



**6061 ALAŞIMINA ALSC VE ALTİ5B1 MASTER
ALAŞIMLARI KATKISININ MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

**2025
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Yavuz PEKER

**Tez Danışmanları
Doç. Dr. Harun ÇUĞ
Dr. Mustafa Yunus AŞKIN**

**6061 ALAŞIMINA ALSC VE ALTİ5B1 MASTER ALAŞIMLARI
KATKISININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ
ETKİSİ**

Yavuz PEKER

**Tez Danışmanları
Doç. Dr. Harun ÇUĞ
Dr. Mustafa Yunus AŞKIN**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2025**

Yavuz PEKER tarafından hazırlanan “6061 ALAŞIMINA ALSC VE ALTİ5B1 MASTER ALAŞIMLARI KATKISININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Harun ÇUĞ

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Mustafa Yunus AŞKIN

İkinci Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 16/01/2025

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Hüseyin DEMİRTAŞ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Harun ÇUĞ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Bünyamin ÇİÇEK (HİTÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Yavuz PEKER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

6061 ALAŞIMINA ALSC VE ALTİ5B1 MASTER ALAŞIMLARI KATKISININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Yavuz PEKER

Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Doç. Dr. Harun ÇUĞ

Dr. Mustafa Yunus AŞKIN

Ocak 2025, 57 sayfa

Bu çalışmada, 6061 alaşımının mikro yapısının ve mekanik özelliklerinin AlSc (alüminyum-skandiyum) ve AlTi5B1 ana alaşımının eklenmesiyle nasıl etkilendiği incelenmiştir. Bu hedefe ulaşmak için döküm ve alaşım geliştirme amacıyla hurda 6061 alaşımı elde edilmiştir. 6061 alaşımını iyileştirmek için %2 Sc içeren AlTi5B1 ve AlSc ana alaşımı da elde edilmiştir. Ana alaşımların ve hurda 6061 alüminyum alaşımının amaçlanan kimyasal bileşimleri spektral analizle doğrulanmıştır. Çalışma dört farklı kompozisyonu içermektedir. Bu kompozisyonlar temel 6061 alaşımı, %0,15 AlTi5B1 içeren 6061, %0,2 Sc içeren 6061 ve %0,1 AlTi5B1 ve %0,15 Sc içeren 6061 alaşımıdır. Döküm için gerekli ağırlıkları ölçmek için hassas bir terazi kullanılmıştır. Eritme 730°C'ye ayarlanmış bir elektrikli fırında yapılmıştır. Erimiş bileşenler, 400°C'ye ısıtılmış bir metal kalıba konulmuş ve ana alaşımlar dökümden on beş

dakika önce eklenmiştir. Sonraki metalografik işlemler Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Dökümden sonra malzemeler hassas kesme mzkinesinde kesilmiştir ve bakelit kapsülleme için sıcak montaj işlemine tabi tutulmuştur. Aşındırma için gereken yüzey kalitesini elde etmek için numuneler SiC levhalar ve elmas çözeltileri ile taşlanmış ve parlatılmıştır. Optik mikro yapı resimleri 200x ve 500x büyütmelemlerde toplanmış ve Vickers sertlik testleri 500g yük altında gerçekleştirilmiştir. Kuru bir atmosferde, 25 metre mesafede 20N yük kullanılarak aşınma testleri yapılmıştır. Çalışma, AlSc ve AlTi5B1 ilavelerinin 6061 alaşımının özellikleri üzerindeki etkisini daha ayrıntılı olarak araştırmaktadır.

Anahtar Sözcükler : Alüminyum, AA 6061 alaşımı, AlTi5B1 alaşımı, AlSc Alaşımı, Mikroyapı, Sertlik ve aşınma.

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EFFECT OF ALSC AND ALTi5B1 MASTER ALLOYS ADDITION TO 6061 ALLOY ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

Yavuz PEKER

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisors:

Assoc. Prof. Dr. Harun ÇUĞ

Dr. Mustafa Yunus AŞKIN

January 2025, 57 pages

This study examined how the microstructure and mechanical characteristics of 6061 alloy were affected by the addition of AlSc (aluminum-scandium) and AlTi5B1 master alloy. Scrap 6061 alloy was acquired for casting and alloy development in order to achieve this goal. In order to modify the 6061 alloy, AlTi5B1 and AlSc master alloy with 2% Sc were also acquired. The intended chemical compositions of the master alloys and scrap 6061 aluminum alloy were validated by spectral analysis. For the study, four distinct compositions were planned: 6061 with 0.1% AlTi5B1 and 0.15% Sc, 6061 with 0.2% Sc, 6061 with 0.15% AlTi5B1, and the base 6061 alloy. Using a precise scale, the necessary weights for casting were determined, and melting was done at 730°C in an electric furnace. After adding the master alloys fifteen minutes prior to casting, the molten materials were poured into a 400°C metal mold that had been warmed.

Subsequent metallographic operations were carried out in the laboratories of Karabük University Iron and Steel Institute. After casting, the materials were cut with a precision cutting machine before being hot mounted for bakelite encapsulation. To acquire the surface quality required for etching, samples were ground and polished with SiC sheets and diamond solutions. Optical microstructure pictures were collected at 200x and 500x magnifications, and Vickers hardness tests were performed under a 500 g load. In a dry atmosphere, wear tests were carried out using a 20N load over a 25-meter distance. The study delves further into the impact of AlSc and AlTi5B1 additions on the characteristics of 6061 alloy.

Key Word : Aluminum, AA 6061 alloys, AlTi5B1 master, AlSc master, Microstructure, Hardness and wear.

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasında planlanmasından yazılmasına kadar tüm Őürelerde yanımda olan, tecrübelerini aktaran danıőman hocalarım Doç. Dr. Harun UĐ'a ve Dr. Mustafa Yunus AŞKIN'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde sonsuz emeĐi geçen aileme çok teşekkür ederim.

Hayatımın her aőamasında maddi-manevi desteği olan sevgili eőim Merve PEKER'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
ALÜMİNYUM GENEL ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ	4
2.2. KARIŞIM ELEMENTLERİNİN ALÜMİNYUM ALAŞIMINA ETKİSİ	5
2.2.1. Antimon (Sb)	5
2.2.2. Bakır	6
2.2.3. Silisyum	6
2.2.4. Magnezyum	6
2.2.5. Skandiyum	7
2.2.6. Titanyum.....	7
2.3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRIMASI	8
2.3.1. Dövme Alüminyum Alaşımları	8
2.3.1.1. Dövme Alüminyum Alaşım 1xxx Serisi.....	9
2.3.1.2. Dövme Alüminyum Alaşım 2xxx Serisi.....	9
2.3.1.3. Dövme Alüminyum Alaşım 3xxx Serisi.....	9
2.3.1.4. Dövme Alüminyum Alaşım 4xx Serisi.....	9

Sayfa

2.3.1.5. Dövme Alüminyum Alaşım 5xxx Serisi.....	9
2.3.1.6. Dövme Alüminyum Alaşım 6xxx Serisi.....	10
2.3.1.7. Dövme Alüminyum Alaşım 7xxx Serisi.....	10
2.3.1.8. Dövme Alüminyum Alaşım 8xxx Serisi.....	10
2.3.2. Döküm Alüminyum Alaşımının Sınıflandırılması	11
2.3.2.1. Döküm Alüminyum Alaşım 1xxx Serisi	12
2.3.2.2. Döküm Alüminyum Alaşım 2xx Serisi	12
2.3.2.3. Döküm Alüminyum Alaşım 3xxx Serisi	12
2.3.2.4. Döküm Alüminyum Alaşım 4xxx Serisi	13
2.3.2.5. Döküm Alüminyum 5xx Serisi	13
2.3.2.6. Döküm Alüminyum 6xxx Serisi	13
2.3.2.7. Döküm Alüminyum 7xxx Serisi	13
2.3.2.8. Döküm Alüminyum 8xxx Serisi	14
2.4. ISIL İŞLEME TABİ TUTULAN ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI.....	14
2.5. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEM ÇEŞİTLERİ	15
2.5.1. Tavlama	17
2.5.2. Homojenleştirme.....	18
2.5.3. Gerilim Giderme	18
2.5.4.1. Çözeltiyeye Alma	20
2.5.4.2. Su Verme	20
2.5.4.3. Yaşlandırma İşlemi	20
BÖLÜM 3	21
AŞINMA.....	21
3.1. AŞINMA NEDİR	21
3.1.1. Aşınmanın Temel Unsurları	22
3.1.2. Aşınma Mekanizmaları.....	22
3.1.2.1. Yapışma Aşınması	22
3.1.2.2. Kazıma Aşınması.....	23
3.1.2.3. Erozyon Aşınması veya Tribo Oksidasyon.....	23
3.1.2.4. Yorulma Aşınması	24

	<u>Sayfa</u>
3.2. AŞINMA DENEYLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	24
3.2.1. Ağırlık Farkı Metodu	25
3.2.2. Kalınlık Farkı Metodu	25
3.2.3. İz Değişimi Metodu	26
3.2.4. Radyoizotop Metodu	26
BÖLÜM 4	27
LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	27
BÖLÜM 5	29
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
BÖLÜM 6	37
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	37
BÖLÜM 7	49
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	49
7.1. GENEL SONUÇLAR	49
7.2. ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Dünyadaki Alüminyum Kullanımının Bölgesel Dağılımı, Ürün Dağılımı ve Nihai Ürün Olarak Sınıflandırılması	5
Şekil 2.2. Farklı alaşım gruplarının şematik gösterimi	11
Şekil 2.3. Isıl işlem Prosesi	17
Şekil 2.4. Çekirdeklenmiş bir katı çözeltide bileşimin farklılık göstermesi	19
Şekil 2.5. Çökeltme işleminin uygulama aşamaları	19
Şekil 3.1. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi	21
Şekil 3.2. Adhesiv aşınma	23
Şekil 3.3. Abrasiv aşınma	23
Şekil 3.4. Tribo oksidasyon aşınması	24
Şekil 3.5. Yorulma aşınması	24
Şekil 3.6. Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi	25
Şekil 5.1. Precisa marka XS 220A model 0,1 mg hassasiyete sahip elektronik terazi	30
Şekil 5.2. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan elektrik rezistanslı fırın	31
Şekil 5.3. Dökümün yapıldığı metal kalıp ve dökümü yapılmış numune	31
Şekil 5.4. Secotom hassas kesme cihazı	32
Şekil 5.5. Citopres 10 sıcak kaplama makinesi	32
Şekil 5.6. Tegramin-30 otomatik zımparalama ve parlatma cihazı	33
Şekil 5.7. Mikroyapı ve karakterizasyon incelemelerinde kullanılan Nikon Epiphot 200 Model optik ışık mikroskobu	34
Şekil 5.8. Sertlik ölçümlerinde kullanılan Shimadzu HVM2 mikrosertlik test cihazı	34
Şekil 5.9. Aşınma deneylerinin yapıldığı 4d marka aşınma cihazı	35
Şekil 5.10. Mitutoyo marka SJ-410 model yüzölçüm cihazı	35
Şekil 5.11. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka EDS aparatlı taramalı elektronmikroskobu (SEM)	36
Şekil 5.12. Rıgaku Ultra IV model X-ışınları cihazı (XRD)	36
Şekil 6.1. İncelenen alaşımların 200X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri	37
Şekil 6.2. İncelenen alaşımların 500X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri	38
Şekil 6.3. 6061 + %0,1 AlTi5B1+ %0.15 Sc numunesinden alınan SEM görüntüsü ve EDS analizi	40

