sıklıkla shell malzemesi olarak alaşımlı dövme çelik kullanılmaktadır. Bakır elementinin çeliğe nazaran ısı iletkenlik katsayısı çok daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu nedenle hem katılaşmanın hızlı gerçekleşmesi hemde produktivite artışı gibi malzeme ve üretimi etkileyen önemli faktörlerden ötürü çelik shell yerine bakır shell malzemesi de endüstriyel olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, alaşımlı çelik/çelik shell yerine, çelik/bakır shell çifti kullanılmıştır. İkiz merdaneli döküm yönteminde asıl ilk katılaşmanın başladığı alt merdane olmasından mütevellit, berilyum alaşımlı dövme bakır shell burada kullanılmıştır. Üst merdanede ise alaşımlı standart çelik shell kullanılmıştır. Çelik/Bakır shell çiftinin, çelik/çelik shell çiftine nazaran, magnezyum açısından zengin olan ve neredeyse her sektörde sıklıkla tercih sebebi olan 5005 alüminyum alaşımı üretimindeki parametreler, mikroyapılar ve mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır.

Bu araştırmada, 8 farklı proses rotası belirlenmiştir. Bu 8 farklı rotadaki hem numunenin ayrı ayrı ölçümleri gerçekleştirilmiş ve sonuçları irdelenmiştir. Öncelikle, ikiz merdaneli döküm yöntemi ile hem çelik/çelik hem de çelik/bakır shell ile 5-7mm kalınlık aralığında üretilen levhalardan tam boy numuneler alınmıştır. Alınan döküm kalınlığındaki numuneler, laboratuvar ölçekli haddeleme makinasına koyularak, %82 deformasyon oranıyla soğuk haddelemeye tabii tutulmuştur. Ardından ara tav yapılmak üzere laboratuvar ölçekli tav fırınlarına 4'er saat olacak şekilde 4 farklı sıcaklıkta (330, 350, 370 ve 390°C) koyularak ısı işleme tabii tutulmuştur. Ara tav sonrasında her numune tekrar %50 deformasyon oranıyla soğuk haddelenerek nihai kalınlıklarına indirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, mikroyapı analizlerinde optik mikroskop ve SEM cihazları kullanılmıştır. Mekanik özelliklerin analizlerinde, çekme test cihazı, Erichsen çökertme test cihazı ve mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bunlara ek olarak elektriksel iletkenlik ölçümü de yapılmıştır.

Çıkan sonuçlara göre, üretim parametrelerinin bir çıktısı olan verimlilik t/h/m cinsinden kıyaslandığında, St/Cu shell çifti tarafında yaklaşık % 40 – 60 produktivite artışı yakalanmıştır. Döküm kalınlığındaki mikroyapı incelemesinde, shell ile temas eden yüzeylerde bulunan tane yapılarında ciddi oranda fark olduğu tespit edilmiştir. Bakır shell ile temas eden yüzey, çelik shell ile temas eden yüzeye kıyasla daha iri

taneli bir yapıda olduğu görülmüştür. BF görüntülerinde inklüzyonların bakır shell tarafında ciddi oranda azaldığı ve MHS'nin 0.503 mm kadar çelik shell tarafına ötelendiği görülmüştür. Bakırın termal iletkenliği çeliğe nazaran yüksek olmasından ötürü hızlı katılaşma sağlanarak aşırı doymuş bir matris yapısı elde edilmiştir. Döküm esnasında uygulanan yüke ve sıcaklığın etkisiyle kısmi dinamik rekristalize olan bakır shell tarafında tane büyümesi yaşanmıştır. SEM EDS analizlerinde de intermetaliklerin azaltılmış ve matrisin aşırı doyurulmuş olduğu kanıtlanmıştır.

Farklı sıcaklıklarda 4'er saat uygulanan ara tav işlemlerinde ise, döküm esnasında gerçekleşen kısmi dinamik rekristalizasyondan ötürü daha düşük ara tav sıcaklığında rekristalize olunabileceği gözükmemektedir. Mekanik özellikler incelendiğinde de, Vickers cinsinden alınan mikrosertlik ölçümlerinde yaklaşık %30'luk bir artış gerçekleşmiştir. Çekme ve Erichsen test sonuçları da çelik/bakır shell çiftinin mekanik özelliklere olan etkisinin üstünlüğünü doğrulamaktadır. Elektriksel iletkenlik ölçümleri de matrisin aşırı doymuş olduğunu kanıtlar nitelikte sonuçlar vermiştir.

Bakır shell, kısa kullanım ömrü dezavantajının yanı sıra; yüksek verimlilik, yüksek hat hızı, düşük tav sıcaklığı vb. gibi birçok avantajlar sağlamakta ve endüstriyel olarak TRC döküm yönteminde başarılı bir şekilde kullanılabilir.

THE INVESTIGATION OF PRODUCTION PARAMETERS, MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURES OF 5005 ALUMINUM ALLOYS PRODUCED BY STEEL/COPPER AND STEEL/STEEL SHELL PAIRS IN TWIN ROLL CASTING METHOD

SUMMARY

This study was carried out on the rollers where solidification occurs in the twin-roll casting method, which is one of the flat product production methods. Flat product production can be carried out by 2 different casting methods. One of these is the twin roll casting method and the other is the direct cooled casting method. In the direct cooled casting method, the products cast as slabs must be reduced to a thickness of 8-10 mm before cold rolling. Therefore, the hot rolling process and many equipment in this process are needed. In the twin-roll casting method, it is frequently preferred industrially, as material with a thickness that can be directly cold rolled is cast. In the twin-roll casting method, the rollers where solidification occurs consist of two components: core and shell. Pure water circulating in closed circulation in the copper pipes between the core and the shell is kept within the specified temperature range in the cooling tower, ensuring continuous solidification on the roller. The shell and the core material are connected to each other using a tight fitting method. Since cast rolls are exposed to high loads and thermal cycles during solidification, alloy forged steel is frequently used as a shell material in the industry. It is known that the copper element has a much higher thermal conductivity coefficient than steel. For this reason, copper shell material is used industrially instead of steel shell due to important factors affecting material and production such as rapid solidification and increased productivity. In this thesis study, steel/copper shell pair was used instead of alloy steel/steel shell. In the twin-roll casting method, beryllium alloy forged copper shell is used here, as it is the lower roll where the first solidification begins. Alloy standard steel shell is used in the upper roller. The effect of the steel/copper shell pair on the parameters, microstructures and mechanical properties in the production of 5005 aluminum alloy, which is rich in magnesium and is frequently preferred in almost every sector, compared to the steel/steel shell pair, was investigated.

Within the scope of this study, optical microscope and SEM devices were used in microstructural analysis. In the analysis of mechanical properties, tensile tester, Erichsen collapse tester and microhardness measurement device were used. In addition, electrical conductivity measurements were also made.

According to the results, when the productivity is compared in t/h/m, which is an output of the production parameters, an approximately 40 - 60% productivity increase was achieved on the St/Cu shell pair side. One of the parameters used in calculating productivity is line speed. In production with copper shell, line speed increased by 1.5 times compared to steel shell. The amount of graphite spray running parallel to the line speed increased by 1.5 times at the same rate. Similarly, the cycle time of one full

rotation of the rollers around their own axis was completed approximately 50% faster in production with copper shell. Since band marks are not visible on the surface and its strength is lower than steel, roller pressures are kept approximately 8-10% lower. The service life of the steel shell, which is 1200 tons, was measured as 400 tons on the copper shell side. This shows an approximately 66% reduction in lifespan. In the microstructure examination of the casting thickness, it was determined that there was a significant difference in the grain structures on the surfaces in contact with the shell. It has been observed that the surface in contact with the copper shell has a coarser grained structure compared to the surface in contact with the steel shell. The event known as the Zener Drag phenomenon occurred and a supersaturated matrix was obtained with rapid solidification and partial dynamic recrystallization took place with the effect of some rolling. In the BF images, it was seen that the inclusions decreased significantly on the copper shell side and the MHS was shifted to the steel shell side by 0.503 mm. Since the thermal conductivity of copper is higher than steel, a supersaturated matrix structure is obtained by rapid solidification. Grain growth occurred on the partially dynamic recrystallized copper shell side due to the effect of the load and temperature applied during casting. SEM EDS analyzes also proved that intermetallics were reduced, dispersed in the matrix, and the matrix was oversaturated.

In 8 different processes, 1,2,3 and 4 represent samples produced with St/St shell, and 5,6,7 and 8 represent samples produced with St/Cu shell. Processes 1 and 5 were annealed at 330°C, 2 and 6 at 350°C, 3 and 7 at 370°C and finally 4 and 8 at 390°C for 4 hours. In the intermediate annealing processes applied for 4 hours at different temperatures, it seems that recrystallization can be achieved at a lower intermediate annealing temperature due to the partial dynamic recrystallization that occurs during casting. When the microstructures taken with an optical microscope were examined, it was seen that the structure produced with St/St shell and annealed at 370°C was very similar to the structure produced with St/Cu shell and annealed at 350°C. When the mechanical properties were examined, there was an increase of approximately 30% in the microhardness measurements taken in Vickers in the as-cast samples. Tensile and Erichsen test results also confirm the superiority of the effect of the steel/copper shell couple on mechanical properties. In addition, it has been confirmed that there is a gain in the intermediate annealing temperature on the copper shell side, since the values of the previously mentioned processes 3 and 5 are close to the intermediate annealing application. Electrical conductivity measurements also gave results proving that the matrix was oversaturated. In addition, when the results of intermediate annealed samples in conductivity tests were examined, it was seen that samples produced with copper shell gave higher conductivity results compared to those produced with steel shell. This led to the conclusion that the event known as the Zener Drag phenomenon experienced during the casting process triggered the precipitation potential after intermediate annealing. In addition, it can be shown as evidence that dispersion occurs.

As a result, copper shell has the disadvantage of short lifespan; high productivity, high line speed, low annealing temperature etc. It provides many advantages such as and can be used successfully in industrial TRC casting method. It supports process and energy efficiency by slightly reducing the intermediate annealing temperature. In addition, it is anticipated that it will provide many industrial advantages in terms of the strength and electrical conductivity properties it brings to the structure through partial dynamic recrystallization and dispersion. It has become a method that can turn

the cost incurred due to its short lifespan into an advantage with its more efficient and high tonnage production capacity in a short time.





1. GİRİŞ

Alüminyum, kendine has birçok avantaj barındırması itibariyle her geçen gün kullanım alanını ve tüketim miktarını arttırmaktadır. Spesifik mukavemet, hafiflik, oldukça iyi ısı ve elektriksel iletkenlik ve korozyon dayanımı alüminyumı oldukça rekabetçi kılmaktadır.

Alüminyum yassı mamuller, oldukça farklı sektörlerde uzun yıllardır kullanım tercihi olmuştur. Ambalaj, otomotiv, ısıtma-soğutma, mimari yapılar vb. gibi sektörlerde alüminyum yassı mamuller yaygın olarak kullanılmaktadır. Tercih edilmesinin başlıca sebeplerinden birisi de pres ile rahatlıkla şekillendirilebilmesidir. Otomotivde ısı kalkanları, gıda sanayiinde yemek kapları ve dekoratif ürünlerde ise mum kapları olarak kullanım alanları mevcuttur.

Alüminyum levhalar, ikiz merdaneli döküm yöntemi (Twin, roll casting, TRC) ile üretilmektedir. İkiz merdaneli döküm yöntemi (TRC), sıvı metalin su soğutmalı iki merdane arasına seramik tip vasıtasıyla beslenmesi neticesinde oluşan ara yüzeyden ısının soğurularak katılaşma sağlanması prensibine dayanmaktadır. Ardından soğuk haddelenerek ve dilme/boy kesme işlemleri uygulanarak tavlı/tavsız şekilde nihai şeklini almaktadır. İkiz merdaneli döküm yönteminde 2 adet ana merdane ve bunlara sıkı geçme şekilde monte edilen 2 adet merdane kabuğu (shell) kullanılmaktadır. Endüstriyel olarak sıklıkla alaşımlı çelik shell ile üretim yapılmaktadır.

Çelik shell ile üretime alternatif olarak, alaşımlı bakır shell kullanılabilir. Bu tez çalışmasında 5005 alaşım özelinde çelik/bakır shell kombinasyonu ile alüminyum levha üretiminde hızlı katılaşma sağlanarak üretim parametrelerinin iyileştirilmesi, hızlı katılaşmaya bağlı olarak eş eksenli ve ince tane boyutunun elde edilmesi, merkez hattı segregasyonunun azaltılması ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Alüminyumun Tarihçesi

Alüminyum, ilk kez 1807 yılında Sir Humprey Davy tarafından oksit bileşiğinden ayrıştırılmış ve elde edilmiştir [1]. 1886 yılında Charles Martin Hall ve Paul T. Heroult'un birbirlerinden haberleri olmaksızın yaptıkları elektroliz tekniğinin başlamasıyla birlikte alüminyum üretimi dünyada yıllık 13 ton'dan 64 milyon tonun üzerine çıkmıştır. Böylelikle alüminyum, dünyada demir – çelik sektöründen sonra en yaygın metal olarak ikinci sırada yerini almıştır [2]. Alüminyum, hafiflik, iyi işlenebilirlik, iyi iletkenlik, korozyon direnci ve mukavemet avantajları dolayısıyla diğer metallere nazaran birçok alanda tercih sebebi olan bir metal haline gelmiştir. Saf olarak kullanılmasının yanı sıra çeşitli özellikler kazandırmak amacıyla alaşımlandırılarak da kullanılabilir [3].

Birincil alüminyum üretimi oldukça yeni bir endüstridir. Yaklaşık 150 yıllık bir geçmişe sahiptir. Alüminyum tüketimine yönelik olan bu güçlü talep, günümüze dek her on yılda bir ikiye katlanarak üretim kapasitelerinin genişlemesine katkıda bulunmuştur. Birinci Dünya Savaşı alüminyum üretimini ciddi ölçüde arttırma eğilimine sokmuş ve 1914 – 1919 yılları arasında alüminyum üretimi yılda 70.800 tondan 132.500 tona yükseltmiştir. Sivil üretime geçiş evresi sonrasında, gerçekleşen bu dramatik kapasite artışı sanayiinin normal taleplerine cevap verebilecek şekilde devam etmiştir. İkinci Dünya Savaşı ise bu ölçeğin daha da büyümesine katkıda bulunmuştur. 1939'da 704.000 tondan 1943'te 1.950.000 tona artmış, ardından alüminyum talebinin sürekli olduğuna ve yeni sivil pazarların varlığına ihtiyaç duyulduğu kanaatine varılmıştır. Alüminyumun hafif, mukavemetli ve korozyona dayanımının yüksek olması gibi özellikleri itibarıyla 1950 – 1970'ler süresince araştırma ve ürün geliştirme faaliyetleri hız kazanmıştır. Dünya üretim tonajı artması sebebiyle, hammadde bakımından zengin ülkeler ve özellikle ucuz enerji kaynaklarını barındıran ülkeler, diğer ülkelerin süreci ilerletebilmesi amacıyla birincil alüminyum

üretimi ile pazara giriş yapmışlardır. Şekil 2.1’de 1973 senesine ait dünyada gerçekleşen birincil alüminyum üretiminin ülkelere göre milyon ton cinsinden dağılımı verilmiştir [4]. Günümüzde alüminyumun kayda değer bir miktarı bu şekilde pazarlanmaktadır [5].

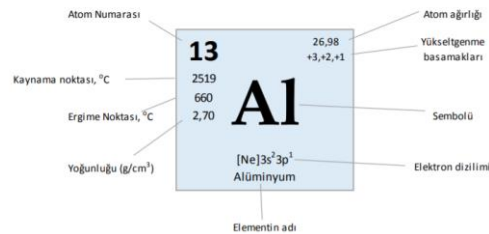


Şekil 2.1. 1973 yılında Dünyadaki Alüminyum üretiminin ülkelere göre dağılımı [4].

2.2. Alüminyumun Özellikleri

Alüminyum, yerkabuğunun yaklaşık %8,2’sini oluşturmaktadır. Böylece doğada en yaygın olarak ihtiva olan metaller listesinde ilk sıralarda gelmektedir. Oksijene bulunan afinitesi itibariyle yer kürede hiçbir zaman saf halde bulunmamaktadır. Potasyum alüminyum sülfat, sodyum alüminyum silikat veya alüminyum silikatlar olarak doğada bulunabilmektedir.

Saf alüminyum, hafif mavimsi beyaz renktedir. “Al” ile sembolize edilmektedir. Atomik ağırlığı 26,981 g/mol’dür [1]. Alüminyumun başlıca özellikleri Şekil 2.2’de verilmiştir.

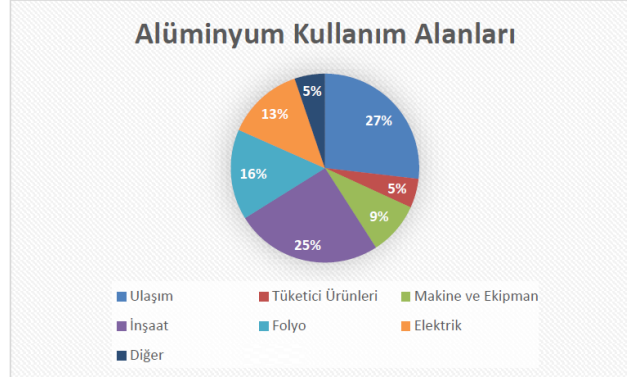


Şekil 2.2. Alüminyumun genel özellikleri [6].

Alüminyum, spesifik mukavemeti yüksek olması ve fonksiyonel bir metal olması sebebiyle çağımızın en kritik mühendislik malzemelerinden birisi olmuştur. Evlerde, ulaşım araçlarında ve elektronik cihazlarda, kablo tesisatlarında, dolap/raf/tezgahlarda, mutfak araç gereçlerinde iç ve dış tasarımlarda, gıda, sağlık ve kimya gibi çok çeşitli sektörlerde kullanım alanı bulunmaktadır. Bina çatı ve cephe kaplamalarında, kapı, pencere ve merdiven uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca sahip olduğu dekoratif görünümü itibariyle mimarlık uygulamalarında da sıkça tercih sebebi olmaktadır. Alüminyum, ince folyo kalınlıklarında üretimi yapılabilmesi, homojen yapısı, hava geçirgen yapıda olmayışı ve kolaylıkla form verilebilmesinden ötürü ambalaj sektöründe de vazgeçilmez mühendislik malzemelerinden birisi olmuştur. Dünyadaki içecek kutularının yaklaşık %80'i alüminyumdan imal edilmektedir. İkincil alüminyum üretimi esnasında hurda ihtiyacının yaklaşık %30 – 55'i bu içecek kutularından elde edilmektedir. Ayrıca hafiflik spesifikasyonu sebebiyle, ulaşım sektöründe de daha az yakıt tüketimi ve daha az emisyon salınımı sağlamak ve tercih sebebi olmaktadır. Özellikle ağır vasıta olarak tabir edilen taşıtlarda alüminyumun ağırlıklı olarak kullanılması, ciddi bir yakıt tasarrufu avantajını beraberinde getirmektedir. Hafiflik kadar mukavemetli bir yapıya sahip olmasından ötürü uçak, tekne, vapur vb. ulaşım araçlarının imalatında da kullanım alanı bulmuştur. Yüksek iletken yapısı sayesinde elektrik – elektronik endüstrisinde de hayati bir öneme sahiptir. Yüksek voltajlı elektrik nakil hatlarında, yeraltı kablolarında, elektrik borularında, motor bobin sarımlarında, şase, yonga, transistör soğutucularında ve kayıt disklerinde sıkça kullanılmaktadır. Alüminyumun kullanım alanları Tablo 2.1 ve Şekil 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Alüminyumun kullanım alanları.

Sektör	Kullanım Yeri
Otomotiv	Radyatör, Motor Parçaları, Kaporta
Havacılık	Yapı Elemanları, Uçak Gövdesi
Raylı Sistemler / Denizcilik	Yük ve Yolcu Vagonları, Tekne Gövdesi
İnşaat	Dış Cephe Kaplama, Çatı Sistemleri
Ambalaj	İçecek Kutuları, Konserve Kutuları, Aerosol Kutuları, Folyo, Kapak (Lid)
Elektrik – Elektronik	Bara, İletkenler, Transformör, Kablo



Şekil 2.3. Alüminyumun kullanım alanları pasta dilimi grafiği [4].

2.3. Alüminyum Alaşımları

Dövme ve döküm alaşımları olarak 2 ana gruba ayrılmaktadır. Her iki grup da kendi aralarında ısıtıl işlem uygulanabilen ve ısıtıl işlem uygulanamayan olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Isıtıl işlemler esnasında faz çözünürlüklerinin getirisi olan özelliklerden yararlanılmaktadır. Sırası ile çözeltiye alma, su verme ve çökelme ya da yaşlandırma sertleştirme adımlarını içermektedir. Isıtıl işlem uygulanamayan alaşımlarda ise deformasyon sertleşmesi ya da tavlama ile sertlik elde edilebilmektedir [7]. Tablo 2.2’de alüminyum alaşımlarının bazı özellik aralıkları verilmiştir [8].

Tablo 2.2. Alüminyum alaşımlarının bazı özellik aralıkları [8].

Özellik	Değer Aralığı
Akma Mukavemeti (MPa)	20 - 455
Çekme Mukavemeti (MPa)	70 - 505
Uzama Değeri (%)	1 - 30
Sertlik Değeri (HBW)	30 - 150
Elektrik İletkenlik (%IACS)	18 - 60
Isıl İletkenlik (W/m · K at 25 °C)	85 - 175
Lineer Termal Genleşme Katsayısı (20–100 °C)	(17,6–24,7) x10–6/°C
Özgül Ağırlık (g/cm3)	2,57 – 2,95

Dünya genelinde alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında kullanılan çeşitli standartlar mevcuttur. En yaygın olarak kullanılan standart Alüminyum Birliği’nin (AA: Aluminium Association)’dır. Bunun haricinde DIN, ASTM ve Fransız Standartları da bulunmaktadır.

Isıl işlem uygulanarak yaşlandırma ile mukavemet artışı elde edilmektedir. Orta mukavemet sınıfında kaynaklanabilir özellikteki alaşımlar ve yüksek mukavemet sınıfında genellikle havacılık ve otomotiv sanayiinde kullanılabilen alaşımlar olmak üzere iki ayrı grupta incelenmektedir. Tablo 2.3’de alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması ve ısıtıl işlem uygulanabilirliği verilmiştir [9].

Tablo 2.3. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması ve ısıtıl işlem uygulanabilirliği [9].