	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.4. Alaşımın sertlik grafiği.....	42
Şekil 6.5. Aşınma deneyi sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri.....	44
Şekil 6.6. İncelenen alaşımların 500X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.....	45
Şekil 6.7. İncelenen 4 no'lu alaşıma ait XRD analiz sonucu.....	47



ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Saf Alüminyum Ait Fiziksel Özellikler	3
Çizelge 2.2. Magnezyun Elementinin Özellikleri	7
Çizelge 2.3. Dövme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılma	8
Çizelge 2.4. Döküm Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.	12
Çizelge 2.5. İçerdiği Alaşım Elementine Göre ve Isıl İşlem Görebilme Durumlarına Göre Dövme Al Alaşımları.....	15
Çizelge 2.6. İçerdiği Alaşım Elementine Göre ve Isıl İşlem Görebilme Durumlarına Göre Döküm Al Alaşımları	15
Çizelge 5.1. Hurda AA 6061 Parçaların Spektral-Analiz Cihazında Ölçülmüş ve Elde Edilen Analiz Sonuçları.....	29
Çizelge 5.2. Dökümü Yapılan Alaşım Kombinasyonları.....	30
Çizelge 6.1. Alaşımların Sertlik Değerleri	42
Çizelge 6.2. Aşınma Deneyi Sonrası Alan Kayıpları.....	46

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al	: alüminyum
Ce	: seryum
Cu	: bakır
Mg	: magnezyum
Nd	: neodimyum
Na	: sodyum
Sb	: antimom
Sc	: skandiyum
Si	: silisyum
HV	: hardness vickers
MPa	: Megapascal
Psi	: Pounds Per Square Inch

KISALTMALAR

ALCOA	: Aluminum Company of Amerika (Amerika Alüminyum Şirketi)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDS	: Enerji Dağıtıcı Spektroskopi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, mükemmel korozyon direnci ve şekillendirilebilirlik gibi üstün özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında oldukça fazla tercih edilmektedir. Bu özellikler alüminyum havacılık, otomotiv, inşaat ve deniz mühendisliği gibi alanlarda tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir [1]. Çok sayıda alüminyum alaşımı arasında, 6000 ailesi, özellikle de 6061 alaşımı, mukavemet, kaynaklanabilirlik ve korozyon direncinin dengeli bir karışımı nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır [2]. Başlıca alaşım elementleri magnezyum ve silisyum olan alüminyumdan üretilen 6061 alaşımı, uçak parçaları ve bisiklet gövdeleri gibi yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

Mühendislik uygulamalarında daha yüksek performansa yönelik devam eden talep, 6061 alüminyum alaşımının özelliklerinde ek iyileştirmelerin araştırılmasını teşvik etmiştir. Tane incelticileri ve nadir toprak elementlerini dahil etme uygulanabilir bir tekniktir. Titanyum ve bor içeren AlTi5B1 ana alaşımının eklenmesinin, alüminyum alaşımlarının tane yapısını iyileştirdiği ve bunun sonucunda mekanik performansını iyileştirildiği kanıtlanmıştır [4]. Benzer şekilde, skandiyum (Sc) ilavesi, alaşımların mukavemetini ve termal kararlılığını artıran ince Al3Sc çökeltileri üretme kapasitesi nedeniyle çok fazla ilgi çekmektedir [5].

Bu katkı maddelerinin alüminyum alaşımlarını nasıl etkilediğine dair çok sayıda araştırma yapılmış ve sonucunda mekanik performansı ve mikro yapıyı geliştirmede umut vadettiğini göstermiştir. Örneğin, Riddle ve Sanders [6] tarafından yapılan bir çalışma, alüminyum alaşımlarına AlTi5B1 eklemenin tane boyutunu önemli ölçüde azalttığını, alaşımların sertliğini ve çekme mukavemetini iyileştirdiğini göstermiştir. Skandiyumun alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini, özellikle yüksek

sıcaklık uygulamalarında, geliştirmedeki işlevi Filatov ve diğerleri tarafından yapılan başka bir çalışmada gün yüzüne çıkarılmıştır.

Ek olarak, Ahmed ve diğerleri, skandiyum ve titanyum ilavelerinin birleşik etkilerini araştırarak alaşımın genel performansını artıran ve mikro yapısını daha da parlatan sinerjik bir etki bulmuştur.

Mevcut çalışma AlTi5B1 ve AlSc master alaşımlarının 6061 alüminyum alaşımının mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Alaşım bileşimini sistematik olarak değiştirerek ve tane yapısında, sertlikte ve aşınma direncinde meydana gelen sonraki değişiklikler incelenmektedir. Bu eklemelerin 6061 alüminyum alaşımının performansını iyileştirmedeki önemi hakkında kapsamlı bir bilgi sağlanması amaçlamaktadır.

Bu çalışmanın bulgularının, zorlu mühendislik uygulamaları için üstün özelliklere sahip yeni alüminyum alaşımlarının geliştirilmesine yardımcı olması amaçlanmıştır.

BÖLÜM 2

ALÜMİNYUM GENEL ÖZELLİKLERİ

Alüminyumun atom numarası 13'tür ve sembolü Al'dir. Metal, soluk bir gümüş tonudur. Periyodik tabloya göre, on üçüncü elementtir. Yüzey merkezli kübik kristal yapıya, 658°C'lik bir erime noktasına, 2,7 gr/cm³'lük bir yoğunluğa, 26,98 gr/mol'lük bir atom ağırlığına ve +3'lük bir değerliğe sahiptir. Silisyum ve oksijenden sonra, gezegenin kabuğunda en yaygın üçüncü elementtir. Saf alüminyuma ait fiziksel özellikler Çizelge 2.1. verilmektedir [7,8].

Çizelge 2.1. Saf alüminyum ait fiziksel özellikler [7,8].

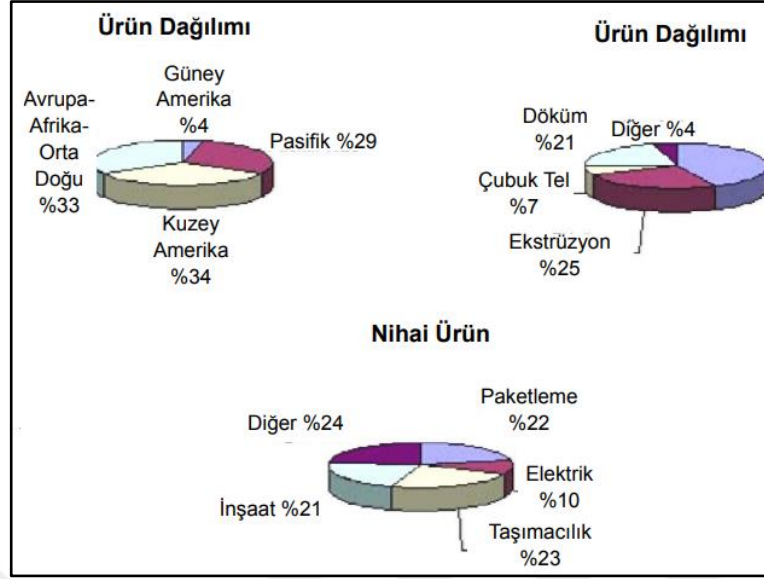
Simgesi	Al
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı (gr/mol)	26.98
Ergime Noktası (°C)	658
Yoğunluğu (gr/cm ³)	2.7
Kristal Yapısı	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
Özgül Isısı (cal/gr(100 °C))	0.224
Elastisite Modülü (Mpa)	72x10 ³
Poisson oranı	0.33
Kayma modülü (Mpa)	27x10 ³
Çekme mukavemeti (Mpa)	40-90
Akma mukavemeti (Mpa)	10-30
Kopma uzaması	% 30-40

Alüminyumun yüksek reaktivitesi nedeniyle saf numunelerini görmek zordur. Bu nedenle saf alüminyum yüksek derecede indirgeyici koşullarda sınırlıdır. Alüminyumun 270'in üzerinde farklı şekilde kombinasyonu bulunmaktadır.

2.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Saf alüminyum oldukça yumuşaktır. Alüminyum alaşıma dönüştürülüp temperlendiğinde dayanaklılığı ve mukavemeti artmaktadır. Yaklaşık olarak çeliğin üçte bir ağırlığına sahip son derece hafif bir metaldir. Saf alüminyum yüzeyinde ince bir oksit tabakası oluşmaktadır. Bu tabaka mükemmel korozyon direnci sağlamaktadır. Özellikle mutfak dolapları gibi aşınmaya maruz kalan uygulamalar için elverişlidir. Alüminyum alaşımları hem sıcak ve hem de soğuk olarak işlenebilmektedir. Alaşım, haddeleme yöntemi kullanılarak birkaç mikron kalınlığında folyo haline getirilebilir. Ayrıca bazı alüminyum alaşımları üstün döküm kalitesine sahiptir. Alüminyum, elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir. Alüminyum bakır ile kıyaslandığında alüminyumun bakırdan hemen hemen iki kat daha iyi bir iletkenliğe sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle enerji sektöründe yaygın kullanım alanı bulunmaktadır. Alüminyumun termal genleşme katsayısı 23.2'dir.

Alüminyum %100 geri dönüştürülebilir. Geri dönüştürülmüş alüminyum orijinal ürünle aynıdır. Geri dönüştürülebilir olması nedeniyle daha uygun maliyetlidir. Otomotiv sektörü ve uçak endüstrisinde yakıt sarfıyatı vb. maliyetlerden tasarruf edebilmek çok önemlidir.



Şekil 2.1. Dünyadaki alüminyum kullanımının bölgesel dağılımı, ürün dağılımı ve nihai ürün olarak sınıflandırılması [9].

Çoğu metal alüminyumdan yaklaşık üç kat daha ağırdır. Bu durum alüminyum kullanımına yönelik yaygın bir tercihe yol açmaktadır [10].

2.2. KARIŞIM ELEMENTLERİNİN ALÜMİNYUM ALAŞIMINA ETKİSİ

2.2.1. Antimon (Sb)

Alüminyum alaşımlarının tane yapısı antimon kullanılarak rafine edilebilmektedir. Katılma süreci sırasında tane sınırlarında biriktiğinden, yapısal tekdüzelik üzerinde bir etkisi olabilmektedir. Antimonun ötektik silikon morfolojisini değiştirdiği ve özellikle Al-Si alaşımlarında daha ince ve daha eşit bir silisyum parçacıkları dağılımı ürettiği tespit edilmiştir [11].

Düşük miktarda antimon (%0,1-%0,5), alüminyum alaşımlarının sertliğini ve aşınma direncini iyileştirebilir. Bunun temel nedeni, tane sınırlarına yakın bir yerde birikerek dislokasyon hareketini azaltması ve mukavemeti artırmasıdır.

Ayrıca yüksek termal dirence katkıda bulunduğu bildirilmiştir. Ancak, aşırı konsantrasyonlar kırılabilirliği artırabilir ve sünekliği azaltabilir [12].

2.2.2. Bakır

Alümiyum alaşımlarında alaşımlama için kullanılan ilk olarak bakır elementi kullanılmıştır. Alaşımda bakır oranı % 12 'den fazla olduğunda gevreklik meydana gelmektedir. Bu nedenle bakır oranı %12'den fazla kullanılmaz. Malzemenin işlenebilirliğini azalttığı için dövme alaşımlarında oranın %5'i geçmesine izin verilmez. Önerilen bakır oranı %3 ila %5'tir. Ancak bakır, korozyon direncini ve elektrik iletkenliğini azaltmaktadır. Sıcaklık, bakırın alümiyumdaki çözünürlüğünü etkiler ve bu da çökelme sertleştirme yönteminin artan mukavemetine katkıda bulunmaktadır. [13].

2.2.3. Silisyum

Alümiyuma en fazla %20 oranında eklenebilir. Al-Si alaşımları, ısıya dayanıklı döküm parçaları oluşturmak için magnezyum ve silisyumun birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Bu alaşımların çekme dayanımı düşüktür. Alaşımlar mükemmel korozyon direnci sunmaktadır ancak işlenmesi zordur. [14].

2.2.4. Magnezyum

Magnezyum alümiyum yüksek mukavemet, süneklik, korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti sağlamaktadır. Al-Mg alaşımları yaşlandırılmasına rağmen katı eriyik mukavemetlenmesi nedeniyle yüksek mukavemetlidir. Akıcılık problemleri nedeniyle bu alaşım grubunun döküm alaşımlarında kullanılması tercih edilmemektedir [15].

Çizelge 2.2. Magnezyun elementinin özellikleri [16].

Atom numarası	12
Atom ağırlığı	24.313
İyon değeri	+2
Kaynama noktası	1107 °C
Ergime noktası	650 °C
Yoğunluğu	1.74 gr/cm ³
Kristal yapısı	Hegzagonal sıkı paket
Atom hacmi	14.0
Özgül ısı	0.25 cal/g°C
Isıl iletkenliği	0.38 cal/cm ² (oda sıcaklığında)
Asid-Baz özelliği	Baz

2.2.5. Skandiyum

Sc en hafif nadir toprak elementidir. Skandiyum (Sc), α -Al dendrit yapısını iyileştirebilir, ayrışmayı azaltabilir ve alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirebilir. Skandiyumla güçlendirilmiş alüminyum alaşımları, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarına göre çok sayıda avantaj sergileyen yeni nesil yüksek performanslı alaşımları temsil etmektedir [17].

Skandiyum ilaveli alaşımlar diğer yüksek mukavemetli alaşımlardan çok daha güçlüdür, belirgin tane incelmesi sergiler, kaynakları güçlendirir ve kaynaklarda sıcak çatlamayı ortadan kaldırmaktadır. Bu alaşımlar aynı zamanda son çalışmalarda da gösterildiği gibi korozyona karşı iyi bir direnç göstermektedir. Mekanik, mikroyapısal ve korozyon özelliklerinin incelenmesi, skandiyumla güçlendirilmiş alaşımların havacılık, spor, ulaşım ve proses endüstrilerinde yararlı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir [18,19].

2.2.6. Titanyum

Titanyum ilave edilen alüminyum alaşımlarında tane küçültme etkisi meydana gelmektedir. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve artmasını sağlamaktadır. En

yüksek alüminyum ilavesi %20'dir. Bor ile alaşımlandığında en iyi etkisi ortaya çıkmaktadır. Titanyum alaşım sünekliği ve çekme mukavemetini artırırken ısı iletkenliği düşürmektedir [20,21].

2.3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRIMASI

Alüminyum Birliği (Aluminum Association) standard alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında en yaygın kullanılan standarttır. Ek olarak, ASTM, ALCOA Fransız Standartları ve DIN 1713 gibi standartlar kullanılmaktadır. Bu standartların hepsi iki gruba ayrılır: dövme alüminyum alaşımları ve döküm alüminyum alaşımları [22].

2.3.1. Dövme Alüminyum Alaşımları

Bu tür alaşımlar doğrudan soğutmalı döküm adı verilen bir yöntem ile yarı ürün halinde üretilmektedirler. Dövme alüminyum alaşım gruba giren alüminyum alaşımları Cu, Mn, Mg, Ni, ve Si gibi elementler içermektedir. Çoğunlukla sürekli döküm yoluyla blok halinde üretilir daha sonra homojenleştirme ısıl işlemi uygulanmaktadır. Isıl işlem sonrası haddeleme veya ekstrüzyon yoluyla şekillendirilendirilirler. Dövme alüminyum alaşımları 1954'te Alüminyum Birliği tarafından standartlaştırılmıştır [23].

Çizelge 2.3. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [23].

Alüminyum Birliği No	Başlıca alaşım Elementi
1xxx	Min.99,0 veya daha fazla alüminyum
2xxx	Bakır
3xxx	Mangan
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Magnezyum ve Silisyum
7xxx	Çinko
8xxx	Diğer elementler
9xxx	Kullanılmayan Seriler

2.3.1.1. Dövmeye Alüminyum Alaşım 1xxx Serisi

1xxx alaşımlar minimum %99,0 alüminyum, empürite olarak da silisyum ve demir içermektedir. 1xxx seri alaşımlar haddelenerek folyo veya levha haline getirilerek kullanılmaktadır [24].

2.3.1.2. Dövmeye Alüminyum Alaşım 2xxx Serisi

2xxx seri alaşımlarının bir çoğu bakırın yanı sıra eser miktarlarda diğer elementlerden eklenmektedir. Havacılık endüstrisi gibi yüksek ağırlık dayanımın gerekli olduğu endüstrilerde 2xxx serisi alaşımlar kullanılmaktadır. Çökelme sertleştirme ve katı çözültü güçlendirmesi bu alaşımlara mukavemetlerini kazandırır [24].

2.3.1.3. Dövmeye Alüminyum Alaşım 3xxx Serisi

3xx serisi Al Alaşımlarında ana alaşım elemanı mangandır. 3003 alaşımı bu serinin en önemli alaşımıdır. Bu alaşım 1100 alaşımına %1,25 mangan ilavesi ile oluşmaktadır. İyi işlenebilirliğin istenen yerlerde bu alaşım sınıfı tercih edilmektedir [24].

2.3.1.4. Dövmeye Alüminyum Alaşım 4xx Serisi

Silisyum, 4xx serisindeki alaşımlarda birincil alaşım elementidir. Alüminyuma %12'ye kadar Si eklendiğinde, alaşım kırılgan hale gelmeden erime noktası düşmektedir. Bu nedenle Al-Si alaşımları, temel metalin erime noktasının altındaki erime sıcaklıklarında alüminyum bağlantılarında lehim alaşımları olarak kullanılmaktadır [25].

2.3.1.5. Dövmeye Alüminyum Alaşım 5xxx Serisi

5xxx serinin ana alaşım elementi olan magnezyum katı eriyik mukavemetlenmesi sağlar ve miktarı %5 e kadar çıkabilmektedir. 5052 bu serinin en önemli alaşımıdır. [24].

2.3.1.6. Dövme Alüminyum Alaşım 6xxx Serisi

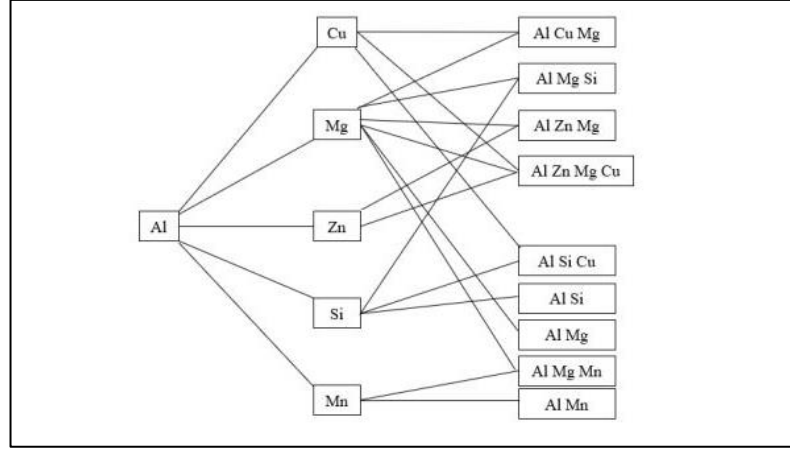
Mg₂Si intermetalik bileşikleri, çökelti sertleştirilmesi ile dayanım artışı sağlamaktadır. 6061 bu sınıfın en çok kullanılan alaşımıdır. 6061 alaşımı %1,0 magnezyum, %0,6 silisyum, %0,3 bakır ihtiva etmektedir. Otomotiv sektöründe 6xxx serisi genel amaçlı yapısal komponent olarak kullanılmaktadır. [24].