Alaşım Tipi	Alaşım Kodu	Alaşım Tanımı	Isıl İşlem Uygulanabilirliği
Dövme	1XXX	Ticari saflıkta Al (>%99 Al)	Yaşlandırılmaz
Dövme	2XXX	Al – Cu	Yaşlandırılabilir
Dövme	3XXX	Al – Mn	Yaşlandırılmaz
Dövme	4XXX	Al – Si veya Al – Mg – Si	Mg varsa yaşlandırılabilir
Dövme	5XXX	Al – Mg	Yaşlandırılmaz
Dövme	6XXX	Al – Mg - Si	Yaşlandırılabilir
Dövme	7XXX	Al – Zn - Mg	Yaşlandırılabilir
Dövme	8XXX	Al – Diğer alaşım elementleri	Yaşlandırılmaz
Dövme	9XXX	Al - Li	Yaşlandırılmaz
Döküm	1XX.X	Ticari saflıkta Al (>%99)	Yaşlandırılmaz
Döküm	2XX.X	Al - Cu	Yaşlandırılabilir
Döküm	3XX.X	Al - Si - Cu veya Al - Mg - Si	Yaşlandırılabilir
Döküm	4XX.X	Al – Si	Yaşlandırılmaz
Döküm	5XX.X	Al – Mg	Yaşlandırılmaz
Döküm	6XX.X	Al – Mg – Si	Yaşlandırılabilir
Döküm	7XX.X	Al – Zn – Mg	Yaşlandırılabilir
Döküm	8XX.X	Al – Sn	Yaşlandırılabilir
Döküm	9XX.X	Al – Diğer alaşım elementleri	Yaşlandırılmaz

Mukavemetin artırılabilir olması alaşımın ısıtıl işlem görebilir veya pekleşebilir olma özelliklerine göre T ve H ile simgelenmektedir. Alaşımın tavlanmış olduğunu O, çözündürmeye tabi tutulduğunu W, üretildiği şekilde kullanıldığı F ile simgelendirilmiştir. T ve H ile birlikte verilen numaralar pekleşme miktarını, gerçek ısıtıl işlem türünü veya alaşımın diğer özel üretimlerden birine tabi tutulduğunu göstermektedir [10]. Kondisyon kısaltmaları ve açıklamaları Tablo 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2.4. Alüminyum alaşımlarının kondisyon kısaltmaları ve açıklamaları [11-13].

Kısaltma	Açıklama
F	İmal edildiği şekilde
O	Tavlanmış (En yüksek süneklik, en düşük dayanım)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1X	Sadece soğuk şekillendirilmiş (x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder.)
H12	Soğuk şekillendirme, 0 ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H14	Soğuk şekillendirme, 0 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
H16	Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H18	Soğuk şekillendirme
H19	Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlar
H2X	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış
H3X	Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş
W	Çözelti ısıtma işlemi görmüş
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T4	Çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T5	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış
T6	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırılmış
T7	Çözeltiye alınmış ve aşırı yaşlanma ile kararlı hale getirilmiş
T8	Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş
T10	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
T351	Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş ve doğal yaşlandırılmış. Hadde ürünleri uygulamaları için geçerlidir.
T3510	T351 için uygulanan işlemler. Ekstrüzyonla üretilmiş boru, çubuk vb. profilleri için.
T352	Çözeltiye alınmış, sıkıştırma ile gerilim giderilmiş ve doğal yaşlandırılmış.
T651	Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış. Levhalar için geçerlidir
T6510	T651 için uygulanan işlemler. Ekstrüzyonla üretilmiş boru, çubuk vb. profilleri için geçerlidir
T73	Çözeltiye alma ve korozyon dayanımını arttırmak için aşırı yapay yaşlandırma uygulanmış
T7651	Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş ve korozyon dayanımını arttırmak için yapay olarak yaşlandırılmış. Levhalar için geçerlidir.
T76510	T7651 için uygulanan işlemler Ekstrüzyonla üretilmiş boru, çubuk vb. profilleri için geçerlidir.

2.4. Alaşım Elementlerinin Alüminyum Alaşımlarına Etkisi

2.4.1. Bakır (Cu)

Sıklıkla alüminyum döküm alaşımları bakır ve silisyum ihtiva etmektedir. Bakırın, alüminyum alaşımlarında işlenebilirlik ve mukavemete olumlu yönde etkisi bulunmaktadır. İyi bir iletken olması sebebiyle elektriksel iletkenliği arttırmaktadır. Buna rağmen korozyon direncini düşürmektedir [11].

2.4.2. Silisyum (Si)

Alüminyum alaşımlarına mükemmel akışkanlıkta dökülebilde kabiliyeti sağlayan element silisyumdur. Düşük mukavemet ve zayıf işlenebilirlik dezavantajının yanında, mükemmel aşınma direnci ve çok iyi süneklik avantajı kazandırmaktadır.

2.4.3. Magnezyum (Mg)

Oldukça hafif bir metal olan magnezyum, toplam ürün ağırlığının azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. Birim hacim başına alüminyuma nazaran %36, demire nazaran %78 daha hafiftir [12].

Al – Mg alaşımları genellikle endüstriyel olarak %8 oranında Mg içermekte ve ısıt işlemler ile sertleştirmeye izin vermemektedir. Mekanik özelliklere değişken oranda etkisi, yüksek korozyon direnci, kaynaklanabilirlik özelliğini arttırması, düşük yoğunluk ve maliyet bakımından yaygın olarak kullanılmaktadır [11].

2.4.4. Titanyum (Ti)

Alüminyum alaşımlarında sıklıkla tane inceltici olarak kullanılmaktadır. En yaygın alaşımı AlTi5B'dir [11].

Titanyum ve Bor elementleri, alüminyum alaşımlarına %0,01 civarında çok az miktarda ilave edilmektedir. Döküm esnasında daha iyi bir beslenebilirlik ve daha porsuz bir yapıya sahip olmaktadır. Daha az segregasyon olma durumu, yüksek mukavemet ve sızdırmazlık direnci gibi özellikler bakımından katkıda bulunmaktadır. TiB₂ iyi heterojen çekirdekleyici özelliği sayesinde sıvı alüminyum içerisinde neredeyse hiç çözünmeyerek düşük oranda ilave edildiğinde dahi tane inceltebilmektedir.

2.4.5. Krom (Cr)

Alüminyum alaşımlarına çok az oranda ilave edilmektedir. Sıklıkla $CrAl_7$ bileşiğini oluşturmaktadır. Tane büyümesini önleyici etkisi bulunmaktadır [11].

2.4.6. Mangan (Mn)

Alüminyum dökümde genellikle Fe ile birlikte kullanılmaktadır. Mukavemeti düşürerek, süneklik ve tokluk gibi özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır [16, 17].

2.4.7. Nikel (Ni)

Alüminyum alaşımlarına yüksek korozyon direncini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca yüzey parlaklığı kazandırmaktadır. Nikel ve bakır ile kombinasyon yapıldığında kullanım sıcaklığını arttırmaktadır. Alüminyum içerisinde ısıl genleşme katsayısını da azaltmaktadır.

2.4.8. Çinko (Zn)

Alüminyum alaşımlarında mukavemeti ve işlenebilirlik özelliğine katkıda bulunmaktadır. Dökülebilirliği azaltmakta iken, yüksek miktarda çinko ise sıcak çatlama ve yırtılmalara ya da soğuma çekmesine sebep olmaktadır. Az miktarda bakır ilavesi ile bu yırtılmalar engellenebilmektedir [13].

2.5. Birincil Alüminyum Üretimi

Yerkürede %8,23 oranında bileşik halinde bulunan ve günümüzün en önemli metallerinden birisi olan alüminyum, 20. Yüzyıl sonu – 21. yüzyıl başlangıcında dramatik bir artış göstermiştir. Alüminyum üretimi iki aşamada gerçekleşmektedir.

Alüminyum, oksijene olan yoğun afinitesinden ötürü doğada saf olarak bulunmamakta oksitli yapıda ve safsızlıklar ihtiva edecek şekilde bileşik halde bulunmaktadır. Alüminyum eldesi, boksit cevherinden sağlanmaktadır. Dünya üzerinde boksit cevheri bakımından zengin ülkeler Avustralya, Jamaika, Gine, Çin ve Rusya olarak belirtilmektedir.

Boksitin üç önemli minerali bulunmaktadır. Bunlar;

- a) Böhmit

b) Hidraglit

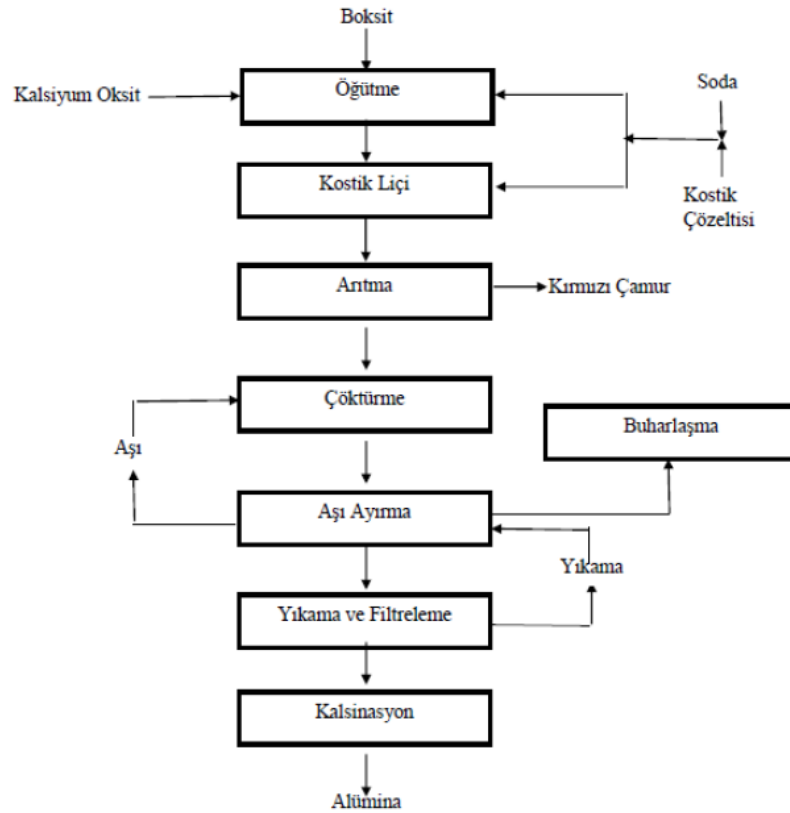
c) Diasporit'tir.

Bayer Prosesi ve Hall – Herault Prosesi olmak üzere iki aşamalı olarak üretilen alüminyum, birincil (primer) alüminyum olarak bilinmektedir [14]. İlk olarak boksit cevherinden Bayer Prosesi ile alümina elde edilir ve ardından Hall – Herault Prosesi uygulanır.

2.5.1. Bayer prosesi

Günümüzde alüminyum oksitin (alumina) eldesinde en kritik ve en yüksek tonaja sahip üretim prosesi olan Bayer Prosesi, üç aşamada gerçekleştirilmektedir;

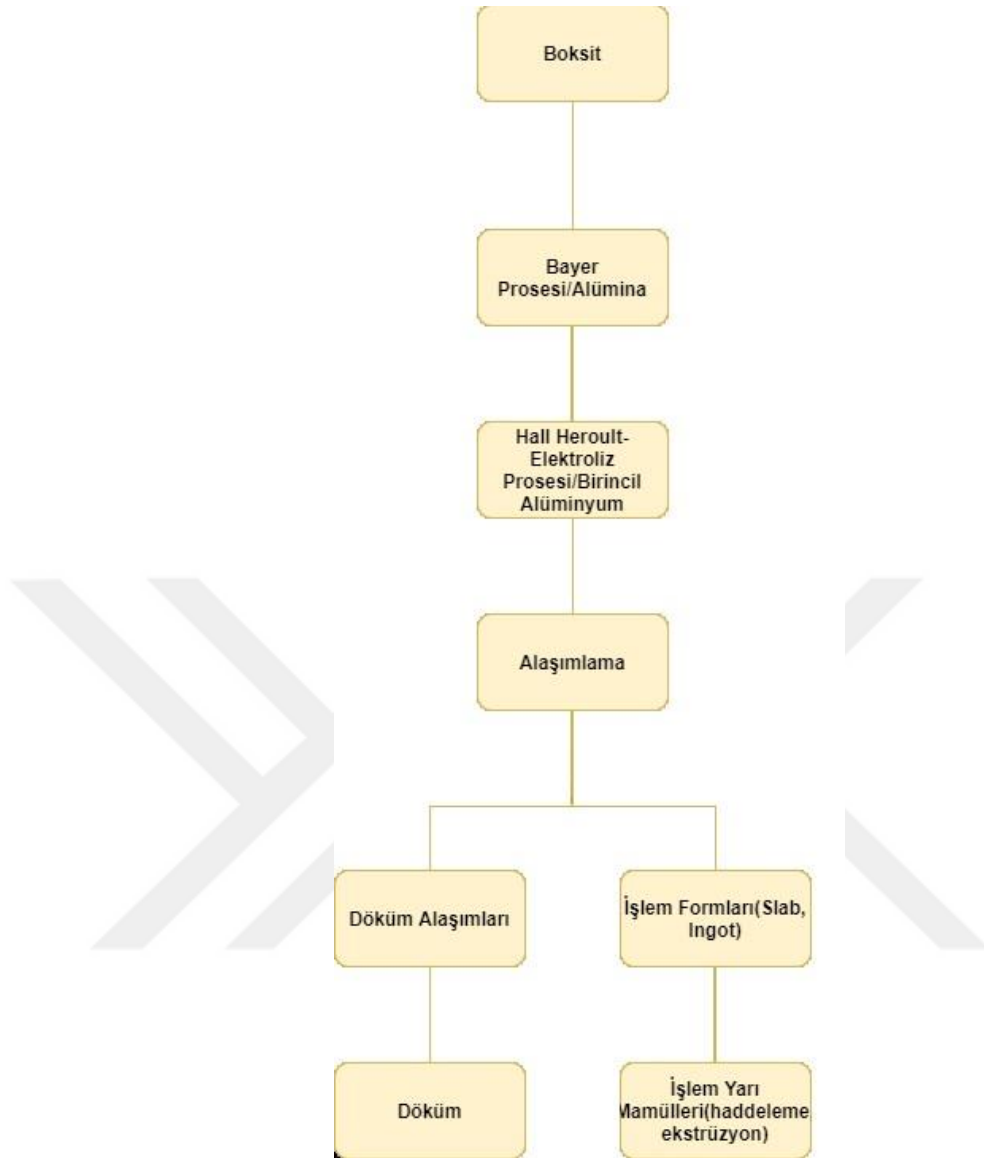
1. Boksit cevherinin liç edilmesi ve kırmızı çamurun ayrıştırılması
2. Alüminyum hidroksitin çöktürülmesi
3. Alüminyum hidroksitin kalsine edilmesi ve α - Al_2O_3 üretimidir.



Şekil 2.4. Bayer Prosesi akış şeması [15].

Öncelikle iyice öğütülerek ince bir tane yapısına getirilen boksit cevheri, ardından otoklav adı verilen tanklara şarj edilir ve yüksek basınç altında işleme alınır. Otoklav tankları, 140 – 250 °C sıcaklıktadır ve NaOH içermektedir. NaOH ile liç edilen boksit cevherinde ihtiva olan alüminyum oksitin çözülerek diğer empüritelerden ayrışması sağlanmaktadır. Çökelen diğer fazlardan birisi ise hematit adı verilen demir oksit bileşiğidir. Çökelen çamura kırmızı renk vermesinden ötürü adı kırmızı çamur (red mud) olarak geçmektedir [16].

Sodyum alüminat çözeltisi elde edilir ve sonrasında yıkanarak alüminyumhidrat ile aşılama yapılır. Filtreden geçirilen alüminahidrat katıları, alümina elde edilmesi amacıyla kalsinasyon işlemine tabi tutulur. Kalsinasyon işlemi, 1200 – 1300 °C civarındaki reverber fırınlarda gerçekleştirilir ve alüminaya bağlı hidrati ayrıştırmak amacıyla proses edilir. Birincil alüminyum üretiminde kullanılmak üzere kalsinasyon işlemi sonrasında elde edilen alümina, elektroliz işlemine tabii tutulur. Akış şeması Şekil 2.4 ve 2.5’de gösterilmiştir [17].



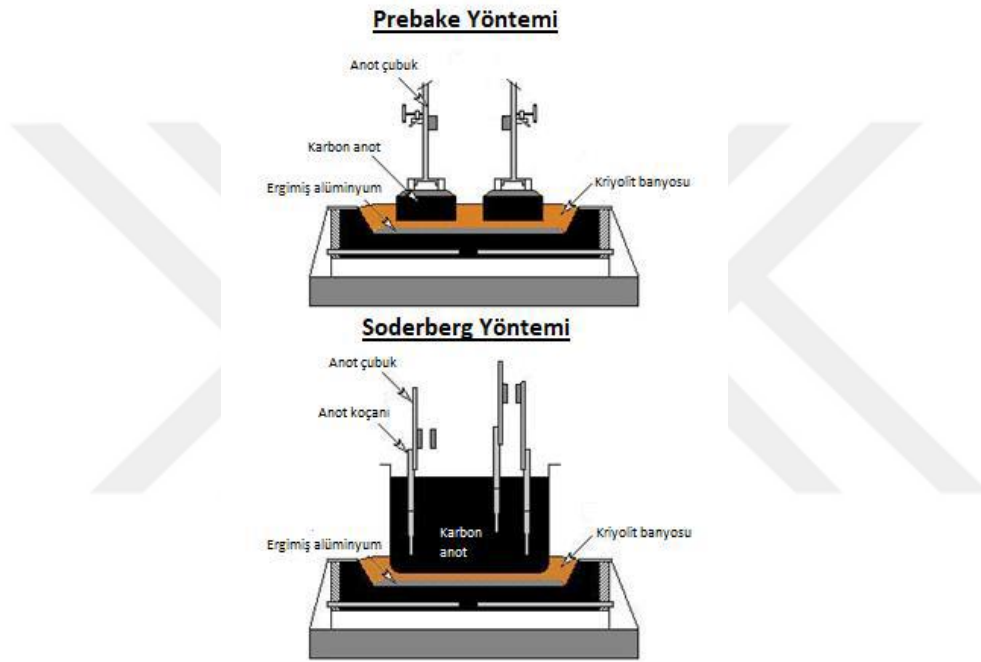
Şekil 2.5. Boksit cevherinden birincil alüminyum üretimine akış şeması [17].

2.5.2. Hall – Heroult prosesi

Bayar prosesi sonrasında elde edilen alumina, ergimiş kriyolit çözeltisine alınarak metalik alüminyuma dönüştürülmesi işlemine Hall – Heroult Prosesi olarak adlandırılmaktadır. Elektroliz hücrelerine alınan alüminanın, yüksek akım (100 – 400 kA) altında, 960 – 970⁰C sıcaklıkta, kriyolit-alüminyum florür ergimiş tuz eriyiği ihtiva eden elektrolit içerisinde çözünerek metalik alüminyuma ayrışması ve indirgenmesi prensibine dayanmaktadır. Elektroliz hücresinin tabanında biriken madde birincil alüminyum olarak adlandırılmaktadır. Biriken alüminyum, kapalı

vakum potalarıyla çekilerek alaşımlandırma ve döküm işlemleri için dökümhanelere gönderilmektedir.

Tesislere göre boyutları ve tipleri farklılık gösteren elektroliz hücrelerinin her biri birbirlerine seri olarak bağlanmış bağımsız üretim birimleridir. Hücre anotları, koklaşmanın hücre üzerinde olduğu sürekli anot tipi Soderberg ve koklaşmanın başka bir medya üzerinde gerçekleştiği kesikli anot tipli Prebake olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 2.6’da Soderberg ve Prebake yöntemleri verilmiştir [18].



Şekil 2.6. Soderberg ve Prebake elektroliz hücre sistemleri [18].

Prebake anotlu sistemlerde, rakamlar 12 – 20 arasında değişen dikdörtgen prizma geometrisinde olan ve anot hattında hazırlanan, önceden pişirilmiş petrol koku ve taş kömürü zifti karışımının üst ortasındaki alt kısmı çelik pimlerle sabitlenip, alüminyumdan yapılmış pimin üst parçası ile anot çerçevesine bağlanması ile oluşturulmaktadır [18].

Prebake yönteminde otomatik olarak gerçekleştirilen kabuğu kırma, hammadde şarjı ve anot tesiri, Soderberg yönteminde özel araçlar ile manuel olarak yapılmaktadır. Prebake yöntemi daha otomasyonel bir sistem olması itibarıyla, başta enerji olmak üzere, bütün sistem girdi tüketimlerinde daha verimli bir proses olarak öne çıkmaktadır.

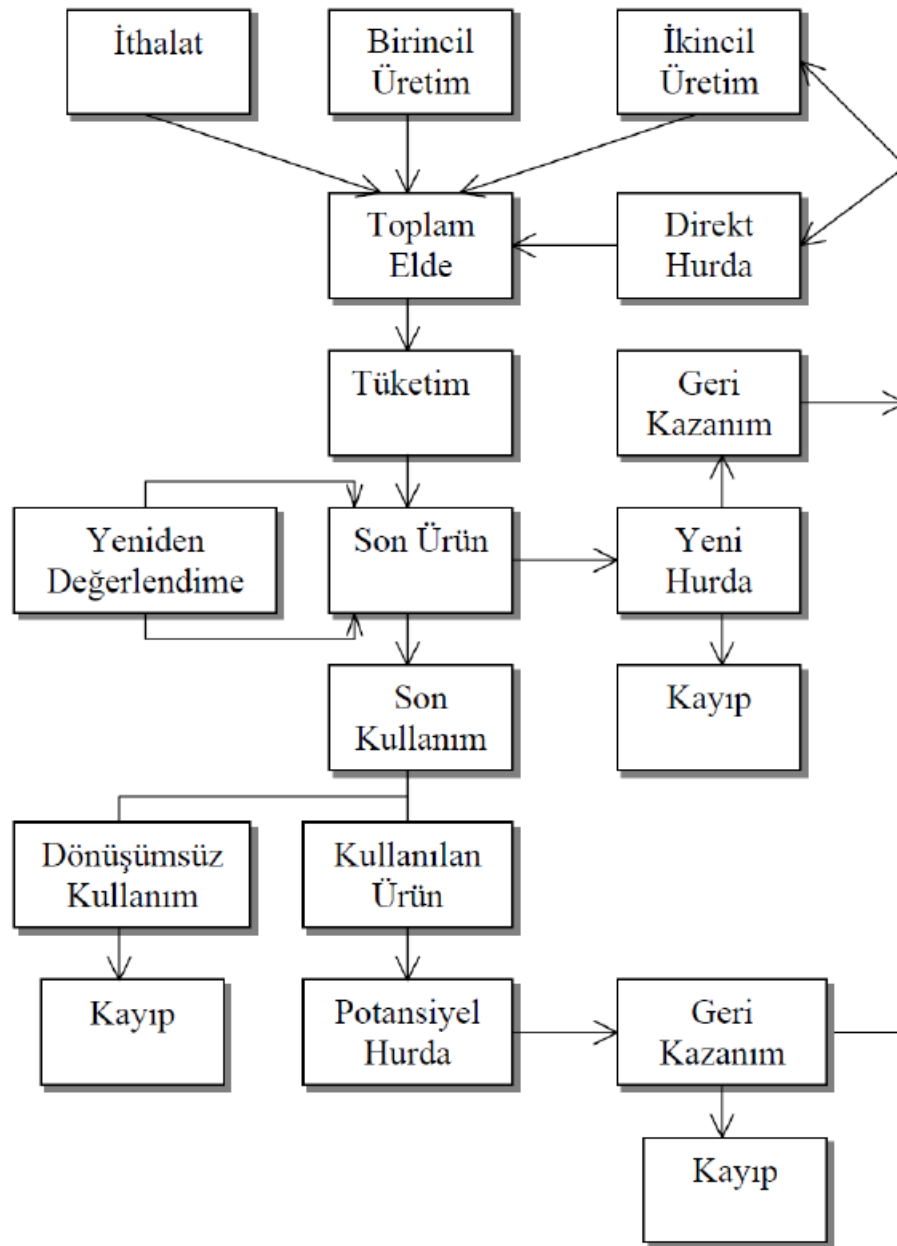
2.6. İkincil Alüminyum Üretimi

Endüstriyel üretimin hızla artmasına dek metallerin geri kazanımı gündeme gelmemiştir. Tüketime artışı, enerji verimliliğini yükseltebilme çabası, hammadde kaynaklarının hızla tükeniyor olması, küresel çevre etkilerinin zamanla tehdit oluşturması gibi durumlardan ötürü geri dönüşüm bilinci oluşmuş ve zamanla hız kazanmıştır.