2.3.1.7. Dövme Alüminyum Alaşım 7xxx Serisi

Temel çökelti MgZn₂ intermetalik bileşimindedir. Çinkonun ve magnezyumun alüminyum içerisinde yüksek çözünürlüğü yüksek yoğunluklu çökelti oluşmasını, bu da dayanımın oldukça yükselmesini sağlamaktadır. Bu seri yüksek dayanımın gerekli olduğu yerlerde tercih edilmektedir [24].

2.3.1.8. Dövme Alüminyum Alaşım 8xxx Serisi

Bu seride esas alaşım elementi lityumdur ve bazen kalay da eklenebilmektedir. Al-Li alaşımları özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, iyi tokluk ve iyi yorulma direnci gibi özelliklere sahiptir. Bu nedenle havacılık ve uzay endüstrisinde hafiflik ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak, diğer alüminyum alaşımlarına göre üretim maliyetleri daha yüksek olabilmektedir. Al-Li alaşımlarının avantajları ve özel özellikleri, özellikle hava araçlarındaki performans ve yakıt verimliliği gibi faktörlerin önemli olduğu alanlarda tercih edilmelerini sağlamaktadır.



Şekil 2.2. Farklı alaşım gruplarının şematik gösterimi [26].

2.3.2. Döküm Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Döküm alüminyum alaşımları için çok sayıda endüstriyel uygulama mevcuttur ve bunlar mekanik özellikleri, kimyasal yapıları ve üretim süreçlerine göre kategorize edilirler. Hafiflik, yüksek mukavemet, iyi dökülebilirlik ve korozyona karşı direnç gibi birçok avantajı nedeniyle otomotiv, havacılık, savunma ve makine sektörlerinde oldukça tercih edilmektedir. Bu alaşımlar döküm tekniği, ısıl işlem uyumluluğu ve birincil alaşım bileşeni (örneğin silikon, bakır, magnezyum veya çinko) gibi faktörlere göre kategorize edilmektedir. [24]. Çizelge 2.4.'te Alüminyum Birliği tarafından geliştirilen standardizasyon göre döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [23].

Alüminyum Birliği No	Başlıca alaşım Elementi
1xx.x	Min.99,0 veya daha fazla alüminyum
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silisyum +bakır ve /veya Magnezyum
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmayan seri
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer elementler

2.3.2.1. Döküm Alüminyum Alaşım 1xxx Serisi

Saf alüminyumdan üretilen bu seri en az %99 alüminyum içermektedir. Yüksek korozyon direnci ve iyi elektriksel ve termal iletkenliği ile öne çıkmaktadır. Mekanik dayanıklılığı düşük olmasına rağmen oldukça işlenebilir ve kaynaklanabilir. Elektriksel iletkenlik, kimya endüstrisi ve gıda sektörü gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır [14].

2.3.2.2. Döküm Alüminyum Alaşım 2xx Serisi

Bu alaşımlar tipik olarak bakırla alaşımlanır ve mükemmel mukavemet ve sertliğe sahiptir. Isıl işleme güçlendirilebilirler ancak korozyon dirençleri sınırlıdır. Yüksek seviyede mukavemet gerektiren havacılık ve otomotiv uygulamalarında tercih edilmektedir. Üstün mekanik nitelikleri nedeniyle 2024-T6 alaşımı genellikle uçak gövdelerinde kullanılmaktadır [14].

2.3.2.3. Döküm Alüminyum Alaşım 3xxx Serisi

Bu manganez alaşımları yüksek korozyon direncine ve orta düzeyde mekanik mukavemete sahiptir. Isıl işleme sertleştirilemezler, ancak soğuk işlem ile güçlendirilebilirler. Mutfak eşyaları, çatı kaplama ve içecek kapları gibi

uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan alaşımlar 3003 ve 3105'tir [14].

2.3.2.4. Döküm Alüminyum Alaşım 4xxx Serisi

Bu silisyum alaşım ailesi aşınmaya karşı çok dirençlidir ve termal olarak iletkenidir. Bazı çeşitleri ısı ileme ile güçlendirilebilir. Motor parçalarında, fren disklerinde ve otomobil endüstrisinde aşınmaya dayanıklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca düşük termal genişleme özelliği nedeniyle kaynak elektrotlarında da tercih edilmektedir [14].

2.3.2.5. Döküm Alüminyum 5xx Serisi

Magnezyum, bu serideki birincil alaşım elementidir ve olağanüstü korozyon direnci ve mukavemet sağlamaktadır. Özellikle ulaşım, inşaat ve denizcilik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Gemi gövdeleri ve basınçlı kaplar gibi zorlu ortamlarda, 5083 ve 5052 alaşımları yaygın olarak seçilir. Isıl işlem onları sertleştirmez, ancak soğuk işleme mukavemetleri artırabilmektedir [14].

2.3.2.6. Döküm Alüminyum 6xxx Serisi

Magnezyum ve silisyum alaşımları ailesi yüksek mukavemeti, korozyon direnci ve işlenebilirliğiyle öne çıkmaktadır. Sertleştirmek için ısı ileme tabii tutulabilirler ve yüksek kaynak kabiliyetine sahiptirler. 6061 ve 6063 alaşımları genellikle inşaat ve otomotiv endüstrilerinde, ayrıca iskelet sistemlerinde ve profillerde kullanılmaktadır [14].

2.3.2.7. Döküm Alüminyum 7xxx Serisi

Çinko alaşımları ailesi en yüksek mekanik mukavemete sahiptir. Havacılık, uzay ve askeri uygulamalarda popülerdirler. Isıl işlemle sertleştirilebilirler ancak korozyon dirençleri sınırlıdır. 7075-T6 gibi alaşımlar hem hafiflik hem de mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [14].

2.3.2.8. Döküm Alüminyum 8xxx Serisi

Demir, lityum veya diğer elementlerle alaşımlanmış alüminyum, bu özel amaçlı alaşım sınıfını oluşturmaktadır. Elektrik kablolarında, folyoda, pil kutularında ve paketleme malzemelerinde sıklıkla bulunmaktadır. Alaşım 8011, alüminyum folyo üretiminde en sık kullanılan çeşittir [14].

2.4. ISIL İŞLEME TABİ TUTULAN ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları, istenilen dayanımı elde etmek için çeşitli ısıl işlem prosesleri kullanılarak sertleştirilebilir. Bu ısıl işlem prosesleri, alaşımın iç yapısındaki çökelmelerin kontrol edilmesi ve dağılımının sağlanmasıyla mukavemetin artmasını sağlamaktadır. Öte yandan, ısıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları, çökelme sertleştirilmesi ile güçlendirilemez. Bu tür alaşımların dayanımı 36 genellikle soğuk işleme yöntemleriyle artırılmaktadır. Soğuk işleme, alaşımın plastik deformasyona uğratılmasıyla gerçekleşir ve kristal yapıda yoğun çökelmelerin oluşmasına neden olmaktadır.

Böylece alaşımın mukavemeti ve sertliği artmaktadır. Bazı ısıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarında ise katı eriyik mukavemetlendirmesi, ve pekleşme mukavemetlendirmesi gibi yöntemlerle güçlendirme yapılmaktadır. Bu yöntemler, alaşım içindeki fazların kontrolü, dislokasyonların engellenmesi ve partikül takviyesi gibi mekanizmaları içermektedir [9].

Tüm alüminyum sınıflarına ısıl işlem uygulanmaz. Çizelge 2.5'te içerdiği alaşım elementine göre ve ısıl işlem görebilme durumlarını gösteren çizelge verilmiştir.

Bakır, 2xxx serisinin ana alaşım elementidir. Uçak endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. 6xxx serisi ana elementleri silisyum ve manzezyum içermektedir. Alaşım elementlerinden dolayı korozyon direnci yüksektir. Otomotiv sektöründe yedek parça imalatında kullanımı yaygındır. 7xxx serisi magnezyum ve çinko ile bakır veya krom içermektedir. Bu serinin mukavemeti oldukça yüksektir. 7xxx serisi havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [27].

Çizelge 2.5. İçerdiği alaşım elementine göre ve ısıl işlem görebilme durumlarına göre dövme Al alaşımları [28].

Grup	Alaşım Elementi	Isıl İşlem
1XXX	Alüminyum	Uygulanamaz
2XXX	Bakır	Uygulanabilir
3XXX	Mangan	Uygulanamaz
4XXX	Silisyum	Uygulanamaz
5XXX	Magnezyum	Uygulanamaz
6XXX	Magnezyum- Silisyum	Uygulanabilir
7XXX	Çinko	Uygulanabilir
8XXX	Diğer	Uygulanabilir

Çizelge 2.6. İçerdiği alaşım elementine göre ve ısıl işlem görebilme durumlarına göre döküm Al alaşımları [28].

Grup	Alaşım Elementi	Isıl İşlem
1XXX	Saf Alüminyum	Uygulanamaz
2XXX	Bakır	Uygulanabilir
3XXX	Silisyum	Uygulanabilir
4XXX	Silisyum	Uygulanabilir
5XXX	Magnezyum	Uygulanamaz
6XXX	Bu seri kullanılmamaktadır	-
7XXX	Çinko	Uygulanabilir
8XXX	Kalay	Uygulanamaz
9XXX	Diğer elementler	Uygulanamaz

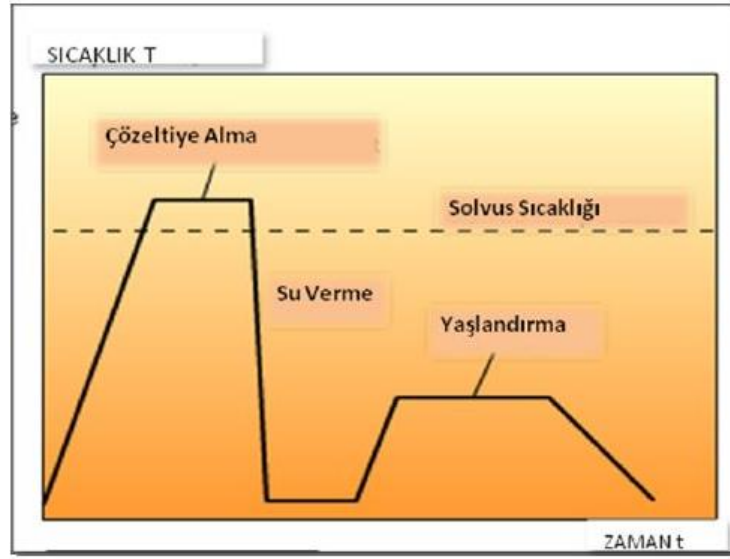
2.5. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEM ÇEŞİTLERİ

Isıl işlem, faz diyagramından çeşitli teknikler kullanılarak katı alaşımların ve metallerin mekanik özelliklerine ve iç yapılarına nüfuz etme sürecidir. Bu teknikler, düzenlenmiş ısıtma ve soğutmayı içermektedir. Bu ısıtma ve soğutma yöntemleri öncelikle tavlama, çözelti işlemi, yaşlandırma ve soğuk işlemeyi içermektedir. Isıl

işlem kullanımları, alaşımların kimyasal yapılarına ve amaçlanan son kalitelere bağlı olarak değişmektedir.