İkincil (sekonder) alüminyum üretimi, sürdürülebilirlik açısından da büyük önem arz etmektedir. Sürdürülebilirlik kavramı, günümüzde tüm ülkelerin ve kurumların birinci önceliği durumuna gelmiştir. Alüminyum metali, oldukça iyi seviyede olan geri dönüştürülebilirlik özelliği sayesinde ikincil üretimde büyük paya sahiptir. İkincil alüminyum üretim döngü şeması Şekil 2.7’de verilmiştir.

İkincil alüminyumun üretim aşamaları sırasıyla;

- Hurda toplama
- Hurda tasnifi, hazırlık ve ön işlemler
- Ergitme
- Alaşımlandırma
- Sıvı metal temizliği ve rafinasyonu
- Döküm alma
- Curuf temizleme ve değerlendirme olarak belirtilmiştir.



Şekil 2.7. Alüminyum metalinin ikincil üretim akış şeması [15].

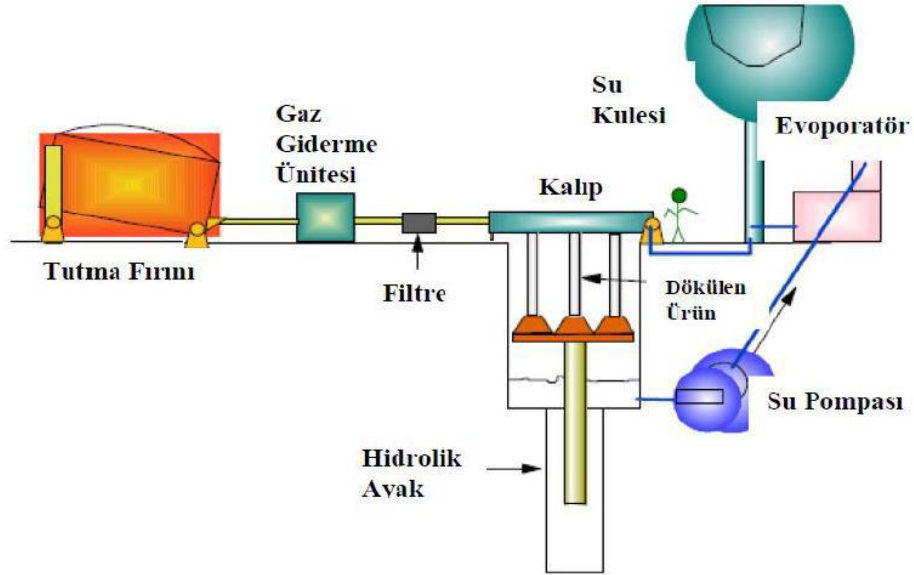
2.7. Alüminyum Levha Üretim Yöntemleri

Alüminyum levha üretimi genellikle, doğrudan soğutmalı (DC) ya da ikiz merdaneli sürekli döküm yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. DC yöntemi ile üretilen ingotların sonrasında sıcak haddelenerek nihai kalınlığa ulaştırılması gerekmektedir. Ülkemizde sıcak alüminyum hadde makinasına sahip bir işletme bulunmaması sebebiyle

endüstriyel alüminyum levha üretimi sadece ikiz merdaneli sürekli döküm yöntemi ile yapılmamaktadır.

2.7.1. Doğrudan soğutmalı döküm yöntemi (Direct Chill-DC)

1930'lu yılların başlarında Almanya firması olan VAW ve Amerika firması olan Alcoa tarafınca icat edilen DC döküm yöntemi, birincil ya da ikincil olarak üretilen alüminyumun yeniden ergitilmek suretiyle ingot olarak dökülmesi prensibine dayanmaktadır [19].



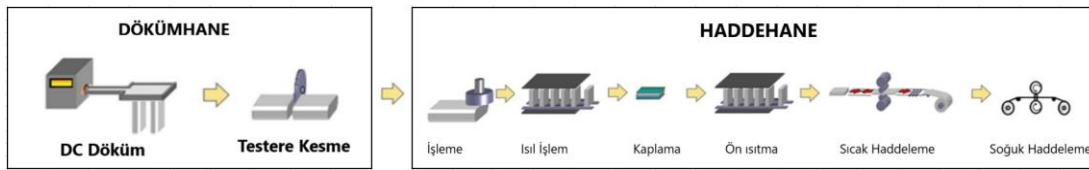
Şekil 2.8. DC döküm yönteminin şematize edilmiş resmi [19].

Şekil 2.8'de DC yönteminin şematize edilmiş resmi verilmiştir. Tutma fırınındaki sıvı metal gaz giderme ünitesinde çeşitli yöntemler sayesinde ihtiva edilen hidrojen den ayrıştırılır ve sonrasında empürütelerin ayrıştırılması amacıyla filtre edilir. Filtre sonrasında sıvı metal, su soğutmalı kalıpla temas eder ve katılaşma gerçekleştirilir. Kalıp içerisinde sürekli soğuk su çevrimi yapılması, sıvı metalin katılaşması için gerekli olan enerjiyi absorbe eder ve böylece katılaşma meydana gelir [19].

DC yönteminde geniş katılaşma aralığına sahip olan alüminyum alaşımlarının dökümü gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca sahip olduğu ince taneli mikroyapı avantajı sayesinde üretilen malzemenin kullanım alanındaki performansı daha iyi

olabilmektedir. DC yönteminden sonra uygulanan sıcak ve soğuk haddeleme prosesleri ile daha homojen bir mikroyapı elde edilmektedir [19].

Dökümhanede DC yöntemi ile dökülen ingot malzeme önce testere ile boy kesme yapılır. Ardından haddehane içerisinde sırasıyla, işleme/frezeleme, homojenizasyon ısıtma işlemi (nihai kullanım alanına göre), kaplama, ön ısıtma, sıcak haddeleme tezgahlarından geçer. 8 – 10 mm kalınlıklara indirilen malzeme daha sonrasında nihai kalınlığına soğuk haddeleme ile indirgenir. Proses akış şematize resmi Şekil 2.9’da verilmiştir [20].



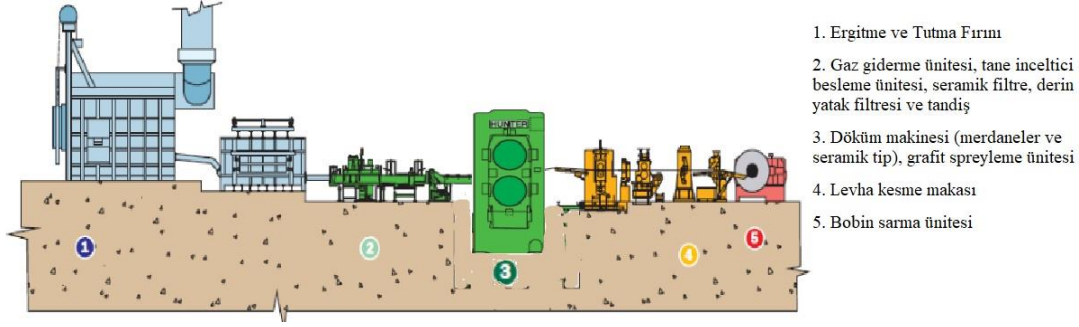
Şekil 2.9. DC yöntemi ile alüminyum yassı mamül üretim proses akışı [20].

2.7.2. İkiz merdaneli sürekli döküm yöntemi (TRC)

2.7.2.1. TRC yönteminin tarihçesi

1846 yılında Sir Henry Bessemer tarafınca bulunan bu yöntem, sıvı metalin alaşımlı çelik iki merdanelinin arasında katılaşması prensibine dayanmaktadır. Yaptığı çalışmalar sonucu 1954 yılında Joseph Hunter, ilk başarılı denemenin sahibi olarak tarihe geçmiştir. Yakın tarihte ise ikiz merdaneli döküm yönteminde FATA – Hunter, Novelis PAE (eski adıyla SCAL – Pechiney), Alcoa, Hazelett, CRM gibi şirketler alüminyum levha üretimi ve gelişimi için önemli katkılar sağlamışlardır [21].

TRC yöntemi, çeşitli üretim adımlarından tasarruf edilmesi avantajına sahiptir. Ergimiş sıvı metal direkt olarak soğuk hadde prosesine alınabilir nitelikte üretim yapılması sebebiyle, sıcak hadde prosesini elimine etmektedir. TRC yöntemi, modern alüminyum endüstrisinde kullanılan haddelenmiş yassı mamullerin oldukça büyük bir kısmını elde edebilmek amacıyla geliştirilmiştir. Nihai ürün geometrisine daha yakın bir şekilde üretim yapılması itibarıyla daha az deformasyona ve mekanik işleme ihtiyaç duyulmakta ve böylece daha az işletme maliyeti bakımından oldukça avantajlı bir üretim yöntemidir. Böylece enerji ve maliyet bakımından diğer yöntemlere nazaran avantajlar barındırmaktadır [15, 26, 27]. İkiz merdaneli sürekli döküm hattı şematize resmi Şekil 2.10’da verilmiştir [22].



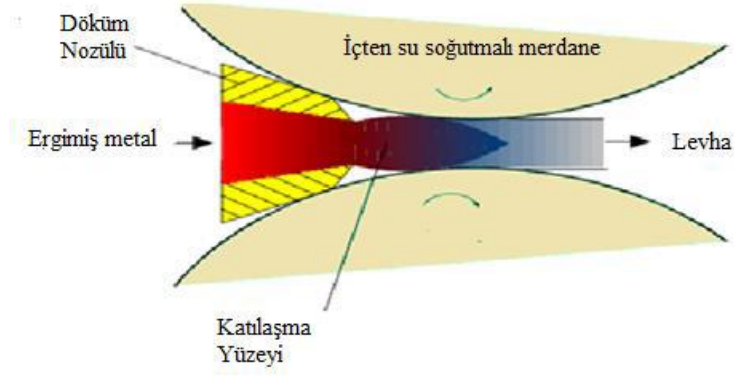
Şekil 2.12. TRC yöntemi şematize gösterimi ve kısımları.

İlk olarak ergitme fırınlarına ingot, slab hurda ve alaşımlandırma elemanları şarjı yapılır. Brülör vasıtasıyla ergiyen alüminyuma karıştırma, flakslama ve cüruf çekme gibi bazı hazırlık işlemleri uygulanmaktadır. Hazırlık işlemlerinden sonra tutma fırınına alınan sıvı metal sıcaklığı korunacak şekilde hattı besleme görevi üstlenmektedir [25].

Tutma fırınından refrakter bir yolluk vasıtasıyla gaz giderme ünitesine doğru yönlendirilir. Gaz giderme öncesi tane inceltici beslenmektedir. Gaz giderme makinasında bir rotor vasıtasıyla karıştırma yapılırken bir yandan da rotor üzerindeki nozullardan inert gaz şarjı yapılmaktadır. Alüminyum içerisinde ihtiva olan hidrojen atomları inert gaz ile birlikte yüzeye itilmekte ve dökümde oluşabilecek gaz porozitelerinin önüne geçilmektedir [25].

Gaz giderme sonrası empüritelerinden arındırmak amacıyla filtreleme ünitelerine ve sonrasında da tandişe dökülen sıvı metal, sıcaklık ve seviye kontrollü olarak seramik tip adı verilen nozullar vasıtasıyla ikiz merdaneler arasına beslenmektedir. Sıcak deformasyona uğrayarak şerit/levha oluşumu gözlenir ve merdane yüzeyine püskürtülen grafit veya magnezyum hidroksit vasıtasıyla yapışma engellenir. Oluşan şerit sarıcı ünitesi tarafından bobin şeklinde sarılarak üretim gerçekleştirilmiş olur [32, 33].

Katılaşma, Şekil 2.13'te daha detaylı olarak şematize edilmiştir. Katılaşma esnasında yüzey hatalarını engelleyebilmek için merdane basıncı, temas süresi, ergimiş metal akış hızı ve sıcaklığı kontrol altında tutulmalıdır. Merdaneler arasından geçerek katılaşan alüminyum rulonun çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 250⁰ C civarındadır [26].



Şekil 2.13. İkiz merdaneler ve ergimiş metal arasındaki etkileşimin şematize resmi [26].

Dökümde arzu edilen levha kalınlığının hesap formülü denklem 2.1’de verilmiştir. Denklem 2.1’de, d ; döküm tabaka kalınlığı, T_f ; merdane yüzey sıcaklığını, λ ; malzemenin termal iletkenliği, ρ ; yoğunluğu, H_f ; malzemenin gizli ısısını, t ; katılaşma süresini ifade etmektedir.

$$\frac{d}{2} = \sqrt{\frac{\lambda(T_f - T_r)t}{2\rho H_f}} \quad (2.1.)$$

2.7.2.3. Döküm öncesi uygulanan işlemler

- **Flakslama**

Döküm işlemine başlamadan önce ergitme fırınlarına beslenen hammadde ve/veya hurdalar brülörler vasıtasıyla sıcaklık altında sıvı alüminyum haline dönüştürülmektedir. Ergitme tamamlandığında, sıvı metale flakslama işlemi uygulanmaktadır. Flakslama işlemi, sıcaklığa bağlı olarak ergimiş alüminyum içerisinde çözünme kabiliyeti üstel olarak artan hidrojenin ve ayrıca ergiyik içerisinde ihtiva olan metalik olmayan empüritelerin döner bir motor vasıtasıyla flaks tozu üflenerek uzaklaştırılması amacıyla uygulanmaktadır [27].

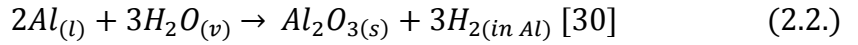
Flakslama, kimyasal bir işlem olup, bileşiminde inorganik tuzlar bulunmaktadır. Ayrıca, ergimiş alüminyum içerisinde katı ve gaz empüriteleri uzaklaştırmak amacıyla inert veya reaktif gazlar vasıtasıyla yapılan işlemler de flakslama olarak tabir edilmektedir. Flakslama işlemi toplamda 5 çeşittir [27].

- a) **Örtü Flaksları:** Fırın içi sıcaklığın 775°C ve üstü olması halinde, oksitlenme reaksiyonları üstel olarak artmaktadır. [28] Oksitlenme reaksiyonlarının önünü kesebilmek amacıyla, ergiyik üzerini örtü tabakası şeklinde kapatarak oksijen ile temasını kesen flaks çeşitleridir. Klor ve kriyolit karışımları yaygın olarak kullanılmaktadır. %85 NaCl ve %15 CaCl_2 , %15 Na_3AlF_6 örtü flakslarına örnek olarak verilebilir [29].
- b) **Rafinasyon Flaksları:** Ergiyikte çözünmüş durumdaki alkaliler, oksitler vb. empüritelerin uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Alüminyum içerisinde ihtiva olan kalsiyum miktarı poroz bir yapı oluşmasına, sodyum ve hidrojen ise bileşik oluşturarak deliklere sebebiyet vermektedir. Klor içeren flaks tuzları, magnezyum, kalsiyum, sodyum, lityum ve potasyum gibi elementlerle reaksiyona girerek ergiyik metalin yapısını bozmaktadır. Rafinasyon flaksı olarak genellikle MgCl_2 tercih sebebi olmaktadır [28].
- c) **Cüruf Çekme Flaksları:** Cürufun içerisine hapsolan ergiyik alüminyumun ve alüminyum oksitin ayrıştırılması için kullanılmaktadır. Ekzotermik reaksiyon gerçekleştirerek metal kaybını minimize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Sodyum klorür ve potasyum klorürden oluşan bu tür flaksların içerisine florit de eklenerek metal geri kazanımı gerçekleştirilmektedir. Na_3AlF_6 , NaF, AlF_3 cüruflaştırıcı flakslara örnektir [28].
- d) **Temizleme Flaksları:** Prosesin sürekliliği sonucu cüruf yapışması kaynaklı olarak sıvı metal kalitesi zamanla düşmektedir. Biriken oksit tabakasını kırmak ve yüzeye çıkarmak amacıyla flor içerikli olan temizleme flaksları kullanılmaktadır. C_2Cl_6 , K_2TiF_6 ve KBF_4 gibi tuzlar temizleme flakslarına örnektir. [29] Ayrıca fırın iç duvar temizliği yapmak amacıyla Na_2SiF_6 refrakter püskürtme cihazları vasıtasıyla duvarlara yapışan tabaka halindeki cürufların yumuşatılarak temizlenmesi sağlanmaktadır [28].
- e) **Gaz Giderme Flaksları:** Alüminyum içerisinde çözünen gaz miktarı yaklaşık 660°C 'ye kadar stabil kalmakta, 660°C 'nin üzerinde ise dramatik bir artış sergilemektedir. Ergiyik metalde çözünen gaz miktarını elimine edebilmek amacıyla flaks veya tabletler kullanılmaktadır. Klorür ve karbon dioksit gazları, gaz kabarcıkları oluşturmakta bu yüzden gaz giderici olarak

kullanılmaktadır. Yaygın olarak C₂Cl₆ kullanılmaktadır. Sadece gaz gidermek amacıyla değil, metalik olmayan inklüzyonları arıtmak, modifikasyon ve tane küçültme işlemleri yapabilmek amacıyla da kullanılabilir [28].

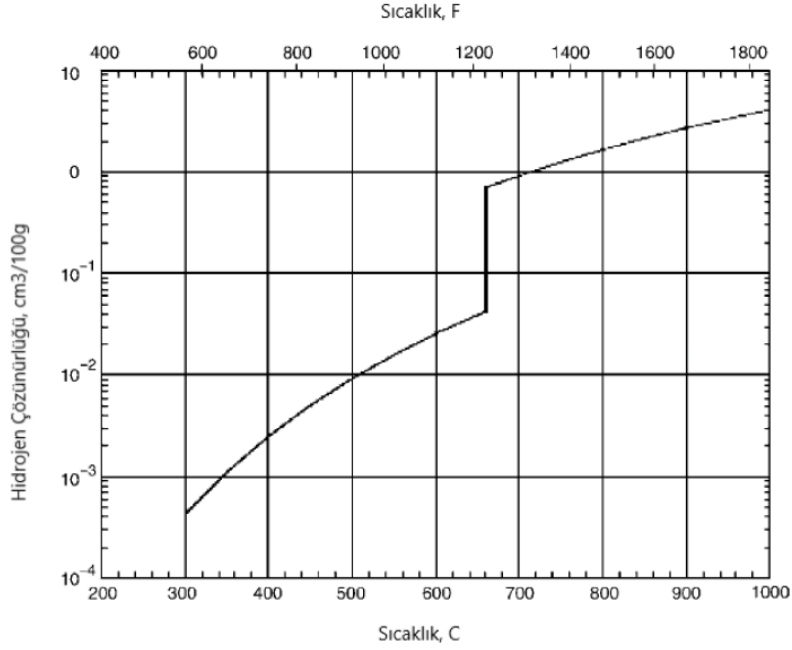
- **Gaz Giderme**

Alüminyum ve alaşımlarındaki çözünürlüğü en yüksek gaz, hidrojen gazıdır. Hidrojen, atmosfer içerisindeki su buharının alüminyum ile indirgenme reaksiyonu sonucunda meydana gelmektedir. Aşağıdaki denklem 2.2 ile açıklanabilir [30].



Metaller, hidrojen ile direkt temasta olduğunda veya hidrojen üreten ortamlarda (elektro kaplama, dekapaj, döküm, korozyon reaksiyonları, katodik koruma, yakıt hücresi vb.) yer aldığında, hidrojen gazı metal bünyesinde kolayca absorbe edilebilmektedir. Bu durum alüminyum ve alaşımları için daha da tehlikeli boyuttur [39-41].

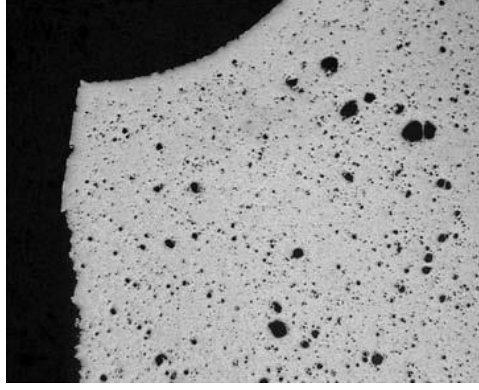
Katı ve sıvı alüminyumdaki hidrojen oranı, yüzeyde ve atmosferde kükürt bileşikleri gibi yabancı maddelerin ihtivası sonucunda artış göstermektedir. Hidrit oluşturan elementler, sıvı metal içerisinde hidrojenin yakalanmasını arttırmaktadır. Berilyum, bakır, kalay ve silikon gibi diğer elementler ise hidrojen yakalanmasını düşürmektedir. [39, 40].



Şekil 2.14. Sıvı Alüminyum içerisinde sıcaklığa bağlı olarak üstel artan hidrojen çözünürlüğü grafiği [30].

Şekil 2.14’de verilen grafik baz alındığında, sıvı alüminyum içerisindeki hidrojen çözünürlüğü, katı alüminyuma nazaran, üstel olarak artmaktadır. İçerisinde katı çözünürlük sınırının üzerinde çözünmüş olan hidrojen ihtiva eden sıvı alüminyumun katılaşması sonucunda, moleküler formda çökerek birincil ve/veya ikincil boşlukların oluşmasına neden olabilmektedir [31].

Şarj metalleri (iç hurdalar, ingotlar vb.), flakslar, fırın araç - gereçleri, fırın refrakterleri, numune alma kepçeleri, döküm esnasında aşırı türbülans vb. gibi durumlar, bu gaz porozitelerinin sebebi olan hidrojen gazının kaynağı olarak gösterilebilir [31]. Sıvı alüminyum içerisinde yeterince gaz giderilemediği durumda katılaştan metal içerisinde gaz poroziteleri hataları meydana gelmektedir. Bu duruma örnek olarak Şekil 2.15 ve 2.16’da görüntüleri verilmiştir.

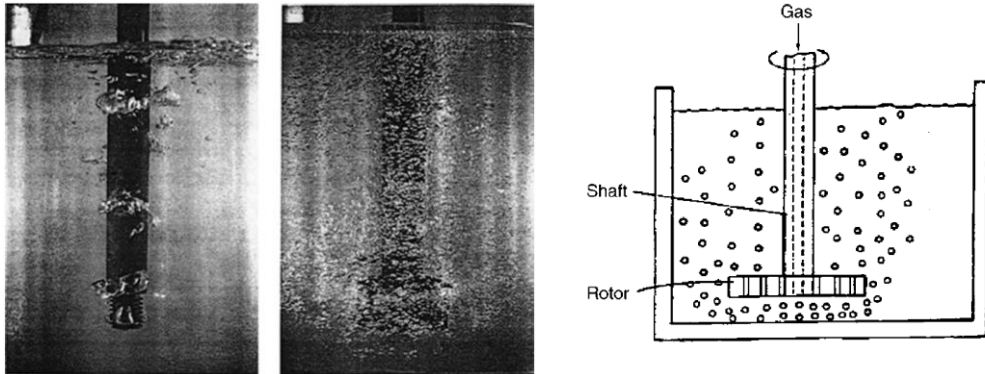


Şekil 2.15. Gaz gözenekliliğinin tipik mikrografı. Orijinal büyütme: 100X [32].



Şekil 2.16. a) Gaz porozitesi bulunmayan ve yoğunluğu 2.70 g/cm^3 b) Gaz porozitesi bulunan ve yoğunluğu 2.58 g/cm^3 olan Al döküm parçaları [33].

Hidrojen gözenekliliği daha iyi ürünler elde etmek için kaçınılması gereken bir kusur olduğundan, erimiş metal içinde çözünen hidrojen miktarının azaltılmasına yönelik gaz giderme (degassing) işlemi yapılmaktadır. Şekil 2.17'de görüntüsü ve şematize resmi verilen gaz giderme işlemi, tutma fırını ve CFF filtre arasında bulunan cihaz vasıtasıyla yapılmaktadır.



Şekil 2.17. Statik lanslı ve dağıtıcı veya dönen şaftlı/rotorlu gaz giderme işlemi ve şematize resmi [32, p. 187].

Bu cihazda bulunan 2 döner rotor vasıtasıyla mekanik olarak karıştırılarak ve rotorlar üzerinde bulunan nozullardan inert gaz verilerek, sıvı metal içerisinde hapsolan hidrojen gazının yüzeye baloncuklar halinde çıkması sağlanmaktadır. Şekil 2.18’de ise endüstriyel olarak kullanılan gaz giderme makinasını ve yüzeye çıkan baloncuk halindeki hidrojenin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 2.18. Alpur® gaz giderme cihazı ve sıvı metal ve rotor yüzeyinde biriken hidrojen gazı [44, 45].

- **Saflaştırma**

Ergiyik içerisindeki empürileri (lityum, sodyum, kalsiyum, magnezyum vb.) AlF_3 veya klor gazı verilerek uzaklaştırma işlemidir [34].

- **Filtrasyon**

Alüminyum, oksijene olan yüksek afinitesi ve metalik olmayan empüriler içermesi sebebiyle fiziksel, mekanik ve iletkenlik özellikler bakımından iyi bir levha elde edilebilmesi amacıyla filtrasyon işlemi yapılması gerekmektedir. Yolluk üzerinde ergimiş metali filtre eden sistemler vasıtasıyla empüriler burada yakalanarak ruloya kaçması engellenir. Filtrelerin verimli olarak çalışabilmesi için termal şok direnci, mekanik ve yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon direnci gibi özelliklerinin olması beklenmektedir [35].

Metal veya cam yünü setleri, döner gaz giderme, derin yatak filtreleme, sıkıştırılmış parçacık filtre, kartuş filtre ve seramik köpük filtreler yaygın olarak kullanılmaktadır. Optimum filtre seçimi için maliyet, süzme verimi, yardımcı metal işleme yeteneği, yer kısıtlılığı ve nihai kullanım alanı gibi kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. En

yaygın olarak Şekil 2.19’da verilen derin yatak filtreleme ve Şekil 2.20’de verilen seramik köpük filtreleme kullanılmaktadır [35].



Şekil 2.19. Derin Yatak Filtreleme Ünitesi (DBF) ve içerisinde bulunan alümina topraklar [36].



Şekil 2.20. Seramik Köpük Filtre (CFF) [37].

2.7.2.4. Döküm kalitesine etki eden faktörler

- **Alaşımın İçeriği**

Alaşım içeriği, dökme rulonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemede en etkili faktördür. Döküm kabiliyeti ve verimlilik özellikleri alaşımın içeriği ile ayarlanabilmektedir [8].

- **Döküm Hızı**

TRC yönteminde döküm hızının ayarlanabilmesi, alaşım, levha/rulo kalınlığı ve merdane kabuğuna (shell) bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ayrıca alaşımın içerisindeki alaşımlandırma miktarı arttıkça, döküm hızı da doğru orantılı olarak arttırılabilmektedir [34].

- **Tip Mesafesi (Setback)**

Tip ile merdaneler merkezindeki mesafe, tip mesafesi (eksen-setback) olarak tanımlanmaktadır. Tip ile merdane merkezi arasındaki mesafe, ayırma kuvveti etkisiyle tip dudağının çıkışında meydana gelen kalınlık doğru orantılıdır. Eksen mesafesi arttıkça, ayırma kuvveti de artmaktadır. Tip mesafesinin kısa tutulması ise makine ömrü açısından tavsiye edilmektedir [34].

Tipin yerleşebileceği mesafenin belirlenebilmesi aşağıdaki verilen denklem 2.3 ve denklem 2.4 ile yapılabilmektedir.

$$X = \sqrt{R \cdot (d - l)} \quad (2.3.)$$

$$d = d_2 + 1,2 \quad (2.4.)$$

R; Merdane çapı, d; tip kalınlığı, d₂; tipin ölçülen kalınlığı, l; merdane aralığı (GAP), X; Tip mesafesi.

Tip mesafesini ölçebilmek için aşağıda verilen denklem 2.5. kullanılmaktadır.

$$X = X_2 - \left[\frac{ra+rb}{2} \right] \quad (2.5.)$$

ra; alt merdane yarıçapı, rb; üst merdane yarıçapı, Seramik tipin uç kısmı ile master arasındaki mesafe (A ve B arasındaki mesafe).

- **Sıcaklık**

Ergiyik metalin akışkanlığını kontrol altında tutmanın tek yolu sıcaklığı sabit tutabilmektir. Sıcaklık yüksek olduğunda merdane arasından akar, sıcaklık düşük olduğunda ise donuk atarak tip kırılmasına yol açabilmektedir [13].

- **Besleme Kutusu (Head-Box)**

Besleme kutusu içerisinde ergiyik metalin ısısı bir amper vasıtasıyla sürekli olarak ölçülerek belirlenen asgari değerler arasında tutulması sağlanmaktadır. Sıvı metal seviyesi düştüğünde besleme yetersizliğine sebep olmakta, fazla olduğunda ise tip dudak kalınlaşmasına ve tip kırılmasına sebep olmaktadır [13].

- **Merdane Yüzey Görünümü**

Merdane yüzeyinde yapışma, ayırma kuvvetlerinin artmasına sebep olmakta ve döküm prosesini zorlaştırmaktadır. Miadını tamamlamış merdaneler, torna/taşlamaya giderek yeniden hazırlanmalıdır veya yenisi ile değişim yapılmalıdır [38].

TRC yönteminde merdanelerin soğutma hızı yüksek olmasından ötürü katılaşma tek yönlü gerçekleşmektedir. Daha homojen bir mikroyapı elde edilmesine imkan tanınmasına rağmen, düzensiz katılaşmaya da sebebiyet verebilmektedir [34].

- **Tane İnceltme**

Tane boyutunun optimizasyonu için döküm anında genellikle TiB_2 kullanılmaktadır. Çekirdekleyici olarak mükemmel vasfa sahip olan TiB_2 , ergiyik içerisinde neredeyse hiç çözünmeyerek çok iyi bir tane inceltici olarak kullanılmaktadır [39].

2.7.2.5. Döküm hataları ve sebepleri

Döküm prosesi esansında oluşabilecek hatalar aşağıda listelenerek açıklanmıştır [40].

- a) Oksit Atma: Tip dudağı veya içerisinde kalıntıların birikmesi ve bir anda kopması sebebiyle levha yüzeyinde nispeten koyu tonlu çizgilerin meydana gelmesi durumudur.
- b) Sıcak Delik: Ergiyik metalin sıcaklığının yükselmesinden ötürü yüzeyde meydana gelen deliklerdir.
- c) Donuk Delik: Ergiyik metalin sıcaklığının düşmesinden ötürü yüzeyden kenara doğru oluşan döküm hatalarıdır.

- d) Seviye Deliği: Ergiyik metalin seviyesinin düşmesi sonucu oluşan döküm hatalarıdır.
- e) Grafit deliği: Merdane yüzeyine püskürtülen grafitin tıkanması sebebiyle atım yapılamaması sonucunda levha merdaneye yapışır. Purging yapma durumunda ise spreysel tesisatı içerisinde biriken tüm grafiti merdane yüzeyine püskürtülmesi sonucunda levha yüzeyinde delik açılır.
- f) Hidrojen (Gaz Boşluğu): Gaz giderme işleminin yeterli gelmemesi sonucunda meydana gelmektedir.
- g) Besleme Yetersizliği: Yüzey ortasında veya ortaya yakın kenarlarda gözlenen yarık şeklinde meydana gelen noktasal kusurlardır.
- h) Ripple İzi: Fiziksel görüntünün bozulmasıyla anlaşılmaktadır. Metal seviyesinin yükselmesi, eksenin merdaneye olan yakınlığı ve yüksek sıcaklıktan ötürü meydana gelebilen hata türüdür.
- i) Tane Boyutu E bandı: Proses esnasında döküm hızı ve sıcaklığının senkronize olmaması sonucunda görülen hata tipidir. TiB_2 yeterince beslenemediğinde levha yüzeyinde kaba taneli yapılar meydana gelmekte ve E bandına sebep olmaktadır.
- j) Yapışma İzi: Grafit miktarının az gelmesi sebebiyle yüzeyde oluşan beyazlıklardır. Si, Pb gibi elementlerin bileşimde fazla olması sebebiyle de meydana gelebilmektedir.
- k) Kenar Çapağı: Kenar kesme bıçaklarının yıpranması sebebiyle meydana gelmektedir.
- l) Kenar Şişmesi: Geri eksende çalışılması ve deformasyon miktarının fazla olması sebebiyle kenarlara doğru ekstrüde olma durumudur.
- m) Merdane Çatlağı: Merdanelerin termal şok altında sürekli olarak ısınıp soğuması sebebiyle yüzeyde oluşan mikro çatlaklardır.
- n) Teleskobik Sarım: Rulonun sarılması esnasında, madrenden sapma diklik açısıdır.

- o) Yüksek Bombe: Levha ortalama kalınlık değerinin %1,5'in üzerinde olması durumudur. Tip ekseninin geride çalışılması ve alaşıma göre döküm hızının ve metal seviyesinin doğru şekilde ayarlanamaması sonucunda oluşur.
- p) Düşük Bombe: Levha kenar kalınlık farkının, orta bölgeden düşük gelmesi hatasıdır. Merdane bombesinin fazla oluşu ve eksenin ileride çalışması sebebiyle oluşmaktadır.

2.7.2.6. TRC döküm yöntemini avantaj ve dezavantajları

Avantajları:

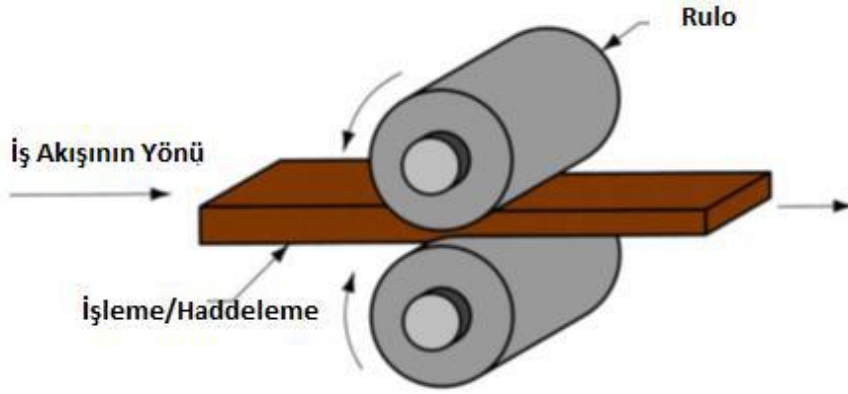
1. Yüksek soğuma hızına bağlı olarak çok ince tane yapısına sahip bir mikroyapı eldesi sağlamaktadır.
2. Yüzey işleme gereksinimini elimine etmektedir.
3. Çok yüksek akış hızına sahiptir.
4. Yüksek soğuma hızından ötürü, çekme oranının 40 inç/dakika (1000m/dk) seviyelerine çıkarılabilmesine olanak sağlamaktadır [41].

Dezavantajları:

1. Yatırım maliyeti yüksektir.
2. Hızlı katılaşmadan ötürü yüksek ısıl gerilmelere maruziyet vermektedir.
3. Bazı alaşımlarda soğuk haddeleme prosesi öncesi tavlamaya ihtiyaç duyulmaktadır [41].

2.7.3. Soğuk Haddeleme

Bir plastik şekil verme yöntemi olan soğuk haddeleme, kendi eksini etrafında dönen merdaneler vasıtasıyla levha üzerine basma kuvveti uygulanarak kalınlık azaltma işlemi olarak bilinmektedir. Haddeleme hızı, sürekliliği, proses ve malzeme takibinin kolaylığı açısından en çok tercih edilen plastik şekil verme yöntemlerinden birisidir. Soğuk haddeleme merdanelerinin yüksek termal direnç, yüksek kırılma ve çatlama dayanımı, iyi yüzey kalitesi, uygun sertlik ve mukavemet, rijidite gibi özelliklere sahip olması beklenmektedir. Ezme oranı yüksek uygulandığında merdane sertliklerinin düşük ve tokluğunun yüksek olması tercih edilmektedir [42].



Şekil 2.21. Haddeme prosesinin şematize edilmiş resmi [42].

Şekil 2.21’de haddeme prosesinin şematize görüntüsü verilmiştir. Haddeme prosesi, “yassı” ve “profil” haddeme olarak 2 ana kalemde ele alınmaktadır. Prosesin sıcaklığına bağlı olarak ise “sıcak haddeme” ve “soğuk haddeme” olarak 2 çeşidi mevcuttur [42].

Soğuk haddeme prosesi, rulo, levha, ince çubuk ve tel gibi küçük kesitli üretimler için uygulanmaktadır. Boyut toleransının iyi olması, yüzey kalitesinin iyi olması ve pekleşme sayesinde şekil verilen malzemeye yüksek mukavemet kazandırması itibariyle oldukça tercih edilen bir yöntemdir [42].

Malzeme yüzeyine iş merdaneleri tarafından basma kuvveti uygulanmaktadır. Eşitlik 2.6’da σ akma; verim ortalama gerilme stresi, W ; şerit genişliği, h_1 ; şeridin kalınlığı katılma noktasının tamamı, h_2 ; kalınlığı çıkış noktasındaki şerit, R ; ruloların dış yarıçapı, $hort$; şeridin ortalama kalınlığını göstermektedir.

$$F = 1,55. \sigma_{verim}. W \left[1 + \frac{\sqrt{R(h_2-h_1)}}{4(h_1-hort/2)} \right] \sqrt{R(h_2-h_1)} \quad (2.6.)$$

$$hort = \left[h_1 - \frac{(h_2-h_1)}{2} \right] \quad (2.7.)$$

Kalite kusurlarını belirleyen faktörler öncelikli olarak haddeme tipine ve kalınlık azaltılmasına bağlıdır. Merdane soğutması, merdane aralıklarının ayarlanması, sarıcı ve açıcı gergileri, haddeme hızı gibi parametreler kaliteyi etkileyen unsurlardır [43].

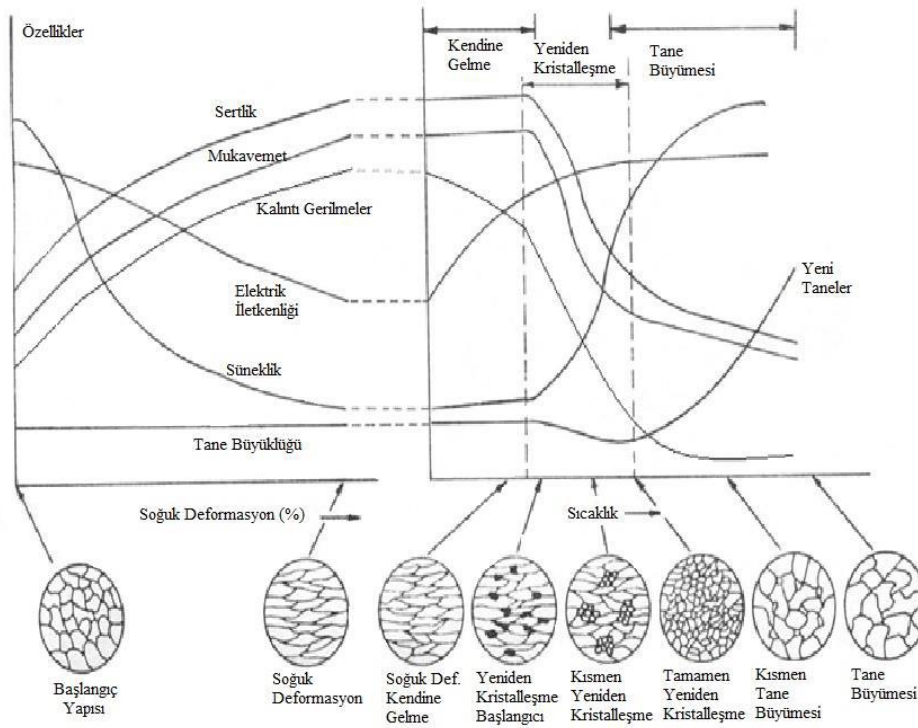
2.7.3.1. Haddeleme prosesinde uygulanan ısıl işlemler

- **Homojenizasyon**

Homojenizasyon tavlı, daha hızlı difüze olabilen magnezyum, çinko, bakır ve silisyum gibi elementlerin sıcaklık etkisiyle çözünebilir hale getirilmesi ve homojen bir tane yapısı elde edilmesine olanak tanıyan tav prosesidir. Neredeyse tüm alüminyum alaşımların uygulanabilir niteliktedir. Yavaş difüze olan manganez, krom ve zirkonyum gibi elementler ise alüminyumda çökmektedir. Döküm yapısından gelen izleri silkebilmek ve homojen bir tane yapısı elde edebilmek amacıyla uygulanmaktadır [44].

- **Yeniden Kristalleşme**

Soğuk haddelenmiş alüminyum rulonun pekleşmesi sonucu, kalınlık azaltma işlemine devam edilebilmesi için yeniden kristalleşme tavlına ihtiyaç duyulmaktadır. Isıtılan alüminyumun atomlar arası hareket kabiliyetinin artması sebebiyle sıcaklık yükselir ve yeniden kristalizasyon hızı da doğru orantılı olarak artmaktadır. Yeniden kristalleşme tavlı, alaşımlandırma miktarı ve deformasyon miktarı ile ilişkilidir. Alaşım içeriğinde krom, demir, manganez ve çinko gibi geçiş metallerinin ihtiva olması, tavlama süresinin kısa tutulması ve soğuk deformasyon miktarının düşük olması yeniden kristalleşme sıcaklığını yükselten faktörlerdir [45]. Şekil 2.22’de yeniden kristalleşme tavlının tane yapısına etkisinin şematize gösterimi verilmiştir [46].



Şekil 2.22. Toparlanma ve yeniden kristalleşmenin tane yapısına etkisinin şematize gösterimi [46].

• Toparlanma Tavı

Soğuk haddeleme prosesinden çıkan alüminyum ruloda meydana gelen yoğun dislokasyonların kısmen giderilmesi amacıyla toparlanma tavı yapılmaktadır. Çizgisel kusurların toplam sayısı azaltılmaksızın, düşük enerji dağılımı düzenlenir. Durdurulmuş vaziyetteki kayma düzlemi yeniden harekete geçirilmek kaydıyla malzemenin mekanik özelliklerine etki edilmektedir. Akma ve çekme dayanımı azalmakta iken, % uzamanın artması gerçekleştirilmektedir [47].

Çeşitli tavlar gören malzemelerdeki dislokasyon yoğunlukları kıyas edildiğinde;

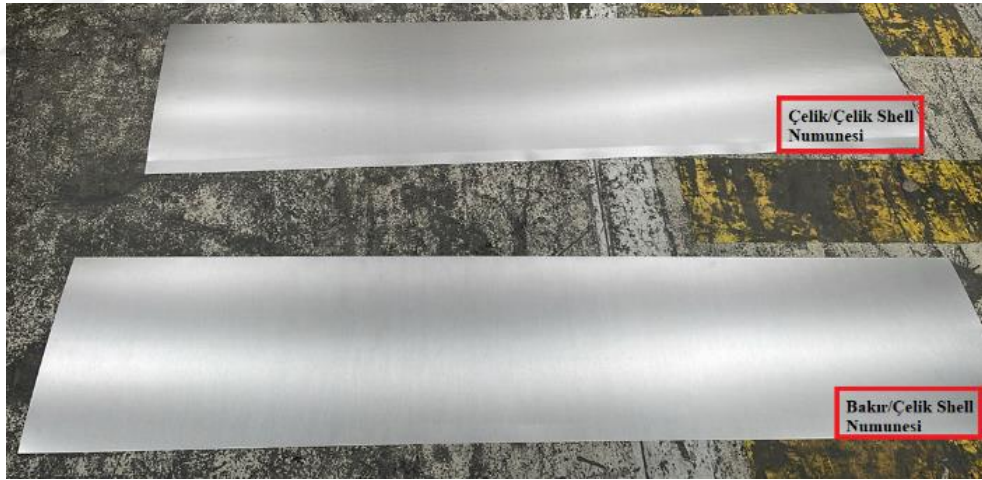
- Soğuk işlem sonrası 10^{12}
- Toparlanma tavı sonrası 10^{10}
- Yeniden kristalleşme sonrası $10^7 - 10^8$ ($1/\text{cm}^2$) olduğu görülmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması, ASAŞ Alüminyum San. ve Tic. A.Ş. bünyesinde yürütülmüştür. Her türlü materyal, ekipman ve yöntemin temin edilmesi hususunda ASAŞ Alüminyum Yassı Mamuller Döküm İşletmesi ve Ar-Ge birimleri tarafından desteklenmiştir.