Alüminyum alaşıma uygulanan ısı işlemler TX sembolleri ile gösterilir. Bu işlemler şu şekilde ifade edilmektedir: F, Mekanik veya ısı işlem görmemiş. O, Tavlanmış ve yeniden kristalleşmiş. H, Soğuk işlem görmüş. H1X, Sadece soğuk şekillendirilmiş (x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder). H12, Soğuk şekillendirme, O ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlamaktadır. H14, Soğuk şekillendirme, O ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar. H16, Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlamaktadır. H18, Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlamaktadır. H19, Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlamaktadır. H2X, Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış. H3X, Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiştir. W, Çözelti ısı işlemi görmüştür. T, Yaşlandırılmıştır. T1, İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmıştır. T2, İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmıştır. T3, Çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmıştır. T4, Çözelti ısı işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmıştır. T5, Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden ve soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmıştır. T6, Çözelti ısı işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmıştır. T7, Çözelti ısı işlemi görmüş ve kararlılaştırılmış. T8, Çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmıştır. T9, Çözelti ısı işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiştir. T10, İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmıştır.

Isıl işlem süreci üç temel adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar sırasıyla; çözeltiye alma, su verme ve çökelme (yaşlandırma) işlemleridir.



Şekil 2.3. Isıl işlem prosesi [29].

2.5.1. Tavlama

Mekanik işlem uygulanan alaşımların üretim aşamasının ardından tavlama işlemi uygulanmalıdır. Tavlama prosesi soğuk şekillendirmeden sonra sertleşen malzemenin gerilimlerini azaltarak veya ısıtılarak uygulanarak yaşlandırılan malzemeyi yumuşatmak için kullanılan bir prosedir.

Yapıda bulunan tanelerin yeniden kristalleşmesi için ötektik noktanın altındaki belirlenen sıcaklığa kadar tavlama işlemi yapılmaktadır. Tavlama işlemiyle alaşımın sertliğini ve yapıdaki diskokasyonların etkilerini ortadan kaldırılmaktadır.

Metale soğuk işlem uygulanması sertliği ve çekme mukavemetini yükseltmektedir. Uygulanan bu proses ile alaşımın süneklik değeri düşmektedir. Alaşıma uygulanan ısıtma işlemi prosesinde tav süresi oldukça önem arz etmektedir. Örnek vermek gerekirse yeniden kristalleşme işlemi yapılırken alaşım gerekli sıcaklıkta ve sürede tutulmazsa tekrar meydana gelen kristallerin özellik ve şekilleri tamamen değişmezler [30].

2.5.2. Homojenleştirme

Homojenleştirme, tane sınırlarından ve diğer çözeltiler açısından zengin bölgelerden tane merkezlerine doğru difüzyon yoluyla, katılma koşullarına bağlı olarak yapıda bölgesel konsantrasyon gösteren alaşım elementlerinin homojen bir dağılımını üreten bir tür ısıtma işlemidir. Gereken süre tane boyutu ve alaşım bileşenlerinin difüzyon hızına bağlıdır [31].

2.5.3. Gerilim Giderme

Bu tavlama işlemi, yalnızca ısıtma işlemi görebilen dövme alüminyum alaşımlarda deformasyon sertleşmesinin etkilerini ortadan kaldırmak için yaklaşık 345°C uygulanmaktadır. Gerilim giderme tavlama işlemi sonucunda sadece toparlanma, kısmi yeniden kristalleşme veya tam yeniden kristalleşme meydana gelmektedir [32].

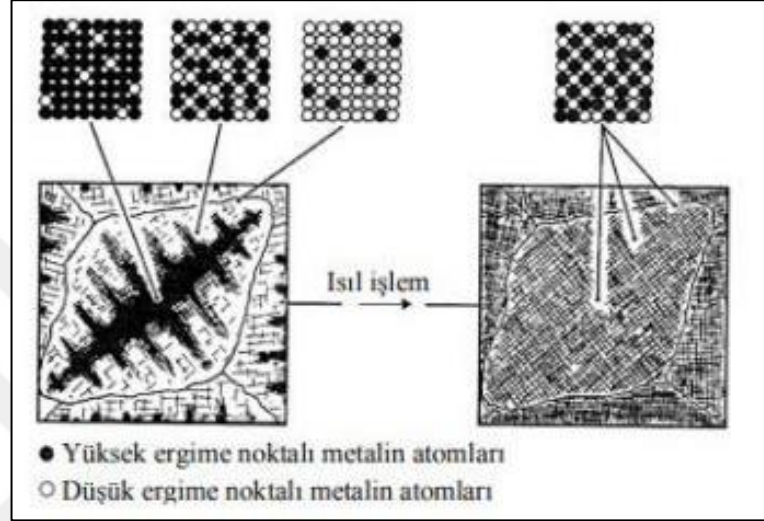
2.5.4. Çökeltme Sertleştirilmesi

1906 yılında Alman araştırmacı Alfred Wilm düşük miktarlarda silisyum, magnezyum, ve bakır içeren bazı alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine su verme işleminin etkisini araştırmıştır. Oda sıcaklığında birkaç gün kaldıktan sonra su verilen numunelerin mukavemetinin kendiliğinden arttığını gözlemlenmiştir. Alaşımların mikroyapısında belirgin bir değişim gözlenemediği için o zamanlar açıklanamayan bu olay sonrasında yaşlandırma olarak tanımlanmıştır [33].

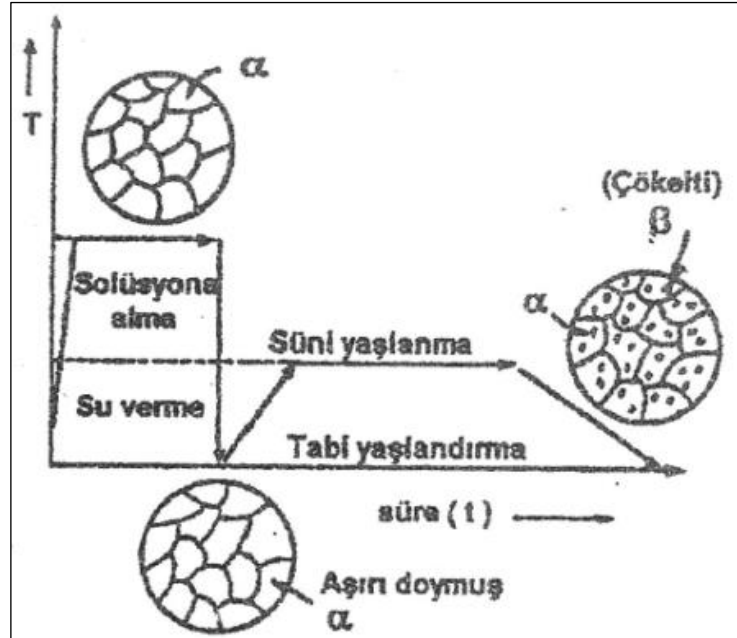
Sıvı haldeyken birbiri içinde tamamen çözünebilen bazı metaller katılma sonrasında çözülmüş halde kalmaktadır. Bu karışıma katı çözeltiler adı verilmektedir. Katılma sırasında kristaller her iki metalin atomlarından oluşmaktadır. Metallerden birinin ergime noktası diğerinden daha yüksek olduğu için katılma daha hızlı başlayacaktır.

Sonuç olarak katılma sonrası oluşan tanelerin merkezleri yüksek ergime sıcaklığına sahip metalce daha zengin olmaktadır.

Çevresindeki kollar ise düşük ergime sıcaklığına sahip metalce daha zengindir. Bu olay çekirdeklenme olarak adlandırılır. Döküm halindeki tüm katı çözeltilerde çekirdeklenme görülmektedir. Döküm sonrası ısı işlemler bu görünümü ortadan kaldıracaktır. Şekil 2.4’de çekirdeklenmiş bir katı çözeltide bileşimin farklılık göstermesi görseli verilmiştir [33].



Şekil 2.4. Çekirdeklenmiş bir katı çözeltide bileşimin farklılık göstermesi [33].



Şekil 2.5. Çökeltme işleminin uygulama aşamaları [34].

Çökeltme sertleştirme ısı işlemleri üç aşamadan oluşur:

2.5.4.1. Çözeltiye Alma

Alaşım tek faz (α) bölgesine kadar ısıtılarak θ çökeltileri katı çözelti içerisinde homojen olarak çözünene kadar bekletilmektedir.

2.5.4.2. Su Verme

Çözeltiye alma işleminden sonra tek fazlı çözelti ikincil fazların çökmesine müsaade edilmeden hızla soğutulur aşırı doymuş α katı çözeltisi elde edilmektedir. Atomların olası çekirdeklenme bölgelerine göç etmesi için yeterli zamanın olmaması θ fazının oluşmasını engellemektedir.

2.5.4.3. Yaşlandırma İşlemi

Son olarak kararsız haldeki aşırı doymuş α katı çözeltisi, oda sıcaklığında (doğal yaşlandırma) ya da oda sıcaklığının üstünde, solvüs sıcaklığının altında (yapay yaşlandırma) belirli sürelerde bekletilerek içerisinde çözünmüş halde bulunan θ fazı kararlı bir faz halinde çökelmektedir [35].

Yaşlandırma işlemiyle güçlendirilmiş bir alaşıma su eklendiğinde, bölümün merkezi yüzeyden daha yavaş soğumaktadır. Hızla soğuyan yüzey merkezi çeker ve sıkıştırır. Daha sonra çekirdek soğur ve çekmeye çalışır, ancak soğuk, katı yüzey tarafından durdurulur. Sonuç olarak, merkezdeki artık gerilmeler yüzey gerilimi ve sıkıştırma olarak kendini göstermektedir. Bu gerilmeler malzemeyi deforme edebilir, bozabilir ve hatta kırabilir. Bu durumlardan kaçınmak için, yaşlandırma yoluyla güçlendirilebilen alaşımlar gerekenden daha hızlı soğutulmamalıdır [35].

Ancak soğutmanın çok yavaş gerçekleşmesi durumunda çözeltiye alma sonrası çözünmüş halde bulunan ikincil fazlar kaba parçacıklar halinde tekrardan çöker ve malzemenin mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir.

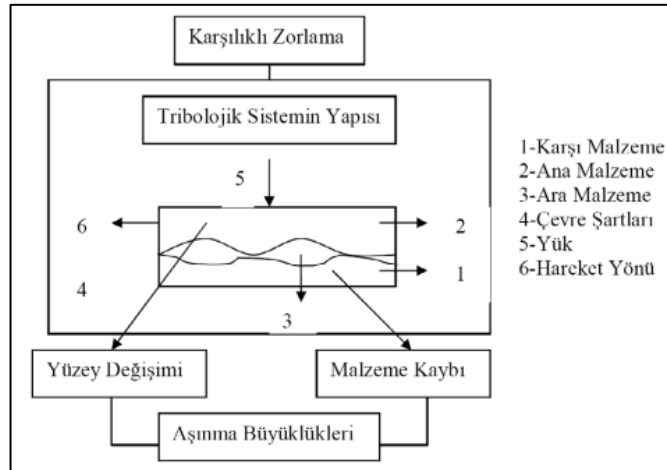
Ayrıca kayma düzlemlerinde ve tane sınırlarında oluşan çökeltiler alaşımın şekil alabilirliğini azaltır ve taneler arası korozyon dayanımı düşmektedir. Bu nedenle çözeltiye alma sonrası su verme sıcaklığının tayini önem taşımaktadır [36].

BÖLÜM 3

AŞINMA

3.1. AŞINMA NEDİR

Bir bileşenin yüzeyinden, başka bir yüzey, parçacık veya sıvı ile mekanik etkileşim sonucu malzemenin kademeli olarak çıkarılması olan aşınma, tribolojide temel bir olgudur. Göreceli harekete maruz kalan bileşenlerin ömrünü ve etkinliğini doğrudan etkiler ve bu da onu mekanik sistemlerin performansının, sağlamlığının ve güvenilirliğinin önemli bir bileşeni haline getirmektedir. Aşınma, malzeme özelliklerine, çalışma koşullarına ve çevresel faktörlere bağlı olarak birçok farklı form alabildiğinden, karmaşık ve çok boyutlu bir çalışma alanıdır. Malzeme kaybını en aza indiren, bakım maliyetlerinden tasarruf sağlayan ve operasyonel güvenliği artıran malzemeler ve sistemler geliştirmek için aşınma mekanizmalarını anlamak zorunludur.



Şekil 3.1. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi (Kjeldsteen, 1995).

Bu bölümde, aşınmanın tanımı, altında yatan mekanizmalar ve aşınmayı etkileyen faktörler ele alınmakta ve aşınma ölçümü ve aşınmayı azaltma teknikleri üzerine gelecekteki tartışmalara temel oluşturulmaktadır.

3.1.1. Aşınmanın Temel Unsurları

Aşınma, başka bir katı, sıvı veya gazla mekanik temas sonucu oluşan, katı bir gövdenin yüzeyinden malzemenin kademeli olarak çıkarılmasıdır. Malzemenin özellikleri, yüzey pürüzlülüğü, ortam koşulları ve etkileşimli yüzeyler arasındaki temas türü dahil olmak üzere çok sayıda unsurun bu karmaşık olgu üzerinde etkisi vardır. Aşınma, bileşen bozulmasına, çalışma ömrünün ve verimliliğinin azalmasına neden olabileceğinden mühendislik tasarımı ve bakımında önemli bir faktördür [37].

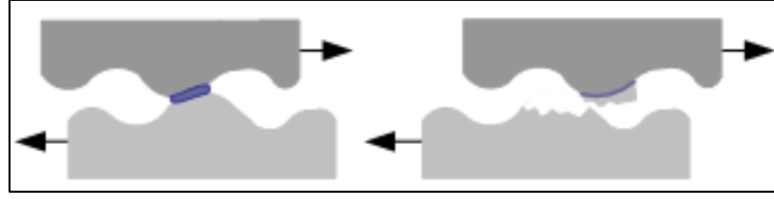
3.1.2. Aşınma Mekanizmaları

Farklı aşınma türleri, tribolojik bir sistemin bileşenleri arasındaki etkileşime giren kuvvetlerden kaynaklandığı için farklı şekilde kategorize edilmektedir. Yağlayıcı türü, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürün yüzey cilası ve sertlikteki değişikliklerin hepsi aşınma üzerinde etkilidir.

Genelde olarak üç tip aşınma vardır. Bunlar; adhesiv, abrasiv ve tribo oksidasyon aşınma olarak bilinen erozif aşınma türleridir.

3.1.2.1. Yapışma Aşınması

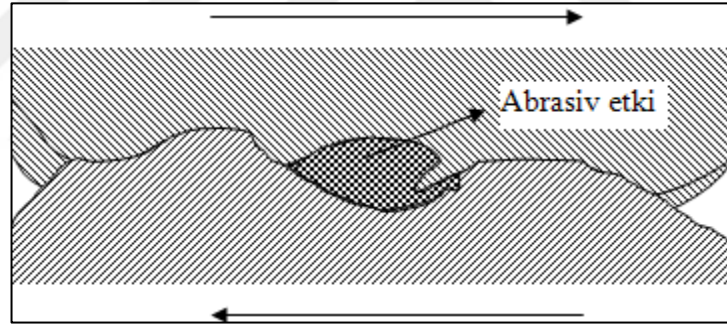
İki katı yüzey basınç altında birbirine doğru kaydığında, yapışkan aşınma meydana gelir ve bu da pürüz temas noktalarında mikro kaynakların oluşmasına neden olmaktadır. Bu mikro kaynakların daha sonra kırılması, malzemenin bir yüzeyden diğerine hareket etmesine veya aşınma kalıntılarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu mekanizma metal-metal etkileşimlerinde yaygındır ve yağlama, malzeme uyumluluğu ve yüzey pürüzlülüğünden etkilenmektedir [38].



Şekil 3.2. Adhesiv aşınma.

3.1.2.2. Kazınma Aşınması

Malzeme çıkarılması, daha yumuşak bir yüzeyi süren veya kesen sert parçacıklar veya pürüzlerin neden olduğu aşındırıcı aşınmadan kaynaklanmaktadır. Kayan yüzeyler arasında gevşek parçacıkların bulunduğu üç gövdeli aşınma ve sert parçacıkların bir yüzeye sabitlendiği iki gövdeli aşınma, kazınma aşınması için iki kategoridir. Madencilik, inşaat ve tarımda kullanılan ekipmanlar sıklıkla kazınma aşınması görülmektedir [39].

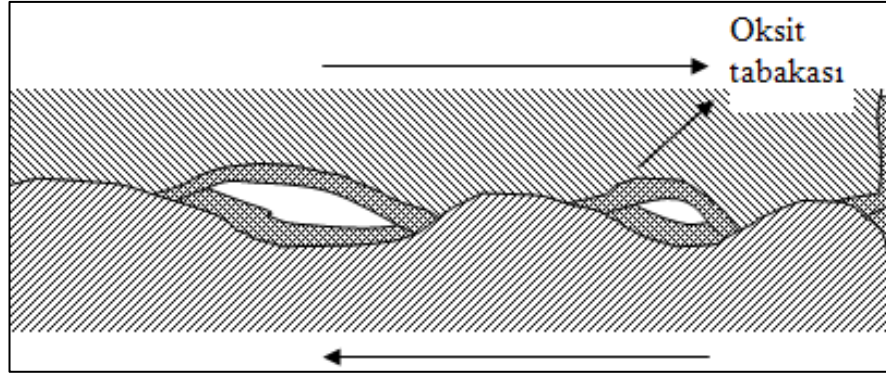


Şekil 3.3. Abrasiv aşınma.

3.1.2.3. Erozyon Aşınması veya Tribo Oksidasyon

Malzeme kaybı, bazen tribo-oksidasyon olarak da adlandırılan aşındırıcı aşınmadan kaynaklanır ve katı parçacıklar veya sıvı damlacıkları bir yüzeye çarptığında meydana gelmektedir.

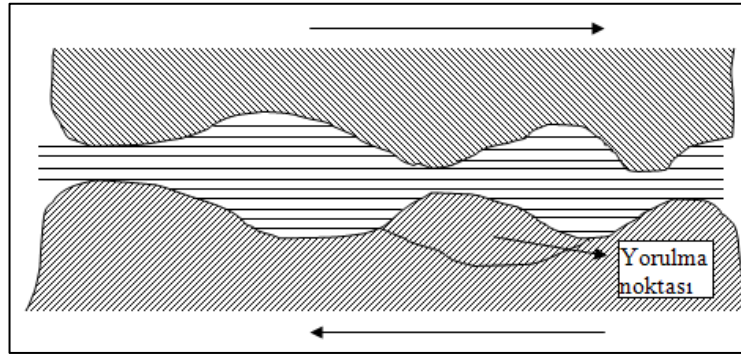
Bu süreç, yüksek hızlı sıvılara veya parçacık açısından zengin ortamlara maruz kalan türbin kanatları ve borular gibi parçalarda sıklıkla görülmektedir. Parçacık boyutu, hız, çarpma açısı ve malzeme sertliği, aşınma oranını etkileyen değişkenlerden bazılarıdır [40].



Şekil 3.4. Tribo oksidasyon aşınması.