3.1. Materyal

Araştırmada, 2 adet 5-7 mm kalınlık aralığında 5005 alüminyum alaşım levha kullanılmıştır. 1 adet 5005 levha alaşımlı çelik/çelik merdane çifti ile, diğer 5005 levha ise berilyum alaşımlı bakır/alaşımlı çelik shell merdane çifti ile üretilmiştir. Şekil 3.1.'de çelik/çelik ve çelik/bakır shell ile üretilen döküm numuneleri verilmiştir.



Şekil 3.1. 5-7 mm aralığında farklı shell malzemeleri ile üretilen döküm numuneleri.

Bu çalışmada ergitme fırınlarının kompozisyonları Tablo 3.1'de verilen EN 573-2 standartları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bu standart, ilgili standartlarda belirtildiği üzere alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanabilen bir kod belirleme sistemini kapsar. Şekillendirilebilen ürünlerin kimyasal bileşimi ve şekli için belirlenen Avrupa Norm standartlarıdır. Novelis PAE Jumbo 3CM® Sürekli Döküm

Makinelerinde shell malzemesi olarak berilyum alaşımlı bakır ve alaşımlı çelik kullanılmıştır.

Tablo 3.1. EN 573-2 standardına göre EN AW-5005 alüminyum alaşımı kompozisyonu.

Alaşım	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Diğer		Al (min.)
												Her biri	Toplam	
EN AW 5005	max. 0,3	max. 0,7	max. 0,2	max. 0,2	0,5-1,1	max. 0,1	-	max. 0,25	-	-	-	max. 0,05	max. 0,15	Kalan

Dökülen levha numunelerin de ARL marka spektrometre ile kimyasal kompozisyonları incelenmiştir. Aşağıdaki Tablo 3.2’de spektrometre analizi sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.2. Her iki shellin de döküldüğü ergitme fırınından alınan numunenin spektral analiz sonucu.

Alaşım	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Diğer	Al
EN AW 5005	0,85-0,95	0,27-0,35	0,002-0,01	0,015-0,02	0,55-0,75	0,001-0,005	-	0,002-0,01	0,02-0,03	-	0,01-0,03	-	98,95

3.2. Yöntem

Bu çalışmada, ikiz merdaneli döküm yöntemi ile dökülen 5005 alaşım levhalar, 5 – 7 mm kalınlık aralığında üretilmiştir. Yapılan araştırmada izlenen rotalar; proses 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 olmak üzere 8 farklı şekilde isimlendirilmiştir.

Proses 1, 2, 3 ve 4’de üst ve alt merdanelerde alaşımlı çelik shell kullanılmıştır. İlk etapta, 5-7 mm kalınlık aralığındaki döküm kalınlığından %82 soğuk deformasyon oranı ile Şekil 3.2’de görüntüsü verilen Delta marka laboratuvar ölçekli hadde makinası ile soğuk haddelenmiştir.



Şekil 3.2. Delta marka laboratuvar ölçekli hadde makinesi.

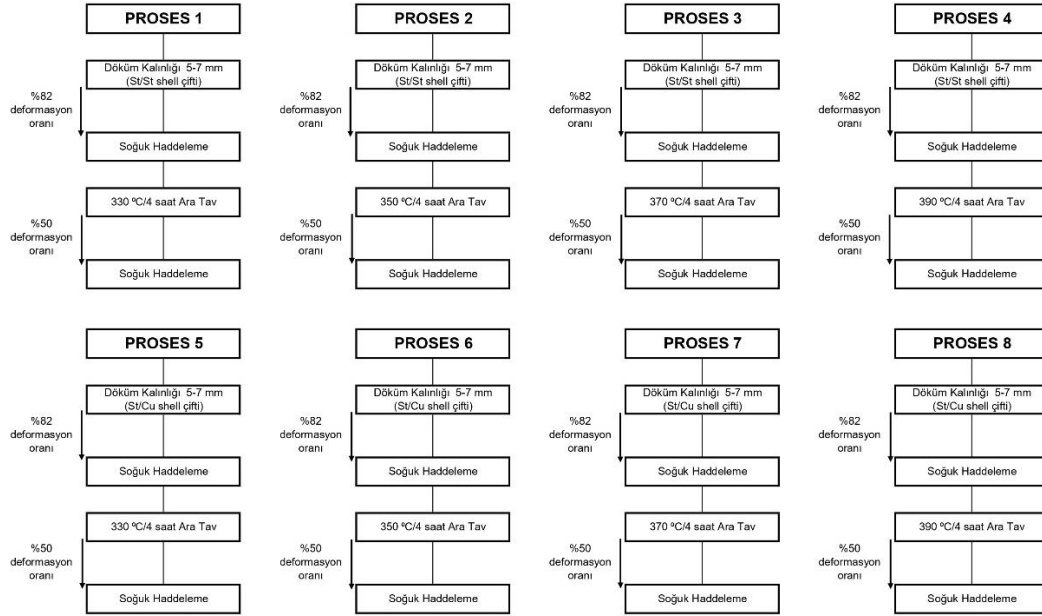
Ardından 4 farklı numune alınarak sırasıyla proses 1, 2, 3 ve 4’de 330, 350, 370 ve 390 °C olmak üzere 4 farklı sıcaklıkta 4 saat ara tav işlemi uygulanmıştır. Ara tav işlemi Şekil 3.3’de verilen Nabertherm marka laboratuvar tav fırınlarında gerçekleştirilmiştir. 4 farklı ara tav reçetesi uygulanan numuneler, %50 soğuk deformasyon oranı ile soğuk haddelenerek nihai kalınlıklarına indirgenmiştir.



Şekil 3.3. Nabertherm marka laboratuvar tav fırınları.

Proses 5, 6, 7, ve 8’de ise, üst merdanede alaşımlı çelik shell ve alt merdanede berilyum alaşımlı bakır shell kullanılmıştır. İlk etapta, 5-7 mm kalınlık aralığındaki döküm kalınlığından %82 soğuk deformasyon oranı ile soğuk haddelenmiştir. Ardından 4 farklı numune alınarak sırasıyla proses 5, 6, 7, ve 8’de 330, 350, 370 ve 390 °C olmak üzere 4 farklı sıcaklıkta 4 saat ara tav işlemi uygulanmıştır. 4 farklı ara tav reçetesi uygulanan numuneler, %50 soğuk deformasyon oranı ile soğuk haddelenerek nihai

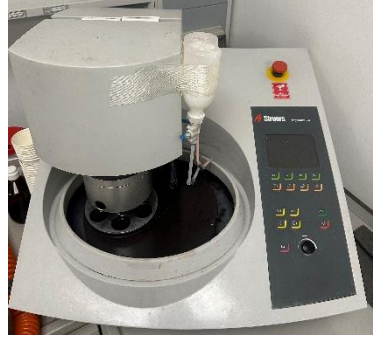
kalınlıklarına indirgenmiştir. Çalışmada uygulanan proseslerin akış şeması Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yapılan çalışmalarda uygulanan proseslerin rota akış şemaları.

3.3. Analizler

Belirlenen rotalar sonucu elde edilen numuneler ZEISS Scope.A1 optik mikroskobu altında metalografik inceleme yapılmak üzere hazırlanmıştır. Uygun boyutlarda kesilerek epoksi soğuk bakalite alınan numuneler, öncelikli olarak sırasıyla 500, 1200 ve 2500 grit arasında zımparalanmış, sonrasında ise 3 µm SiC süspansiyon ile nihai parlatma işlemine tabii tutulmuştur. Şekil 3.5’de verilen Struers Tegramin-30 marka cihaz vasıtasıyla ve tetraflora borik asit ile elektrolitik dağlama yapılmıştır. BF (bright field) modunda alınan görüntülerde ise HF ile elektrolitik dağlama yapılmıştır. Polarize ışık altında ve BF altında mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Numune zımparalama ve dağlama işlemlerinde Struers marka cihaz kullanılmıştır. Şekil 3.6’da verilen ZEISS marka optik mikroskop ile metalografik incelemelerde bulunulmuştur.



Şekil 3.5. Struers marka elektrolitik dağlama cihazı.



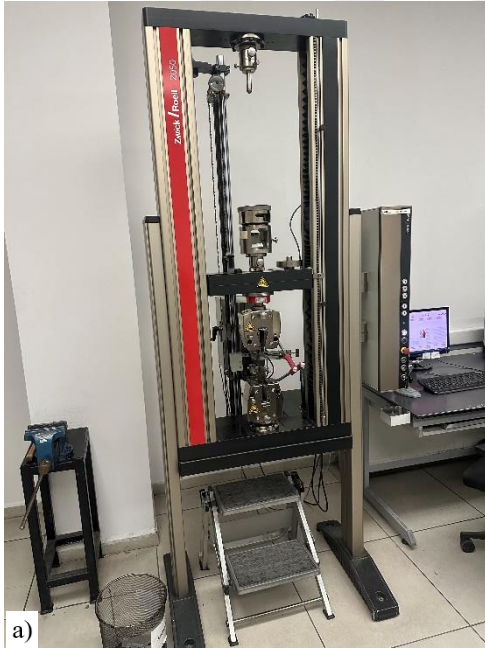
Şekil 3.6. Zeiss marka optik mikroskop.

Optik mikroskobun yanı sıra, numunelerin detaylı mikroyapı ve elementel incelemeleri yapılmak üzere, Şekil 3.7’de verilen ZEISS EVO MA 15 taramalı elektron mikroskobu ile 500X, 1000X ve 2000X büyötmelerde SEM (Scanning Electron Microscope) görüntöleri alınmıştır. Elementel incelemeler için de EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) alan analizleri yapılmıştır.



Şekil 3.7. ZEISS marka SEM cihazı.

Proseslerde kullanılan numunelere mekanik özelliklerin analizini yapabilmek amacıyla Şekil 3.8’de verilen Zwick/Roell marka test cihazında 0^0 ve 90^0 olmak üzere 2 yönlü çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testlerinde akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama miktarı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca aynı cihazda Erichsen testleri de uygulanarak değerleri incelenmiştir.



Şekil 3.8. Zwick/Roell test cihazı a) çekme testi b) Erichsen testi.

Bunlara ilave olarak, mikrosertlik ölçümleri Şekil 3.9’da verilen Future-tech sertlik ölçme cihazı kullanılarak numunelerin kesitinden Vickers cinsinden alınmıştır. 10 gf yük altında 10 saniye parametreleri ile ölçümler kayda alınmıştır.



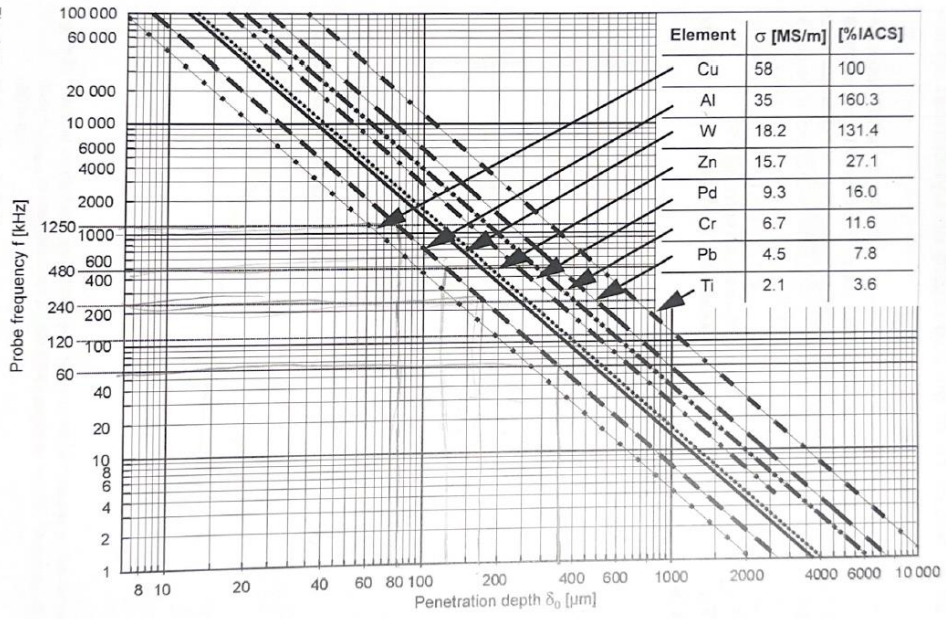
Şekil 3.9. Future-tech Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı.

Şekil 3.10’da verilen Fischer marka iletkenlik ölçüm cihazı kullanılarak proseslerde alınan numunelerin elektriksel iletkenlik değerleri de elde edilmiştir. 480 kHz frekansına ayarlanarak yüzeyden yaklaşık 150 μm derinliğe nüfuziyet sağlanarak değerler ölçülmüştür. Frekansa göre nüfuziyet grafiği Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.10. Fischer marka iletkenlik ölçüm cihazı.

Fig. A-1: Penetration depth δ_0 of the induced eddy currents as a function of the frequency f for various materials and their electrical conductivities σ .



Appendix

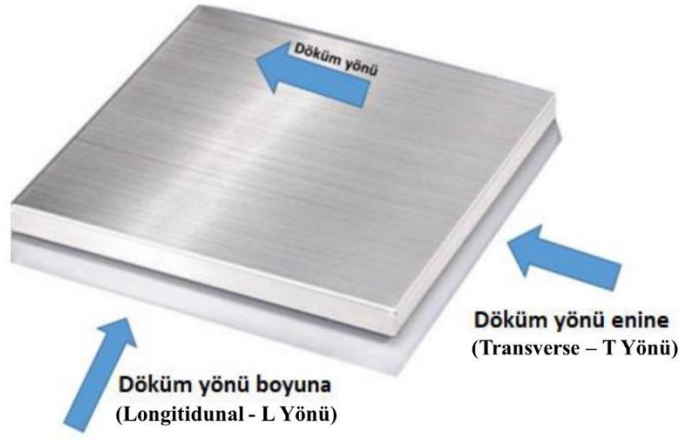
Şekil 3.11. Uygulanan frekansa göre yüzeyden nüfuziyet derinliği grafiği.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada bakır shell ile üretimin alüminyum 5005 alaşımının mikroyapı, mekanik ve elektriksel özellikleri üzerine etkisinin bulguları elde edilmiştir. Bunlara ilave olarak endüstriyel açıdan bakır shell ile 5005 alüminyum alaşımı üretimini etkileyen faktörler araştırılmıştır. Shell ömrü, hat hızı, prodüktivite, sarf edilen grafit miktarı, merdane baskıları ve tam tur çevrim dönüş hızları bakımından çelik ve bakır shell arasında ciddi farklılıklar bulunmaktadır. Bakır shell ile üretimde; hat hızı ve grafit miktarında 1.5 kat ve t/h/m cinsinden prodüktivitede yaklaşık %40-60 artış yakalanmıştır. Merdanelerin 1 tam tur dönüş hızları hat hızına paralel olarak 1.5 kat daha hızlı olarak kaydedilmiştir. 400 ton civarı alüminyum dökümü sonrasında merdane yüzeyinde başlayan mikro çatlaklar nedeniyle çelik shelle nazaran yaklaşık %66 daha kısa kullanım ömrüne sahip olduğu bulgusu elde edilmiştir. Rulo yüzey kalitesi ve kullanım ömrü açısından merdane baskıları bakır shell ile üretimde daha düşük tutulmuştur.

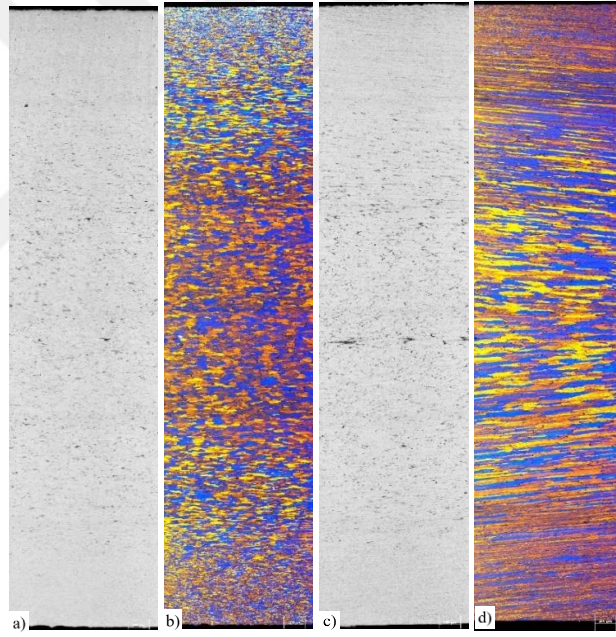
4.1. Mikroyapı İncelemeleri

Yapılan çalışmada mikroyapı görüntüleri döküm ya da haddeleme yönüne paralel ya da dik şekilde alınmıştır. Dik olarak görüntüleme alınması (longitudinal-L), paralel olarak görüntüleme alınması ise (transverse-T) tabirleri ile ifade edilmektedir. Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

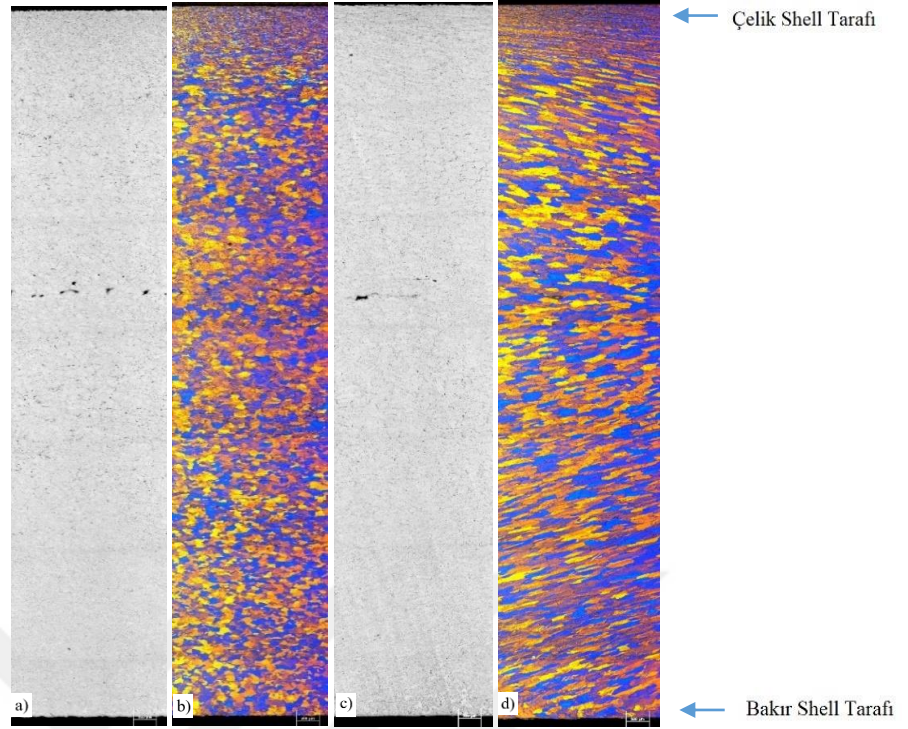


Şekil 4.1. Mikroyapı görüntülemesinde döküm ya da haddeleme yönüne göre numune hazırlama yönleri.

4.1.1. Döküm kalınlığında yapılan mikroyapı incelemeleri



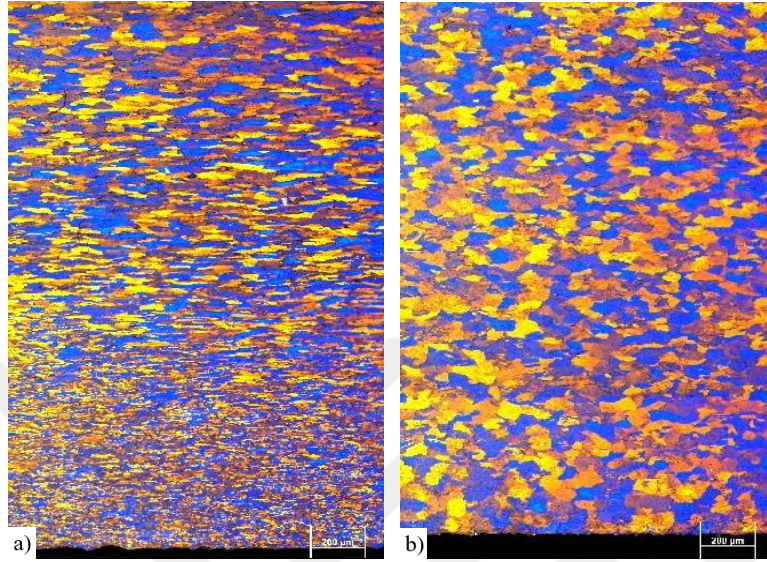
Şekil 4.2. Çelik / Çelik shell ile dökülen mikroyapı görüntüleri a) T yönü BF görüntüsü b) T yönü polarize görüntüsü c) L yönü BF görüntüsü d) L yönü polarize görüntüsü.



Şekil 4.3. Çelik / Bakır shell ile dökülen mikroyapı görüntüleri a) T yönü BF görüntüsü b) T yönü polarize görüntüsü c) L yönü BF görüntüsü d) L yönü polarize görüntüsü.