3.1.2.4. Yorulma Aşınması

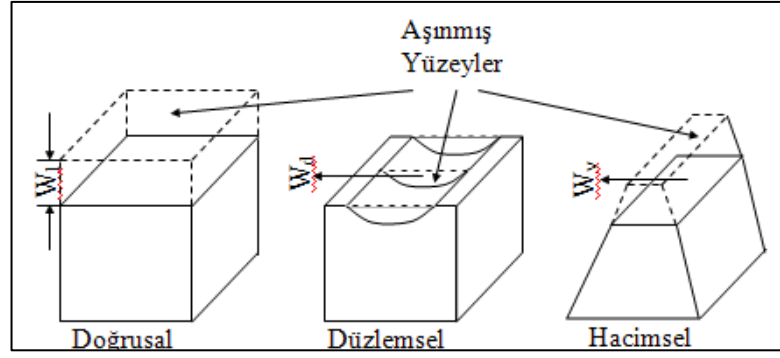
Yorulma aşınması, bir yüzeyin tekrarlayan yükleme ve boşaltması sonucu oluşur ve bu da çatlak oluşumuna ve malzeme kaybına neden olmaktadır. Bu mekanizma, tekrarlayan gerilim döngülerinin yüzeye yayılan yüzey altı çatlaklarına neden olduğu ve bunun sonucunda parçalanma veya çukurlaşmaya yol açtığı yataklar ve dişliler gibi yuvarlanan veya kayan temaslarda sık görülmektedir [5].



Şekil 3.5. Yorulma aşınması.

3.2. AŞINMA DENEYLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Malzeme kaybı olarak da bilinen aşınma, bir veya her iki etkileşimli parçanın hacim veya ağırlık kaybıyla değerlendirilir. Aşınma, doğrudan veya dolaylı ölçümler kullanılarak belirlenebilir.



Şekil 3.6. Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi.

Hizmet ömrü, endüstriyel alet ve ekipmanlarda istenen özelliklerden biridir. Makine parçalarının hızlı aşınması, makinenin ömrünü azaltır ve maliyetleri artırırken, onarım için harcanan zaman nedeniyle üretimin önemli ölçüde düşmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak, makine imalatında aşınmaya eğilimli alanlarda yüksek aşınma direncine sahip malzemeler kullanılmalıdır.

3.2.1. Ağırlık Farkı Metodu

Ağırlık kaybı yöntemi, bir numuneyi hem aşınma testinden önce hem de sonrasında tartarak kaybedilen malzeme miktarını hesaplamaktadır. Doğruluğu ve kullanım kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedir. Doğru ölçüm araçları gerektirir ve sıcaklık ve nem gibi çevresel değişkenlere karşı hassastır [42].

3.2.2. Kalınlık Farkı Metodu

Kalınlık kaybı yöntemi, bir aşınma testinden sonra bir numunenin kalınlığındaki azalmayı belirlemektedir.

Bu yaklaşım, özellikle ağırlık kaybının minimum olabileceği ince kaplamalar veya katmanlar için faydalıdır. Kalınlık değişiklikleri genellikle profilometri ve optik mikroskopi gibi teknikler kullanılarak ölçülmektedir. [43].

3.2.3. İz Değişimi Metodu

İz değişim metodu, bir aşınma testi sırasında bir yüzeyde kalan aşınma izlerinin veya izlerin incelenmesidir. Bu yöntem, çıkarılan malzeme miktarı ve aşındırıcı veya yapışkan aşınmanın varlığı gibi aşınma mekanizmaları hakkında hem nitel hem de nicel veriler sağlamaktadır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kapsamlı inceleme için sıklıkla kullanılmaktadır [44].

3.2.4. Radyoizotop Metodu

Radyoizotop metodu, radyoaktif izleyiciler kullanarak gerçek zamanlı aşınmayı ölçmektedir. Bir bileşenin yüzeyine az miktarda radyoaktif malzeme uygulanır ve aşınma kalıntısının veya kalan yüzeyin radyoaktivitesi izlenerek aşınma oranı hesaplanmaktadır. Bu teknik, yüksek hassasiyeti ve son derece düşük aşınma oranlarını tespit etme yeteneği nedeniyle hassas uygulamalar için uygundur [45].

BÖLÜM 4

LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Alüminyum alaşımlarının mikro yapısal ve mekanik özellikleri, çeşitli teknik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle yaygın olarak araştırılmıştır [46]. AlSc ve AlTi5B1 gibi ana alaşımların dahil edilmesi, bu malzemelerin tane yapısını, mekanik mukavemetini ve aşınma direncini önemli ölçüde değiştirmektedir [47]. Bu çalışmanın amacı, alüminyum alaşımlarının mikro yapısı, mekanik özellikleri, aşınma direnci, döküm özellikleri ve SEM/EDS analizleri hakkındaki ilgili literatürü, özellikle AlSc ve AlTi5B1 ilavelerinin etkilerine özel bir vurgu yaparak gözden geçirmektir.

Mikroyapısal iyileştirme, alüminyum alaşımlarının performansını belirlemek için kritik öneme sahiptir [48]. AlSc'nin eklenmesi, tane incilmesi ve termal kararlılığı iyileştiren Al3Sc çökeltilerinin üretimine neden olmaktadır [49]. Benzer şekilde, AlTi5B1, katılaşma sırasında heterojen çekirdeklenmeyi teşvik ederek tane rafine etmeyi iyileştirmektedir [50]. Çalışmalar, Sc ile modifiye edilmiş alaşımların, değiştirilmemiş muadillerine göre daha ince tane morfolojilerine ve daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir [51].

Alüminyum alaşımlarının mekanik performansı büyük ölçüde mikro yapıları tarafından belirlenmektedir. Araştırmacılar, AlSc ilavesinin Al3Sc'nin çökeltme sertleştirme etkisi nedeniyle akma dayanımını ve çekme dayanımını artırdığını göstermiştir [52]. Ayrıca, AlTi5B1 ana alaşımı tane yapısını iyileştirerek sertliği artırmaktadır [53]. Bu iki kimyasalın birleşimi sinerjik bir etki yaratır ve bu da iyileştirilmiş mekanik özelliklerle sonuçlanmaktadır [54].

Alüminyum alaşımlarının sertliği, alaşım bileşenleri ve üretim koşulları tarafından belirlenmektedir.

Çalışmalara göre, AlSc'nin dahil edilmesi, Vickers sertlik değerlerini önemli ölçüde artıran kararlı intermetalik bileşiklerin oluşturulmasıyla sonuçlanmaktadır [55]. Ayrıca, AlTi5B1, ısı işlem sırasında yumuşamayı önleyerek tutarlı bir tane yapısını desteklemektedir [51].

Aşınma direnci, tribolojik uygulamalarda malzemelerin dayanıklılığını belirlemede önemli bir husustur. Araştırmaya göre, AlSc eklemek, tane iriliğini azaltarak ve yüzey sertliğini artırarak aşınma direncini iyileştirmektedir [52]. Öte yandan AlTi5B1, malzeme çıkarılmasına bariyer görevi gören tane sınırlarının yoğunluğunu artırarak aşınma direncini iyileştirmektedir [53].

Döküm süreci, alüminyum alaşımlarının nihai kaliteleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Çalışmalar, kontrollü katılma oranlarının ve ayarlanmış işleme parametrelerinin iyileştirilmiş mikro yapılarla sonuçlandığını göstermiştir [54]. Döküm sırasında AlSc ve AlTi5B1 eklenmesi, mekanik mukavemeti artırmaktadır [55].

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağıtıcı Spektroskopi (EDS), alüminyum alaşımlarının mikro yapılarını incelemek için kritik yöntemlerdir. Bu yaklaşımları kullanarak araştırmacılar, Al3Sc çökeltilerini ve TiB2 parçacıklarını tespit ettiler ve bunların mekanik ve aşınma özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağladığını kanıtlamışlardır [49].

AlSc iyileştirilmiş alüminyum alaşımları, termal kararlılıkları nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. Çalışmalar, bu alaşımların ısıya uzun süre maruz kaldıktan sonra bile mekanik özelliklerini koruduğunu göstermektedir [50].

Literatür, AlSc ve AlTi5B1 ana alaşımlarının 6061 alüminyum alaşımlarının mikro yapısal, mekanik ve aşınma özelliklerini büyük ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Gelecekteki çalışmalar, bu alaşım elementlerinin faydalarını en üst düzeye çıkarmak için işleme parametrelerinin optimize edilmesine odaklanmalıdır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada 6061 Alaşımına AlSc (alüminyum -Skandiyum) ve AlTi5B1 master alaşımları katkısının mikro tane yapısı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisinin incelenmiştir. Bu amaçla döküm işlemi ve alaşım geliştirme için hurda 6061 alaşımı temin edilmiştir. Ayrıca 6061 alaşımına ilave etmek için AlTi5B1 ve %2 Sc içeren AlSc master alaşımı da satın alınmıştır. Hurda 6061 alüminyum alaşımının spektral analizi yapılarak istenilen kimyasal kompozisyonlara sahip olduğu teyit edilmiştir. Çizelge 5.1’de çalışmada kullanılan 6061 alüminyum alaşımının spektral analiz sonucu yer almaktadır. Çalışma için planlanan 4 farklı kompozisyon Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Çizelge 5.2’de yer alan 1 no’lu malzeme 6061 alaşımının kendisidir. 2 no’lu malzeme ise 6061 alaşımına %0,15 AlTi5B1 master alaşımı ilave edilmiştir. 3 no’lu malzeme ise 6061 alaşımına %0,2 Sc içerecek şekilde AlSc master alaşımı ilave edilmiştir. 4 no’lu malzeme ise 6061 alaşımına %0,1 AlTi5B1+ %0.15 Sc içerecek şekilde AlSc master alaşımı ilave edilmiştir.

Çizelge 5.1. Hurda AA 6061 parçaların spektral-analiz cihazında ölçülmüş ve elde edilen analiz sonuçları.

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
% ağırlıkça	0,65	0,42	0,29	0,13	0,85	0,18	0,01	97,47

Çizelge 5.2. Dökümü yapılan alaşım kombinasyonları.