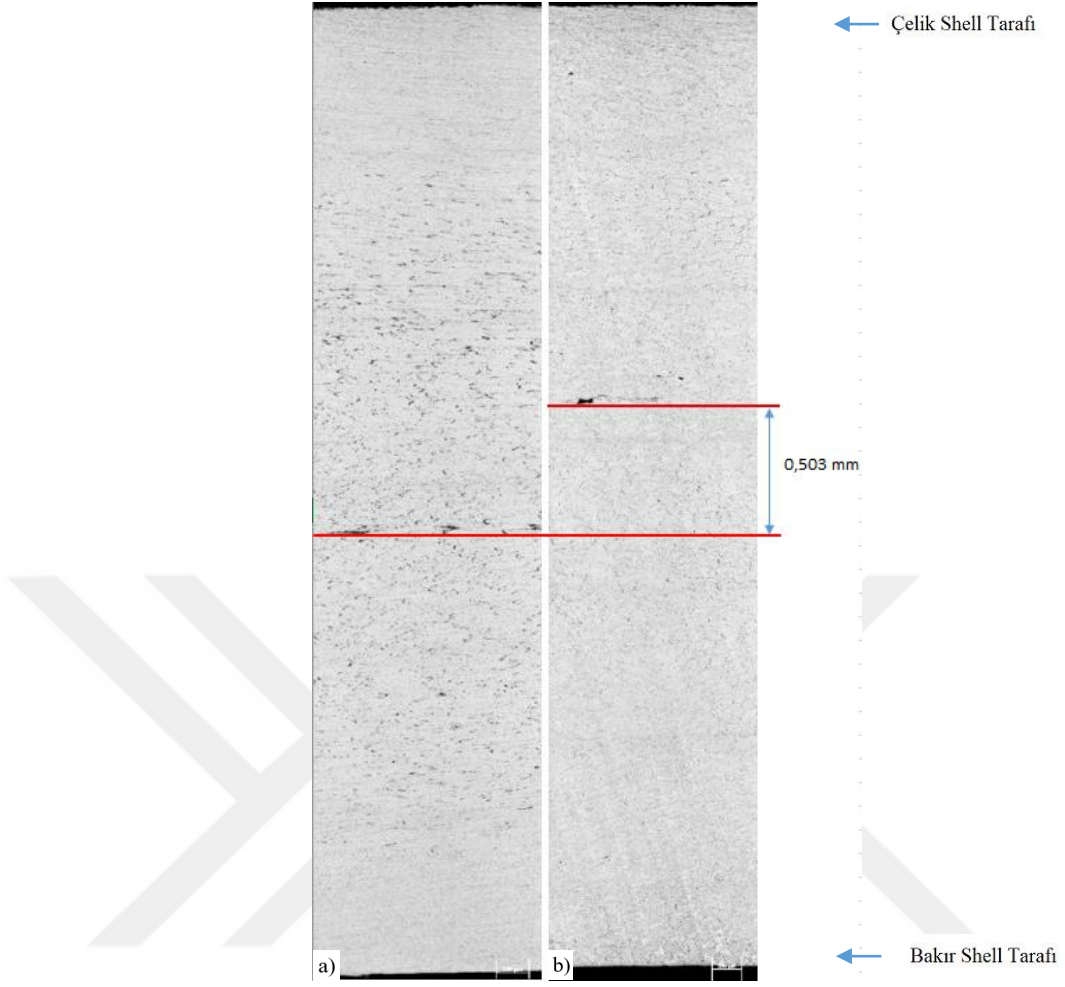
Şekil 4.2 ve 4.3'te döküm kalınlığındaki numunelerin BF ve polarize ışık altında alınan mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Hem çelik/çelik shell ile dökülen hem de çelik/bakır shell ile dökülen malzemelerde, ikiz merdaneli döküm yapısının kendine has karakteristiği olan tane uzamaları mevcuttur. Tane uzamaları Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te b ve d görüntülerinde açıkça görülmektedir. Bu tane uzamaları, iki merdanelinin arasında katılan alüminyum, prosesin de gerekliliği olarak bir miktar haddelemeden ötürü oluşmaktadır. Yine Şekil 4.2 ve 4.3'te b ve d görüntüleri incelendiğinde, merdanelere temas eden alt ve üst kısımlar oldukça hızlı katılaştığı için merkez bölgeye kıyasla daha ince taneli bir mikroyapı sergilemektedir. Merkez kısmın ise, nispeten daha iri taneli ve eş eksenli bir mikroyapıya sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.3'te alt kısımda bakır shell ile temas eden yüzeydeki tane yapısının, üst taraftaki çelik shell ile temas eden yüzeydeki tane yapısına nazaran daha eş eksenli ve iri taneli bir mikroyapı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu yapı farklılığı, bakır shellin alaşımlı çelik shelle nazaran daha iyi bir ısı iletkenliğe sahip olması sebebiyle daha hızlı bir katılma sergilemesi ve deformasyon etkisi ile kısmi dinamik rekristalizasyon gerçekleşmesi sonucunda meydana gelmiştir. Yüksek oranda aşırı doymuş bir

matristen dispersoidlerin çökmesinin bir sonucu olan bu durum, Zener Drag fenomeni olarak bilinmektedir [48]. Her iki shell ile dökülen malzemelerin merdanelere temas eden yüzeylerdeki yapı farklılıkları optik mikroskop altında polarize olarak görüntülenmiş ve Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Dökme alüminyum levhaların farklı shell ile temas eden yüzeylerinin optik mikroskopta alınmış polarize görüntüleri a) çelik shell b) bakır shell.

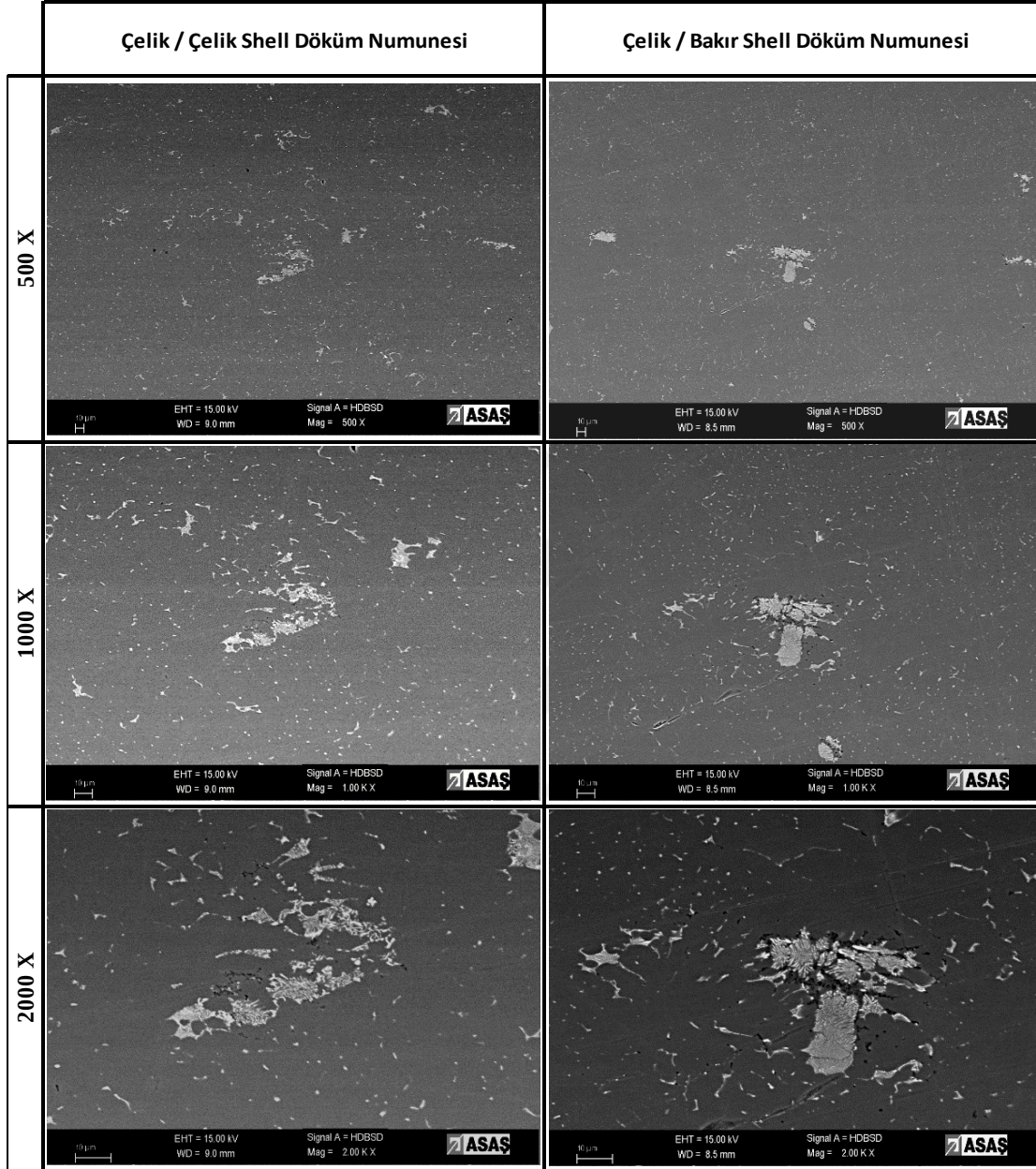
Şekil 4.5.'te döküm kalınlığındaki numunelerin L yönünden BF görüntülerine bakıldığında, ikiz merdaneli döküm yönteminin en büyük problemlerinden birisi olan merkez hattı segregasyonunun önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Buna ilave olarak merkez hattı segregasyonu, çelik/çelik shell ile dökülen numunede merkezde iken, çelik/bakır shell ile dökülen numunede merkezden 0,503 mm kadar çelik shell tarafına ötelenmiştir. Bakır shell ile dökümde daha yüksek bir katılaşma oranının elde edilmesi, intermetaliklerin çökmesini engelleyerek daha aşırı doymun bir matris oluşmasını sağlamaktadır. Böylece, bakır shell tarafında intermetaliklerin oluşumunu engellenmesi sonucu merkez hattı segregasyonu olarak bilinen intermetalik çökelmeleri çelik shell yüzeyine doğru ötelenmiştir. Ayrıca Şekil 4.5 b görüntüsüne bakıldığında intermetaliklerin çelik shell yüzeyinde fazlaca olduğu, bakır shell yüzeyinde ise çok az miktarda olduğu açıkça görülmektedir.



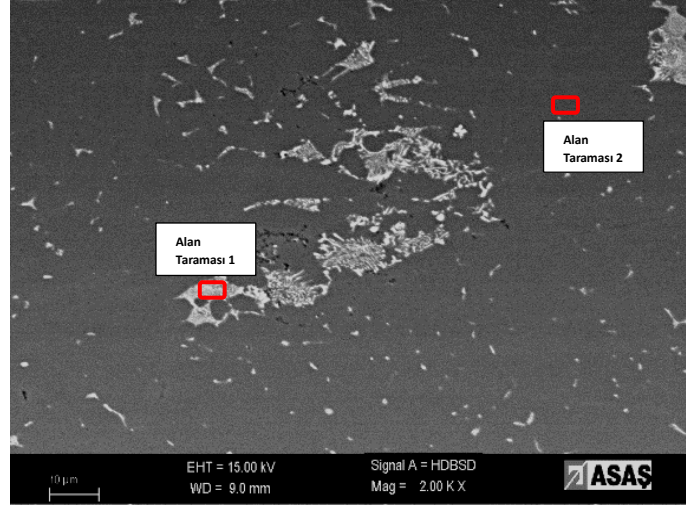
Şekil 4.5. a) Çelik/çelik shell b) Çelik/bakır shell L yönünden BF görüntüleri ve MHS konumları.

Merkez hattı segregasyonu (MHS)'nin detaylı incelenmesi adına SEM görüntüleri ve EDS alan tarama analizleri alınmıştır. 500X, 1000X ve 2000X büyütmede alınan SEM görüntüleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

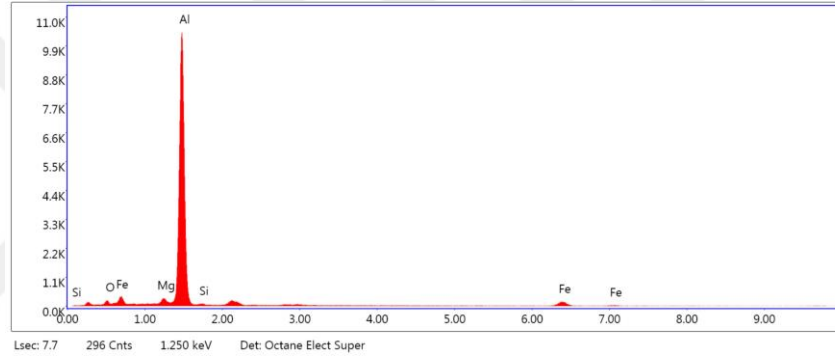
Tablo 4.1. 500X, 1000X ve 2000X büyütme oranında alınan SEM görüntüleri.



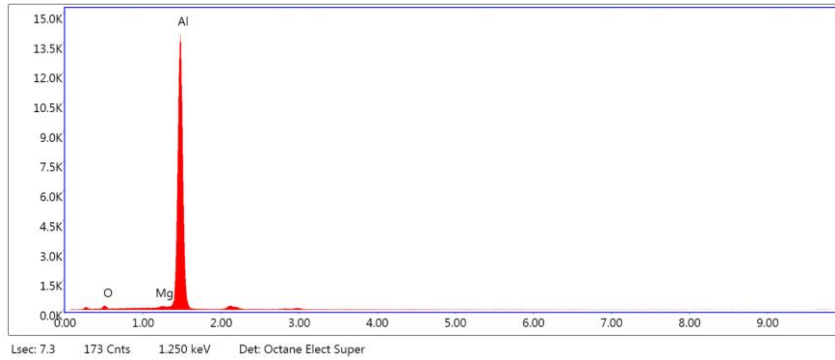
Çelik/çelik shell çifti ile dökülen Şekil 4.6'da görüntüsü verilen numunede intermetalik üzerinden ve matristen alan taraması alınmış ve Şekil 4.7 ve 4.8'de grafikleri ve bunlara ait Tablo 4.2'de sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.6. Çelik/çelik shell çifti ile üretilen döküm numunesinde MHS’den alınan SEM görüntüsü ve alan taramaları.



Şekil 4.7. Alan taraması 1’e ait EDS grafiği (Çelik/çelik shell çifti).

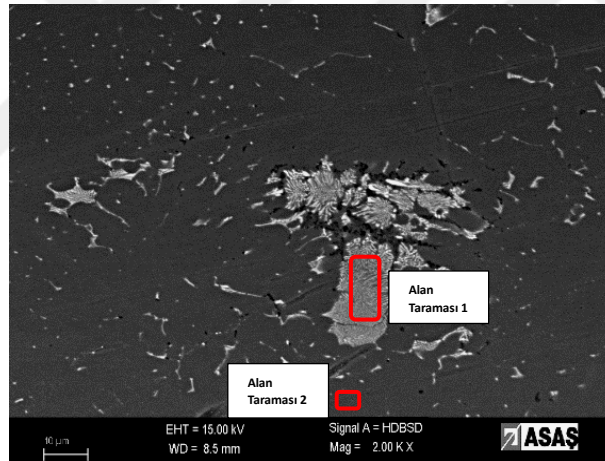


Şekil 4.8. Alan taraması 2’ye ait EDS grafiği (Çelik/çelik shell çifti).

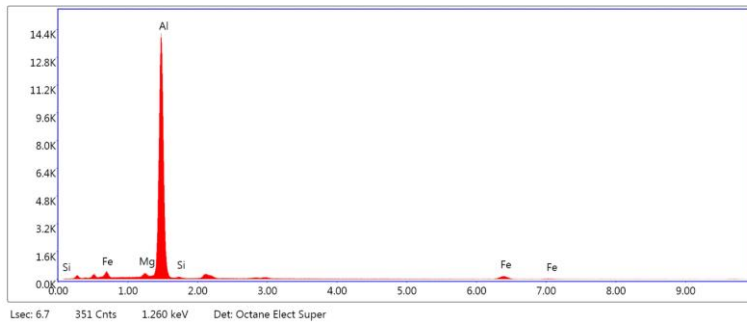
Tablo 4.2. EDS alan taraması 1 ve 2’de pik veren elementler ve % ağırlıkça oranları (Çelik/çelik shell çifti).

Element	Alan taraması 1 % ağırlıkça	Alan taraması 2 % ağırlıkça
O	1,75	1,76
Mg	2,20	1,24
Al	83,11	97,00
Si	1,14	-
Fe	11,81	-

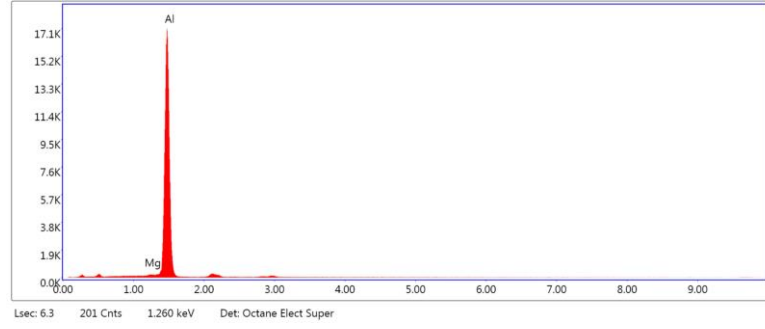
Çelik/bakır shell çifti ile dökülen Şekil 4.9’da görüntüsü verilen numunede intermetalik üzerinden ve matristen alan taraması alınmış ve Şekil 4.10 ve 4.11.’de grafikleri ve bunlara ait Tablo 4.3.’de sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.9. Çelik/bakır shell çifti ile üretilen döküm numunesinde MHS’den alınan SEM görüntüsü ve alan taramaları.



Şekil 4.10. Alan taraması 1’e ait EDS grafiği (Çelik/bakır shell çifti).



Şekil 4.11. Alan taraması 1'e ait EDS grafiği (Çelik/bakır shell çifti).

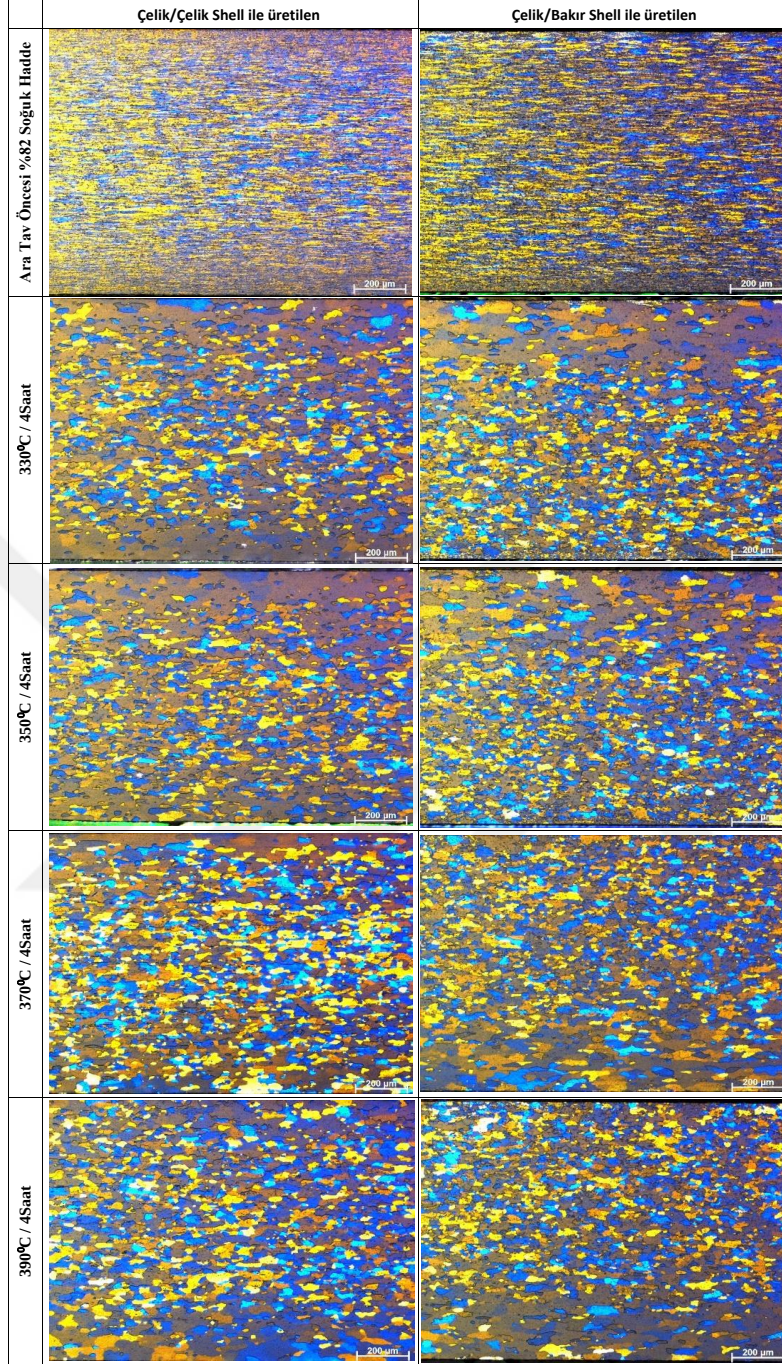
Tablo 4.3. EDS alan taraması 1 ve 2'de pik veren elementler ve % ağırlıkça oranları (Çelik/çelik shell çifti).

Element	Alan taraması 1 % ağırlıkça	Alan taraması 2 % ağırlıkça
Mg	1,76	1,07
Al	87,25	98,93
Si	1,19	-
Fe	9,80	-

Hem çelik/çelik hem de çelik/bakır shell çiftlerinde döküm numunelerinden alınan SEM EDS alan taramalarında, 1 no'lu alan taramaları intermetaliklerden, 2 no'lu alan taramaları matrislerden alınmıştır. Matris malzemesinde ağırlıklı olarak Al ve bir miktar Mg ihtivasi 5005 alaşımının karakteristiğidir. Alan taraması 1'de çıkan Fe, Si ve O ise malzemede MHS olarak ihtiva olan intermetaliklerin bileşim yüzdelerini ifade etmektedir.

Çelik/çelik shell çifti ile dökülen numunede, demir %11.81 iken, çelik/bakır shell çifti ile dökülen numunede ise %9.80'e, magnezyum içeriği 2.20'den 1.76 oranlarına düştüğü tespit edilmiştir. Yine çelik/çelik shell çiftinde hem matriste hem de intermetalik içerisinde oksijen ihtiva olurken, çelik/bakır shell çifti ile dökülen numunelerde oksijen mevcudiyetine rastlanılmamıştır. Silisyum oranı ise her iki numunede de aynı oranda kaldığı tespit edilmiştir.

4.1.2. Ara tav uygulaması mikroyapı incelemeleri



Şekil 4.12. Hem çelik/çelik hem de çelik/bakır shell ile dökülen numunelerin ara tav öncesi-sonrası polarize mikroyapı görüntüleri.

%82 deformasyon oranı ile soğuk haddelenen numunelere 330, 350, 370 ve 390°C olmak üzere 4 farklı sıcaklıkta 4'er saat ara tav uygulanmıştır. Hem çelik/çelik hem de çelik/bakır ile dökülen numunelerin tav öncesi (sertleşmiş) ve tav sonrası mikroyapıları Şekil 4.12'de verilmiştir.

Soğuk deformasyon oranı ile tav sıcaklığı ve süresi arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Yeniden kristallenme (rekristalizasyon) tavında, haddeleme etkisi sayesinde yapı içerisinde absorplanan enerji miktarı kritik öneme sahiptir. % Soğuk deformasyon oranı yüksek uygulanması halinde, yapı içerisinde hapsolan enerji miktarı yüksek olacağından ötürü tav esnasında tanelerin rekristalize olabilmesi için düşük sıcaklık yeterli olacaktır.

Çelik/çelik shell ile dökülen numunelerde ara tav sonrası yüksek deformasyon oranına rağmen, 4'er saat uygulanan 330 ve 350°C ara tavlarında, merkez bölgede eş eksenli taneler olmasına rağmen, yüzey ve merkez bölgeler arasında heterojen bir tane yapısı olduğu için rekristalizasyon için yeterli gelmediği görülmüştür. 4 saat ve 370°C ara tav uygulamasında ise, yüzeye yakın tanelerin de rekristalize olduğu ve yapının daha homojen eş eksenli bir hale büründüğü görülmektedir. 4 saat ve 390°C uygulanan ara tav, yüksek tav sıcaklığından ötürü rekristalize olmuş küçük tanelerin yeniden yapı içerisinde çözünerek büyük taneciklere difüze olmasıyla tane büyümesine sebep olmuştur. Ostwald kabalaşması mekanizmasıyla bu durum açıklanabilmektedir [49].

Çelik/bakır shell ile dökülen numunelerde ara tav sonrası merdanelere temas eden alt ve üst yüzeydeki tane boyut farkı bulguları tüm ara tav sıcaklıklarında görülmüştür. Ara tav sonrasında en dış yüzeylerdeki tane büyümesi, alaşımdan bağımsız olarak TRC yönteminde görülen tipik bir durumdur. Şekil 4.12'de çelik/çelik shell ile dökülen malzemede 370°C'de 4 saat ara tav görmüş numunenin mikroyapısı ile, çelik/bakır shell çifti ile üretilen, 350°C ve 4 saat ara tav görmüş numunenin mikroyapılarında benzerlik mevcuttur. Bakır shell etkisi ile döküm esnasında dinamik rekristalize olan tanelerden ötürü, tav esnasında daha düşük sıcaklıkta toparlanma ve yeniden kristallenme fazlarını tamamladığı çıkarımı yapılabilmektedir.

4.2. Mekanik Özellik İncelemeleri

4.2.1. Çekme testleri

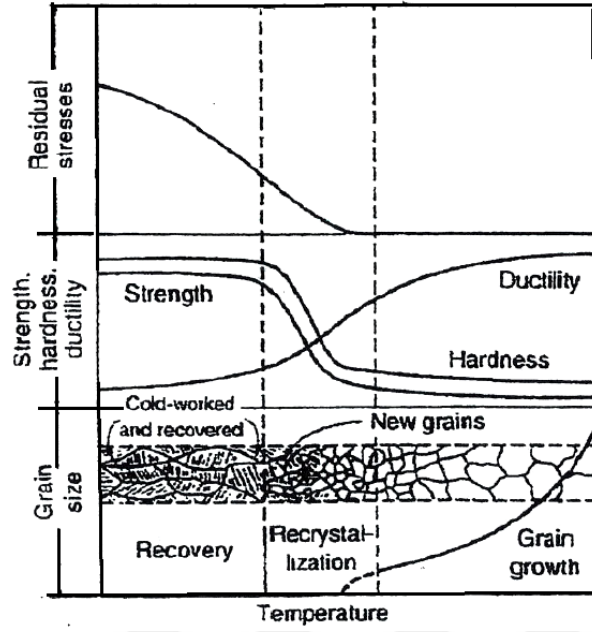
Mekanik özelliklerin incelenmesi adına her proseste çekme testleri ve kesitten mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Döküm halindeki numunelerden, %82 soğuk deformasyon oranı ile haddelenmiş numunelerden, 4 saat ve 330, 350, 370 ve 390°C

olmak üzere farklı sıcaklıklarda ara tavlı numunelerden ve nihai kalınlığına indirilmiş numunelerden testler yapılmıştır. Test sonuçları aşağıdaki Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. Farklı aşamalarda uygulanmış çekme test sonuçları.

Numune	Numune Yönlü°	Akma %0,2 MPa		Çekme MPa		Uzama (%)	
		St/St Shell	St/Cu Shell	St/St Shell	St/Cu Shell	St/St Shell	St/Cu Shell
Döküm kalınlığı	0°	103	127	133	148	13,5	6,4
	90°	107	129	135	156	10,9	11,6
Ara tav öncesi	0°	222	250	228	256	3,2	2,6
	90°	228	250	238	264	3,3	3,5
330°C / 4 saat	0°	49	54	107	109	24,8	22,7
	90°	50	53	107	108	28,5	22,3
350°C / 4 saat	0°	49	53	106	109	23	25,1
	90°	53	51	108	107	26,8	24,3
370°C / 4 saat	0°	56	55	108	110	24,3	25,3
	90°	53	52	108	108	30,6	26,3
390°C / 4 saat	0°	50	53	108	109	26,3	21,5
	90°	53	52	109	109	28	27,5
330°C / 4 saat ara tav sonrası	0°	165	167	166	169	0,7	0,8
%50 soğuk deformasyon ile nihai kalınlıkta	90°	173	172	177	178	0,4	0,6
350°C / 4 saat ara tav sonrası	0°	165	167	165	169	0,3	0,6
%50 soğuk deformasyon ile nihai kalınlıkta	90°	176	175	181	180	0,6	0,6
370°C / 4 saat ara tav sonrası	0°	166	169	167	171	0,6	1,9
%50 soğuk deformasyon ile nihai kalınlıkta	90°	177	178	178	182	0,3	0,5
390°C / 4 saat ara tav sonrası	0°	164	171	165	173	0,4	0,9
%50 soğuk deformasyon ile nihai kalınlıkta	90°	176	181	178	184	0,3	0,4

Soğuk işlem görmüş malzemenin hem fiziksel hem de mekanik özelliklerinde bazı değişiklikler meydana gelir. Malzemeye uygulanan plastik deformasyon sonucunda mukavemet, sertlik ve elektriksel direnç artar. Ancak süneklik azalır. Bu durumda malzeme plastik deformasyona devam edemeyecek duruma gelir. Bunun nedeni şekil başlangıcında 10^{10-12} m/mm³ civarında olan dislokasyon yoğunluğunun plastik deformasyon sonrasında 10^{16} m/mm³e ulaşmasıdır. Her dislokasyon bir kristal kusuru olduğundan, kendi ortamında kafes gerilimleri üretir ve böylece depolanan enerjiye önemli ölçüde katkıda bulunur. Artan kafes gerilimleri metaldeki gerinim enerjisindeki artışla ilişkilidir [50]. Plastik deformasyonun devam etmesi için tavlama uygulanır. Tavlama sırasında malzeme mikro yapısında sırasıyla toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi olarak tanımlanan üç olay meydana gelir. Tavlama sonrasında sertlik azalır, süneklik artar ve malzeme yeniden şekillendirilebilir hale gelir. Bu durum aşağıdaki Şekil 4.13’de grafiksel olarak gösterilmektedir [51].



Şekil 4.13. Tavlama sıcaklığının sertlik, mukavemet ve süneklik üzerine etkisi [51].

Hem döküm kalınlığında hem de %82 soğuk deformasyon oranı ile soğuk haddelenen tav öncesi numunelerin çekme sonuçlarında bakır/çelik shell ile dökülen levhaların akma ve çekme mukavemet değerleri çelik/çelik shell ile dökülen levhaya göre yüksek çıkmıştır. İçerisinden su geçirilerek soğutulan merdanelerde bakır shellin termal iletkenliğinin yüksek olması itibariyle daha ince ve eşeksenli mikroyapıya sahip olduğundan mütevellit mukavemet değerleri üstün olduğu görülmektedir.

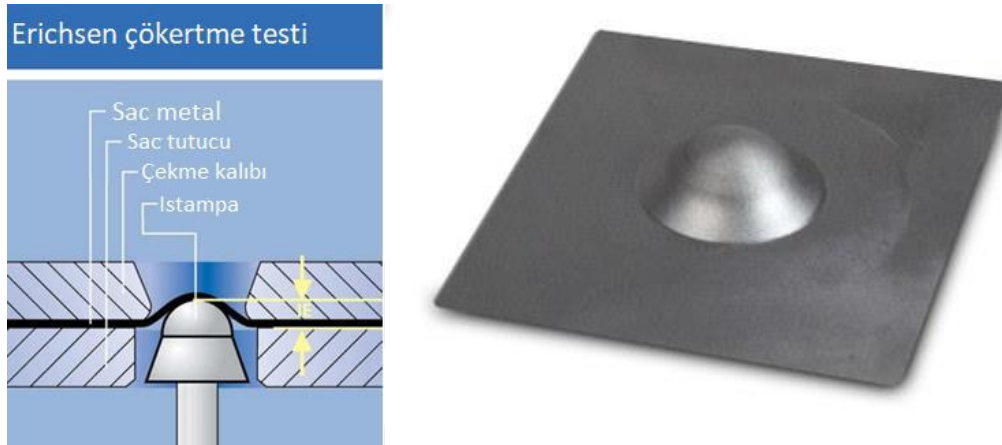
Farklı sıcaklıklarda tavllanmış levhaların tav sonrasında alınan numunelerine yapılan çekme testleri incelendiğinde ise mukavemet değerlerinde belirgin bir fark görülmemiştir.

Nihai kalınlığa indirilen levhaların çekme testi sonuçları, 350⁰C'nin üzerindeki tavlama sıcaklıklarında St/St kabuk çifti ile üretilen numunelerin mukavemet değerlerinde önemli bir kayıp olduğunu ortaya koymuştur. St/Cu kabuk çifti ile üretilen numunelerin tavlama sonrasında, nihai kalınlık numunesi çekme testi sonuçları, tavlama sıcaklığıyla doğru orantılı olarak artmıştır. St/St tarafında ise 330, 350 ve 370⁰C'de çekme mukavemeti değerleri tavlama sıcaklığı ile doğru orantılı olarak artmasına rağmen, 390⁰C'de çekme mukavemeti değerinde bir miktar azalma görülmüştür. Döküm yapısından kaynaklanan daha ince ve eş eksenli mikroyapı nedeniyle daha fazla tane sınırı içeren St/Cu kabuk çifti ile oluşturulan numunenin, tavlama sonrasında daha düzgün yeniden kristalleştiği için daha yüksek

şekillendirilebilirlik kabiliyetine sahip olduğu Tablo 4.4'teki % uzama değerlerinden açıkça görülebilmektedir.

4.2.2. Erichsen çökertme testleri

Levhelerde maksimum derin çekilebilme özelliğini mesafe bakımından ölçebilmek amacıyla endüstride yaygın olarak Erichsen çökertme deneyi uygulanmaktadır. Mekanik muayene amacıyla uygulanan bu teste ait düzeneğin şematize resmi ve çökertilmiş numune görselleri Şekil 4.14'de verilmiştir.

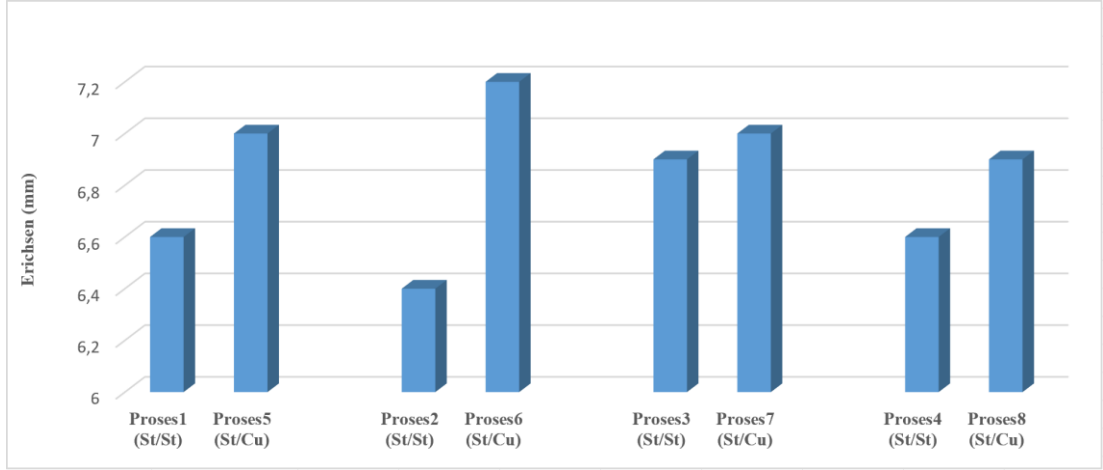


Şekil 4.14. Erichsen test düzeneği ve test uygulanmış numune örnek görselleri [52].

Bu çalışmada, numuneler hazırlanarak, Zwick/Roell çekme test cihazına Erichsen çökertme ara aparatı vasıtasıyla uygulanmıştır. Test esnasında numunelerin yırtıldığı andaki kuvvete tekabül eden derinlik olarak belirlenme ve mm cinsinden ifade edilmektedir. Aşağıdaki Tablo 4.5'de proses 1 – 8 için EN ISO 20482 standartlarına göre uygulanmış Erichsen test sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.5. Proses 1 – 8 için nihai numunelere uygulanmış Erichsen test sonuçları.

Rota	Erichsen Sonuçları (mm)	
	St/St	St/Cu
330 ⁰ C / 4saat ara tavlı nihai kalınlık numunesi	6.6	7
350 ⁰ C / 4saat ara tavlı nihai kalınlık numunesi	6.4	7.2
370 ⁰ C / 4saat ara tavlı nihai kalınlık numunesi	6.9	7
390 ⁰ C / 4saat ara tavlı nihai kalınlık numunesi	6.6	6.9



Şekil 4.15. Proseslere ait Erichsen test sonuçları grafiği.

Erichsen test sonuçları incelendiğinde, birbirlerine çok yakın değerler elde edilmiştir. Sıralama yapıldığında ise, Proses 2 < Proses 1 = Proses 4 < Proses 3 = Proses 8 < Proses 5 = Proses 7 < Proses 6 olarak görülmektedir.

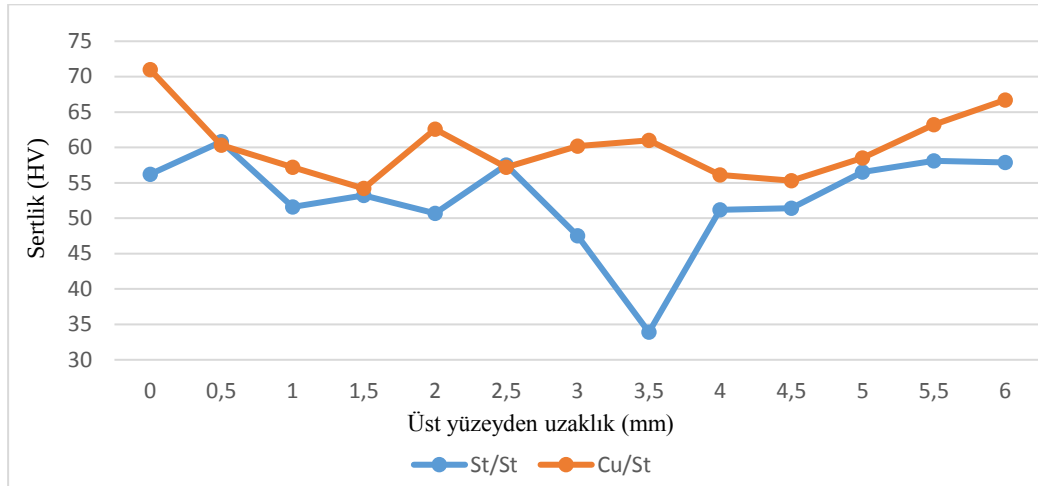
Sonuçlara göre, ara tav uygulamalarında 390°C ve 4 saat uygulanan numunelerin hepsinde diğer numunelere nazaran dramatik bir düşüş görülmüştür. Bu durum ara tav sıcaklığının diğer proseslere nazaran daha yüksek olması itibarıyla tane büyümesi sonucu yaşanmıştır.

Erichsen değeri en düşük proses 2 numunesi olduğu görülmüştür. Çelik/çelik shell ile dökülmesi sebebiyle, bakır/çelik shelle kıyasla, daha kaba taneli mikroyapıya sahip olmasından ve tavlama esnasında yeterince rekristalize olamamasından ötürü kaynaklanmaktadır.

Çelik/çelik shell ile dökülen numunelerde uygulanan prosesler sonucu en yüksek Erichsen değeri 370°C ve 4 saat olarak uygulanmış 6,9 mm ile proses 3 numunesinden alınmakta iken, çelik/bakır shell ile dökülen numunelerde, 350°C ve 4 saat olarak uygulanan ve 7,2 mm sonucu elde edilen proses 6 numunesinden alındığı görülmektedir. Bu durumun sebebi, çelik/bakır shell ile dökülen numunelerde, bakırın ısıyı iletim katsayısı daha yüksek olması itibarıyla, döküm esnasından yaşanan kısmi dinamik rekristalizasyon ve daha hızlı katılaşma sağlanmasıyla birlikte matrisin alaşım elementlerince doyurulmasından ötürü meydana gelen dispersiyon sertleşmesiyle mümkün olduğu kanısına varılmıştır [63, 64].

4.2.3. Sertlik testleri

Çelik/Çelik ve Çelik/Bakır shell çiftleri ile dökülen malzemelerin Vickers cinsinden kesitleri boyunca (L yönü) mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Aşağıda bulunan Şekil 4.16 ve Tablo 4.6 ‘da sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.16. Her iki shell numunelerinden L yönünde kesit boyunca alınan sertlik ölçümleri grafiği.

Tablo 4.6. Çelik/çelik ve çelik/bakır shell çiftlerinde her iki yüzeylerden alınan sertlik değerleri.

	Shell Tipi	Sertlik (HV)
St/St	St tarafı (üst yüzey)	57.9
	St tarafı (alt yüzey)	56.2
St/Cu	St tarafı (üst yüzey)	66.7
	Cu tarafı (alt yüzey)	71.0

Alınan Vickers sertlik ölçümlerine göre, bakır shell ile temas eden yüzeyde sertlik 71 HV iken, çelik shell ile temas eden yüzeylerde 57.9 – 66.7 HV değerleri elde edilmiştir. Bakır shell tarafında sertlikte yaklaşık %27’lik bir artış miktarı yakalanmıştır.

Hızlı katılaşma ile aşırı doymuş bir matris elde etmek mümkündür. Özellikle TRC yönteminde hızlı katılaşma sağlanarak önemli bir sorun olan merkez hattı segregasyonu azaltılır ve aşırı doymuş bir matris elde edilir [65, 66]. Aşırı doymuş bir matris, ana alaşım elementlerinin matris içinde homojen bir şekilde çözündüğü anlamına gelir. Matris doymunluğunun artmasıyla, farklı atomların neden olduğu kafes bozulması daha belirgin hale gelir. İkincil dendrit kolları arasındaki yoğunluk artarak

dislokasyonların hareketi ve kayması engellenir. Bu nedenle sertlikte artış meydana gelmektedir [53].

Bakır shell tarafında, çelik shelle nazaran dramatik bir sertlik artışı elde edilmiştir. Ayrıca Çelik/bakır shell çifti ile dökülen malzemelerde, Çelik/çelik shell çifti ile dökülen numuneye kıyasla daha yüksek sertlik ölçüm sonuçları vermiştir.

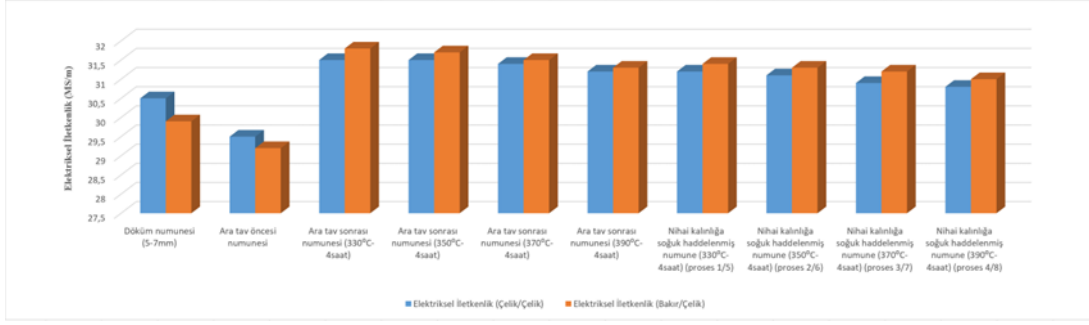
4.2.4. Elektriksel iletkenlik testleri

Proses 1 – 8 olan tüm numunelere elektriksel iletkenlik testleri uygulanmıştır. MS/m birimlerindeki sonuçlar ve grafikler Tablo 4.7 ve Şekil 4.17'de verilmiştir. Tablo 4.7'de ilk değer ile son değer arasındaki farkın ilk değere bölünmesiyle "% Değişim" değerleri yüzde olarak hesaplanmaktadır. Ayrıca bu hesaplama Denklem 4.1'de açıklanmaktadır.

$$\% \text{ Değişim} = \frac{[MS/m_{(St/St)}] - [MS/m_{(St/Cu)}]}{[MS/m_{(St/St)}]} \times 100 \quad (4.1.)$$

Tablo 4.7. 480 kHz frekansında MS/m cinsinden alınan elektriksel iletkenlik sonuçları.

Rota	Elektriksel İletkenlik (MS/m)		
	St/St	St/Cu	% Değişim
Döküm Kalınlığı	30.5	29.9	2%
Tav öncesi haddelenmiş	29.5	29.2	1%
330°C / 4 saat tav sonrası	31.5	31.8	-1%
350°C / 4 saat tav sonrası	31.5	31.7	-0.6%
370°C / 4 saat tav sonrası	31.4	31.5	-0.3%
390°C / 4 saat tav sonrası	31.2	31.3	-0.3%
Nihai kalınlık (330°C/4saat)	31.2	31.4	-0.6%
Nihai kalınlık (350°C/4saat)	31.1	31.3	-0.6%
Nihai kalınlık (370°C/4saat)	30.9	31.2	-1.0%
Nihai kalınlık (390°C/4saat)	30.8	31	-0.6%



Şekil 4.17. Çelik/çelik ve çelik/bakır shell numunelerinin kıyaslamaları elektriksel iletkenlik grafikleri.

Matris aşırı doygunluğu arttıkça elektriksel iletkenliğinin ters orantılı olarak azaldığı bilinmektedir [54]. Tablo 4.7'ye bakıldığında, St/Cu kabuk çifti kullanılarak üretilen döküm numunesinde minimum elektriksel iletkenlik değeri elde edilmiştir. Bakır shell tarafında elde edilen bu düşük elektrik iletkenliği sonucu, matrisin aşırı doygun olduğunu ve dispersiyon yaşandığını doğrulamaktadır. Ayrıca döküm ve tavllanmış numunelerin elektriksel iletkenlik değerleri incelendiğinde St/Cu kabuk çifti ile üretilen numunelerin tavllanmış (31,5-31,8 MS/m) ve döküm halindeki (29,9 MS/m) olduğu görülmektedir. Bu durum St/Cu kabuk çifti ile üretilen numunenin daha yüksek çökelme potansiyeli vaat ettiğini kanıtlamaktadır. St/St ve St/Cu kabuk ile üretilen numunelerin tüm rotalarında elde edilen sonuçlara göre %2 farkla en belirgin değişimin döküm halindeki numuneler olduğu görülmüştür. Bakır kabuk kullanılan döküm numunesinde aşırı doygunluk miktarının yüksek ve elektriksel iletkenlik değerinin minimum olduğu sonucuyla örtüşmektedir.