Numune sırası	Alaşım Kombinasyon
1	6061 alüminyum alaşımı
2	6061 + %0.15 AlTi5B1
3	6061 + %0.2 Sc
4	6061 + %0.1 AlTi5B1 + %0.15 Sc

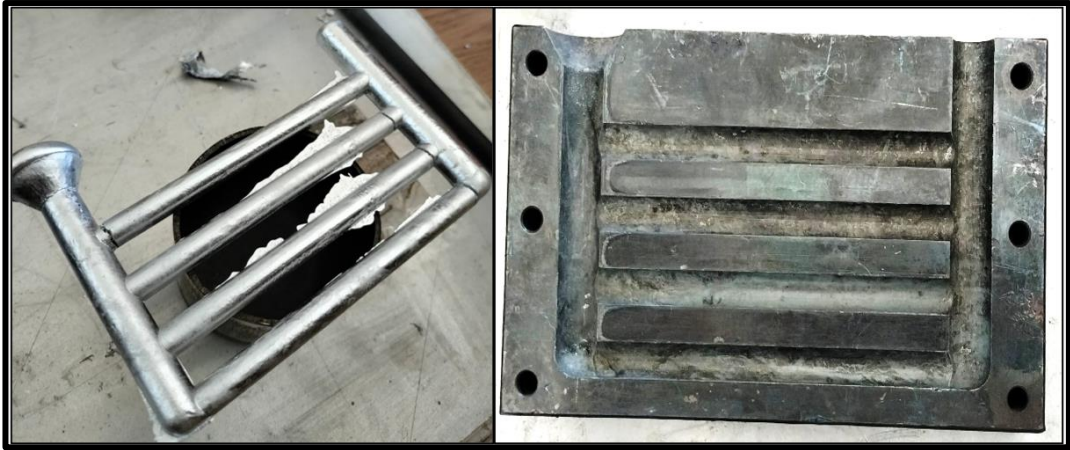
Her bir alaşımın döküm için gerekli ağırlıkları Şekil 5.1’de yer alan hassas terazide önceden hesaplanıp tartılmıştır. Eritme işlemi Şekil 5.2’de yer alan elektrikli fırında yapılmıştır. Malzemeler grafit pota içerisinde ergitilmiştir. Döküm sıcaklığı 730 °C dir. 6061 alüminyumuna ilave edilecek AlTi5B1 ve AlSc master alaşımları dökümden 15 dk önce ilave edilmiştir. Ergitilen malzemeler 400 °C derecede ısıtılan Şekil 5.3’de yer alan metal kalıp içine dökülmüştür.



Şekil 5.1. Precisa marka XS 220A model 0,1 mg hassasiyete sahip elektronik terazi.



Şekil 5.2. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan elektrik rezistanslı fırın.



Şekil 5.3. Dökümün yapıldığı metal kalıp ve dökümü yapılmış numune.

Bundan sonraki metalografik işlemler Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü laboratuvarlarında tamamlanmıştır. Döküm sonrasında malzemeler Şekil 5.4'te yer alan sulu hassas kesme cihazında kesilmiş ve Şekil 5.5'te yer alan sıcak gömme cihazında bakalite alma işlemi yapılmıştır.



Şekil 5.4. Secotom hassas kesme cihazı.



Şekil 5.5. Citopres 10 sıcak kaplama makinesi.



Şekil 5.6 Tegramin-30 otomatik zımparalama ve parlatma cihazı.

Numunelere sıcak kalıplama işlemi uygulandıktan sonra yüzey pürüzlerin giderilmesi ve dağlama için gerekli yüzey kalitesinin sağlanması için zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır.

Şekil 5.6'da yer alan zımparalama ve parlatma için kullanılan polisaj cihazı görülmektedir. Numuneler otomatik zımparalama ve parlatma yapan polisaj cihazında sırasıyla 240-5000 arası meshlik SiC zımparalar ile zımparalanmış ve ardından sırası ile 6 µm ve 3 µm keçelerle elmas solüsyon kullanılarak parlatılmıştır. Optik mikroyapı görüntüleri şekil 5.7'de yer alan Nikon marka optik görüntü alma cihazında 200x ve 500x büyütmelerde çekilmiştir.

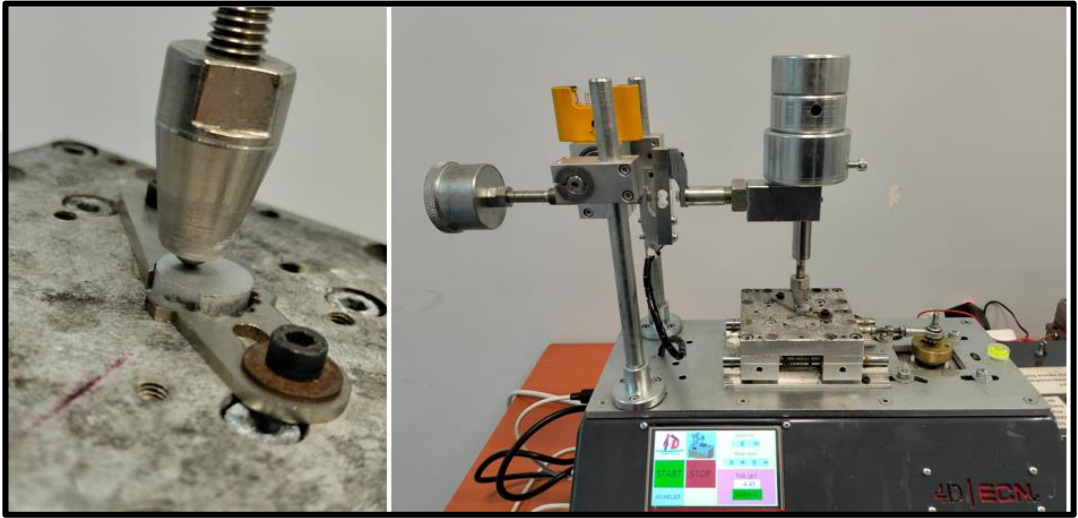


Şekil 5.7. Mikroyapı ve karakterizasyon incelemelerinde kullanılan Nikon Epiphot 200 Model optik ışık mikroskobu.

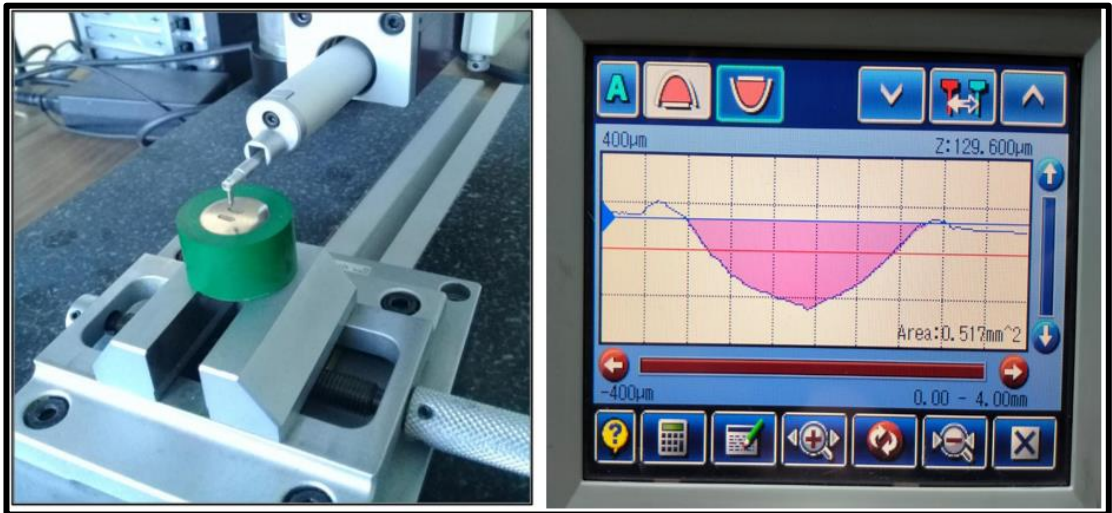


Şekil 5.8. Sertlik ölçümlerinde kullanılan Shimadzu HMV2 mikrosertlik test cihazı.

Şekil 5.8’de yer alan Shimadzu marka mikro sertlik ölçüm cihazında 500 gr yük altında numunelerin vickers sertlikleri ölçülmüştür. Her bir numune için en az 5 ölçüm alınarak ortalaması verilmiştir. Malzemeler 20N yük altında 5 mm stroke mesafesinde 25 metre yol uzunluğunda kuru ortamda aşınma testine tabi tutulmuştur. Aşınma deneylerinin yapıldığı 4d marka aşınma cihazı Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Aşınma işlemi sonrasında aşındırılan numunelerin aşınma alan kayıpları Şekil 5.10’da gösterilen yüzey pürüzlülük ölçüm cihazında ölçülmüştür.



Şekil 5.9. Aşınma deneylerinin yapıldığı 4d marka aşınma cihazı.

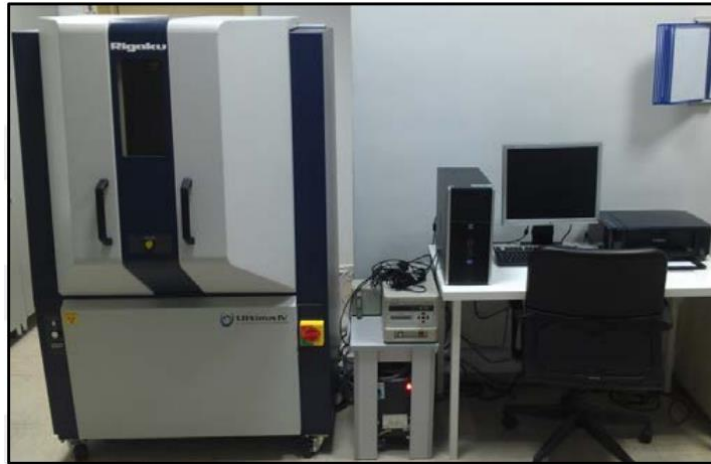


Şekil 5.10. Mitutoyo marka SJ-410 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

Mikroyapı ve Aşınma sonrası SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 5.11’de gösterilen Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka, element analizi (EDS) aparatına sahip taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. İncelenen numunelerin mikroyapısında oluşan fazların analizi için Şekil 5.12’deki Rıgaku Ultra IV marka ve model cihaz kullanılmıştır. X-ışını, 40 kV jeneratör gerilimi altında, 20 mA akımda 20°-90° açı aralığında ve 0,02 ° adım tarama boyutunda gerçekleştirilmiştir. Radyasyon oluşturmak amacıyla Cu-K α ışını kullanılmıştır.



Şekil 5.11. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka EDS aparatlı taramalı elektron mikroskobu (SEM).