Çelik shell ile üretilen numunelerde, bakır shell numunelerine nazaran, merkez hattı segregasyonunda intermetalik fazlar bakımından zengin olduğu BF ve SEM görüntülerinde açıkça görülmüştür. Bakır shell numunelerinde döküm kalınlığında düşük çıkan elektriksel iletkenlik değerleri, tav sonrasında yapılan ölçümlerde çelik shell numunelerine göre bir miktar daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, aşırı doygun bir çözeltide intermetaliklerin matris içerisine daha homojen ve daha küçük boyutlu olarak yayılması sonucunda iletkenlik artışına sebep olmuştur. Dispersiyon ile matris içerisine daha homojen ve küçük boyutlarda dağılan parçacıklar, iletkenlik mekanizmasının önünde daha düşük seviyede engel teşkil etmesinden ötürü elektriksel iletkenliğin artmasını teşvik edeceği bilinmektedir [55]. Meydana gelen bu iletkenlik artışı, dispersiyon gerçekleştiğini kanıtlar niteliktedir [56].

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada çelik/çelik ve çelik/bakır olmak üzere 2 farklı shell ile ikiz merdaneli döküm yöntemi ile üretilmiş 5-7 mm arası kalınlıkta levhalar kullanılmıştır. Bu levhalara 8 farklı rota çizilmiş ve bu numunelerin mikroyapıları, mekanik özellikleri ve üretim parametreleri üzerine araştırmalar yapılmıştır.

5.1. Üretim Parametreleri İnceleme Sonuçları

Üretim parametreleri olarak aşağıda maddelenen farklılıklar elde edilmiştir.

- a) Bakır shellin, alaşımlı çelik shelle nazaran daha yüksek termal iletkenliğe sahip olması sebebiyle üretim esnasında daha hızlı ısı transferi gerçekleştirdiği için shell yüzeyinde daha erken tonajda mikro çatlaklar meydana gelmiştir. Çelik shellin tornalanmadan yaklaşık ortalama 1200 ton üretim kapasitesi varken, bakır shellde ise bu durum 400 ton civarında görülmüştür. Bakır shellin kullanım ömrü %66 daha kısa olduğu kanısına varılmıştır.
- b) Termal iletkenlik katsayısı yüksek olan bakır shell, döküm esnasında hızlı ısı transferini mümkün kılabilirdiği için yaklaşık 1.5 kat daha hızlı döküm gerçekleştirilmiştir. Bu da t/h/m cinsinden ifade edilen prodüktivite değerini %40-60 arasında arttırmıştır.
- c) Hat hızının artmasıyla paralel olarak döküm esnasında merdane yüzeyine püskürtülen ve ayırıcı ajan görevi üstlenen grafit miktarı da doğru orantılı olarak %50 daha fazla tüketilmiştir. Merdane yüzeyinde ve levhada herhangi bir yapışma izine rastlanmamıştır.
- d) Üretim esnasında bir diğer önemli parametre olan merdane baskılarıdır. Yüksek ısı transferi ve yüksek hat hızı ile üretim imkanı sağlayan bakır shell tarafında, hızlı katılaşmaya bağlı olarak bant izleri görülmüştür. Bant izlerini elimine edebilmek amacıyla merdane baskıları çelik shelle nazaran daha düşük tutulmuştur.

- e) Üst merdanede alaşımlı çelik, alt merdanede ise bakır shell kullanılarak yapılan üretimde ise, bakır shell tarafında hızlı katılaşma olmasından mütevellit merdane dönüş hızları da farklılık göstermiştir. Merdanelerin 1 tam tur çevrim dönüş süresi incelendiğinde, çelik shell bakır shelle kıyasla yaklaşık 1.5 kat daha uzun sürmektedir.

5.2. Mikroyapı İncelemeleri Sonuçları

8 farklı rota çizilen numunelerin mikroyapıları optik mikroskop altında incelenmiş olup, sadece döküm kalınlığındaki numunelerden SEM EDS alan analizi alınmıştır. Mikroyapı sonuçları aşağıda maddelenmiştir.

- a) Döküm kalınlığında optik mikroskop altında incelenen numunelerde, bakır shell tarafında çelik shell tarafına nazaran daha iri tanelere rastlanmıştır. Bunun sebebi ise yüksek ısı transferi ile hızlı katılaşma esnasında bir miktar haddeleme kuvveti ile de desteklenerek meydana gelen dinamik yeniden kristallenmeye dayanmaktadır.
- b) Döküm kalınlığında alınan BF görüntülerinde, bakır shell ile dökülen numunelerde merkez hattı segregasyonunun azaldığı ve üst merdanedeki çelik shell tarafına doğru ötelendiği görülmüştür.
- c) Döküm kalınlığında alınan BF görüntülerinde, bakır shell tarafında intermetaliklerin çelik shelle nazaran ciddi oranda azaldığı sonucu elde edilmiştir. Hızlı katılaşma ile daha doymuş bir çözelti içerisinde bulunan alaşım elementleri, intermetalik faz oluşturmamış ve matris içerisinde hapsolmüştür.
- d) Döküm kalınlığında SEM ile incelenen numunelerde hem intermetalikler hem de matris üzerinden farklı noktalarda EDS alan tarama analizleri alınmıştır. EDS analizlerinde intermetaliklerin % ağırlıkça oranı bakır shell ile üretilen levha numunelerinde daha düşük olduğu sonucu elde edilmiştir. Beklenildiği üzere, ters orantılı olarak, bakır shell numunelerinde matristeki alüminyum % ağırlıkça oranı daha yüksek çıkmıştır.
- e) 4 farklı sıcaklıkta yapılan ara tav sonuçlarında, bakır shell ile üretilen numunelerde 350°C'de rekristalizasyonu tamamlarken, çelik shell ile üretilen numuneler 370°C'de rekristalizasyonu tamamladığı görülmüştür. Bu durum

döküm esnasında dinamik rekristalizasyon yaşanmasının, ara tav süresini hızlandırmasının bir sonucu olarak görülmüştür.

5.3. Mekanik Özellikler İnceleme Sonuçları

Bu çalışmada yapılan 8 farklı rotaya ait numunelerin mekanik özellikleri araştırılmış olup, çekme testleri, Erichsen testleri ve kesitten mikrosertlik testleri uygulanmıştır. Bulgulara göre;

- a) Çekme testi sonuçlarında döküm kalınlığındaki bakır shell numunesinin çelik shell numunelerine kıyasla, akma mukavemetinin %23.3 ve çekme mukavemetinin %11.3 artış gösterdiği görülmüştür. Ara tav sonrasında numunelerin akma ve çekme sonuçları benzerlik göstermiştir.
- b) Ara tav sonrası uygulanan soğuk deformasyon sonucunda bakır shell numunesinde 350⁰C’de alınan akma ve çekme mukavemeti sonuçları, çelik shell numunelerinde 370⁰C’de tavllanmış numune ile neredeyse aynı değerler yakalanmıştır. Bu sonuçlar döküm esnasında yaşanan dinamik rekristalizasyonu kanıtlar nitelikte bulgular elde edilmesini sağlamıştır.
- c) Erichsen testleri her rotadaki numunelere uygulanmış olup, Şekil 4.17.’de bulunan grafikçe açıkça görülebileceği üzere, bakır shell ile üretilen numunelerin tüm rotalarında çelik shell ile üretilenlere kıyasla şekillendirilebilirlik özelliği bariz bir şekilde artmıştır.
- d) Döküm kalınlığındaki numunelerin kesitlerinden (L yönünden) kesit boyunca Vickers mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Özellikle çelik/çelik shell ile dökülerek üretilen numunede her iki yüzeyde de 56-58 HV aralığında ölçümler yakalanırken, çelik/bakır shell ile dökülerek üretilen numunede çelik tarafı 66 ve bakır tarafı ise 71 HV değerlerine ulaştığı görülmüştür. Alaşım elementi bakımından zengin ve aşırı doygun matris bulunduran bakır shell numunelerinin, çelik shell numunelerine nazaran sertlik değerlerinde yaklaşık %26.8 artış elde edilmiştir.

5.4. Elektriksel İletkenlik İnceleme Sonuçları

Bunlara ek olarak elektriksel iletkenlik ölçümleri MS/m cinsinden ölçülmüştür. %2 değişim oranı ile en bariz fark döküm numunelerinde kaydedilmiştir. Bakır shell ile dökülen numunenin iletkenlik değeri çeliğe nazaran %2 daha düşük çıkmıştır. Bu da matrisin element bakımından aşırı doygun olduğunun bir kanıtı olarak elde edilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] J. P. Roth, «Diagnosis of Automata Failures: A Calculus and a Method,» IBM Journal of Research and Development, pp. 278-291, 1966.
- [2] R. E. Sanders, «Technology Innovation in Aluminum Products,» JOM, pp. 21-25, February 2001.
- [3] H. Yağcıgil, «Alüminyum Mamulleri Sanayi,» %1 içinde Türkiye İş Bankası A.Ş. Genel Müdürlük, İktisadi Araştırma ve Planlama Müdürlüğü, 1997.
- [4] «International Aluminium,» [Çevrimiçi]. Available: <http://www.world-aluminium.org/statistics/>.
- [5] R. (. Cobden, «Aluminium: Physical Properties,» %1 içinde Characteristics and Alloys TALAT, p. Lecture 1501.
- [6] G. Eroğlu ve M. Şahiner, «Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum,» Aralık 2018. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/aluminyum.pdf>.
- [7] Davis, «Aluminum and Aluminum Alloys,» %1 içinde ASM Special Handbook, ASM International, 1996, pp. 3-59.
- [8] J. G. Kaufman ve E. L. Rooy , «Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, 1st ed.,» %1 içinde ASM Handbook, United States of America, Asm International, 2004.
- [9] J. R. Davis, %1 içinde Aluminum and Aluminum Alloys Alloying: Understanding the Basics (Birinci Baskı), Ohio, ASM international, 2001, pp. 371-441.
- [10] D. R. Askeland, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Cilt 1, Ankara, Türkiye: Nobel Kitapevi, 1998.
- [11] E. A. Brandes ve G. B. Brook, Smithells Light Metals Handbook, Oxford: BUTTERWORTH-HEINEMANN, 1998.
- [12] İ. Eker, Alüminyum 7050 Alaşımında Homojenleştirmenin Mikroyapı Mekanik ve Fiziksel Özellikler Üzerine Etkisi, Kocaeli, Türkiye: Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [13] T. A. Başer, «Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı,» Mühendis Ve Makina, no. 53, pp. 51-58, 2012.
- [14] J. G. Kaufman ve E. L. Rooy, «Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications,» %1 içinde ASM International, 2004, pp. 7-20.

- [15] H. Watari, T. Hagab, k. Daveyd ve K. Daveyd, «Feasibility study of twin roll casting process for magnesium alloys,» *Malzeme İşleme Teknolojisi Dergisi*, pp. 192-193, 300-305, 2007.
- [16] R. S. Rana, R. Purohit ve S. Das, «Reviews on The Influences Of Alloying Elements On The Microstructure And Mechanical Properties Of Aluminum Alloys And Aluminum Alloy Composites,» *International Journal Of Scientific And Research Publications*, cilt 2, no. 6, pp. 1-7, 2012.
- [17] D. Apelian, «Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Improved Performance,» *North American Die Casting Association*, 2009.
- [18] A. Ünal, 1050 A, 3003, 3105, 5005 Alüminyum Alaşımlarının Çift Merdaneli Döküm Yöntemiyle Levha Şeklinde İmalatı ve Mikro yapının İncelenmesi, İstanbul: Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [19] G. Totten ve D. MacKenzie, «Introduction to Aluminium,» %1 içinde *Handbook of Aluminium*, Illinois, USA, Marcel Dekker, 2003, pp. 1 - 32.
- [20] M. Conserva, G. Donzelli ve R. Trippodo, *Aluminium and Its Applications*, Edimet, Brescia, Italy, 1992.
- [21] O. Addemir, «Demir Dışı Metaller Üretimi Ders Notları,» İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [22] S. Arslan, «Kırmızı Çamurun Susuzlandırma Performansının Artması (Yüksek Lisans Tezi),» Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2016.
- [23] TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, «Alüminyum Raporu,» Alüminyum Komisyonu, pp. 1-9.
- [24] P. W. Baker ve P. T. McGlade, *Magnesium Direct Chill Casting: A Comparison with Aluminium*, 2013.
- [25] T. Bubonyi ve P. Barkoczy, «Evaluation Eutectic Structure in Aluminium Alloys,» %1 içinde *MultiScience - XXXIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*, 2019.
- [26] R. E. Sanders, %1 içinde *Continuous Casting for Aluminum Sheet a Product Perspective*, 64(2), 2012, pp. 291-299.
- [27] R. Cook, P. G. Grocock, P. M. Thomas, D. V. Edmonds ve J. D. Hunt, «Development of the twin-roll casting process,» *Malzeme İşleme Teknolojisi Dergisi*, no. 55, pp. 76-84, 1995.
- [28] A. Eraktan, «Sürekli Döküm Metodu ile Elde Edilen Alüminyum Yassı Ürünlerin Geleceği,» *Alüminyum, Alüminyum Sanayicileri ve İş Adamları Derneği*, no. 11, pp. 15-17, 1991.
- [29] N. Sun, B. R. Patterson, J. P. Suni, E. A. Simielli, H. Weiland ve L. F. Allard, «Microstructural evolution in twin roll cast AA3105 during homogenization,» *Materials Science and Engineering*, no. A,416 (1-2), pp. 232-239, 2006.

- [30] M. Gülver, İkiz Merdane Sürekli Döküm Yöntemi ile Üretilen 3005 Alüminyum Alaşımının Şekillendirilebilirlik Kabiliyetinin Optimize Edilmesi, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi), 2019.
- [31] A. Ünal, «Continuous Casting of Aluminum». Patent: US 6,672,368 B2, 2004.
- [32] D. Kopeliovich, A. Shapiro ve V. Shagal, Aluminum bismuth bearing alloy and methods for its continuous casting, 2001.
- [33] M. Yun, «Twin Roll Casting of Aluminum Alloys,» Materials Science and Engineering, cilt 280, no. 1, pp. 116-123, 2000.
- [34] B. N.S. ve D. B.K., «Twin Roll Casting of Aluminum Alloys An Overview,» 2014, pp. 651-661.
- [35] G. M., «Alüminyum Alaşımlarında İnklüzyon Çeşitleri ve Önleyici Faaliyetler,» Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası, no. 184, pp. 36-41, 2017.
- [36] S. Ertan, B. Kavakoğlu ve F. Büyükakkaş, Teknik Alüminyum San AŞ, 2. Aluminium Symposium, Teknik Alüminyum San A.Ş., 2003.
- [37] T. E., Alüminyum ve Alaşımlarının Dökümde Rafinasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, İstanbul: Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul., 2005.
- [38] S. Viswanathan, «Volume 15, Casting,» %1 içinde ASM Handbook, Tuscaloosa, USA, ASM International, 2008, p. 68.
- [39] J. Campbell, Castings, Butterworth- Heinemann, 1997.
- [40] A. S. El-Amoush, «Investigation of corrosion behaviour of hydrogenated,» Journal of Alloys and Compounds, cilt 1, no. 443, pp. 171-177, 2007.
- [41] J. R. Davis, Aluminum and Aluminum Alloys Handbook, Materials Park, OH: ASM International., 1993.
- [42] S. Viswanathan , «Common Defects in Various Casting Processes,» %1 içinde ASM Handbook, Volume 15: Casting, ASM International, 2008, p. 1201.
- [43] J. B. Santos ve R. L. P. Teixeira, «Technical contribution to 68th ABM International Congress,» %1 içinde POROSITY IN CYLINDER HEAD CASTING OF ALUMINIUM, MG, Brasil, 2012.
- [44] «Novelis PAE,» [Çevrimiçi]. Available: <https://novelispae.com/alpur-new-degasser/>. [Erişildi: Ocak 2023].
- [45] «AdTech Metallurgical Materials CO. LTD.,» [Çevrimiçi]. Available: <https://www.alalloycasting.com/molten-aluminum-gas-purifier/>.
- [46] Y. Demiray, İkiz Merdane Döküm Yöntemi ile Alüminyum AA5754 Alaşımı Levha Üretimi, Döküm ve Termomekanik Proses Parametrilerinin Etkilerinin Araştırılması, İstanbul: Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [47] K. Önel, E. Dokumacı , C. Eken, H. E. Çubuklusu, U. Aybarç, Ö. B. Çe, C. Kalender ve M. Kızılkaya, «Alüminyum Gaz Giderme İşleminde Ultrasonik Yöntemin Kullanımı,» pp. 17-18, 2015.

- [48] «Novelis PAE,» [Çevrimiçi]. Available: <https://novelispae.com/pdbf-deep-bed-filter/>. [Erişildi: 2023].
- [49] «Gasser GMBH,» [Çevrimiçi]. Available: <https://gasser-gmbh.at/en/products/ceramic-foam-filters>. [Erişildi: 2023].
- [50] M. Çolak ve R. Kayıkçı, «Alüminyum Dökümlerde Tane İnceltme, Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü,» Fen Bilimleri Dergisi, cilt 1, no. 13, pp. 11-17, 2009.
- [51] Z. B. Çatalbaş, Olası Hata Türü ve Etkisi Analizinin Alüminyum Levha ve Folyo Üretimi Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001.
- [52] C. Meran, V. Kovan ve O. Berberoğlu, «Hadde Merdanelerinde Karşılaşılan Hasarlar ve Analiz,» %1 içinde Tasarım İmalat Analiz Kongresi, Balıkesir, 2006.
- [53] F. Okumuş, «A framework to implement strategies in organizations,» cilt 41, no. 9, pp. 871-882, 2003.
- [54] J. T. Staley, %1 içinde History of Wrought Aluminum Alloy Development, 1989, pp. 4-6.
- [55] D. G. Altenpohl, Aluminum Technology, Applications and Environment, TMS and Aluminum Association, 1998.
- [56] C. Çarboğa ve S. Dal, Laboratuvar I Dersi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Nevşehir: Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, 2014.
- [57] F. Büyükakkaş, Merdaneli Sürekli Levha Döküm Yöntemi İle Üretilmiş Aa3003 Alaşımı Alüminyum Levhalarda Proses Parametrelerinin Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001.
- [58] F. J. Humphreys ve M. Hatherly, Recrystallization and related annealing phenomena, 2nd edition, Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [59] L. Ratke ve P. W. Voorhees, Growth and Coarsening: Ostwald Ripening in Material Processing, Evanston, Illinois: Springer Science & Business Media, 2013.
- [60] A. Raoughi, AA5005 SACLARDA HADDELEME SONRASI YENİDEN KRİSTALLENE KİNETİĞİNİN TERMAL ANALİZLE İNCELENMESİ, Sakarya: Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, 2021.
- [61] I. Z. Awan ve A. Q. Khan, «Recovery, Recrystallization, and Grain-Growth,» Journal of the Chemical Society of Pakistan, 2019.
- [62] «ERICHSEN,» [Çevrimiçi]. Available: <https://www.erichsen.de/en-gb/service/test-methods/sheet-metal-testing/erichsen-cupping-test>.
- [63] D. S. D'Antuono, J. Gaies, W. Golumbskie ve M. L. Taheri, «Direct measurement of the effect of cold rolling on b phase precipitation kinetics in 5xxx series aluminum alloys,» Acta Materialia, no. 123, p. 264e271, 2017.

- [64] O. Engler, K. Kuhnke ve J. Hasenclever, «Development of intermetallic particles during solidification and homogenization of two AA 5xxx series Al-Mg alloys with different Mg contents,» *Journal of Alloys and Compounds*, no. 728, pp. 669-681, 2017.
- [65] O. Birbaşar, F. Denizli, E. Özkaya, S. Sevinç, A. Ulus ve C. İnel, «Segregation Mechanisms and Their Effects on the Aluminium Flat Rolled Products (Sheet/Foil) Produced by Twin Roll Casting Technology,» %1 içinde *Light Metals (TMS 2023)*, USA, 2023.
- [66] S. Zhang, X. Wang, X. Liu, Y. Mo, C. Wang, T. Cheng, O. Ivasishin ve H. Wang, «High strength-ductility synergy induced by sub-rapid solidification in twin-roll cast Al-Mg-Si alloys,» *Journal of Materials Research and Technology*, no. 16, pp. 922-933, 2022.
- [67] Y. H. Jo, H. R. Moon, J. W. Bae, J. Yoo, S. G. Lee, Y. S. Lee ve H. W. Kim, «Effects of casting speed on microstructural and tensile properties of Al-Mg-Si alloy fabricated by horizontal and vertical twin-roll casting,» *Journal of Materials Research and Technology*, 2023.
- [68] A. Mohammadi, N. A. Enikeev, M. Y. Murashkin, M. Arita ve K. Edalati, «Developing age-hardenable Al-Zr alloy by ultra-severe plastic deformation: Significance of supersaturation, segregation and precipitation on hardening and electrical conductivity,» *Acta Materialia*, no. 203, 2021.
- [69] Y. Birol, «Recrystallization of a supersaturated Al-Mn alloy,» *Scripta Materialia*, no. 59, pp. 611-614, 2008.
- [70] C. Iřıkřařan, O. Meydanođlu, O. Birbaşar ve M. Gölver, «Tailoring the Materials Properties with a Holistic Approach from Casting to Back Annealing,» %1 içinde *The Minerals, Metals & Materials Series*, USA, 2018.
- [71] M. Buđdaycđ ve A. Turan, «FeCo ve FeCoV Alaşımlarının Metalotermik Yöntem ile Üretilmesi ve Termodinamik Modellenmesi,» *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, cilt 1, no. 9, pp. 264-276, 2020.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Furkan Berkay TAMER

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2024, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Müh. A.B.D.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2022 Şubat – Temmuz ayları arasında Ecoplas Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş. bünyesinde Planlama Mühendisi olarak çalıştı.
- 2022 Eylül – 2024 Şubat ayları arasında ASAŞ Alüminyum Ticaret ve Sanayi A.Ş. bünyesinde Üretim Mühendisi olarak çalıştı.
- 2024 Şubat itibariyle başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Kompozit A.B.D.’da Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Tamer, F. B., Aslan, S., & Birbasar, O. (2024). Investigation of Production Parameters, Mechanical Properties and Microstructures of 5005 Aluminum Alloys Produced by St/Cu Shell Pair in TRC. Hendese Teknik Bilimler Ve Mühendislik Dergisi, 1(1), 36-45. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11068964>

DİĞER ESERLER: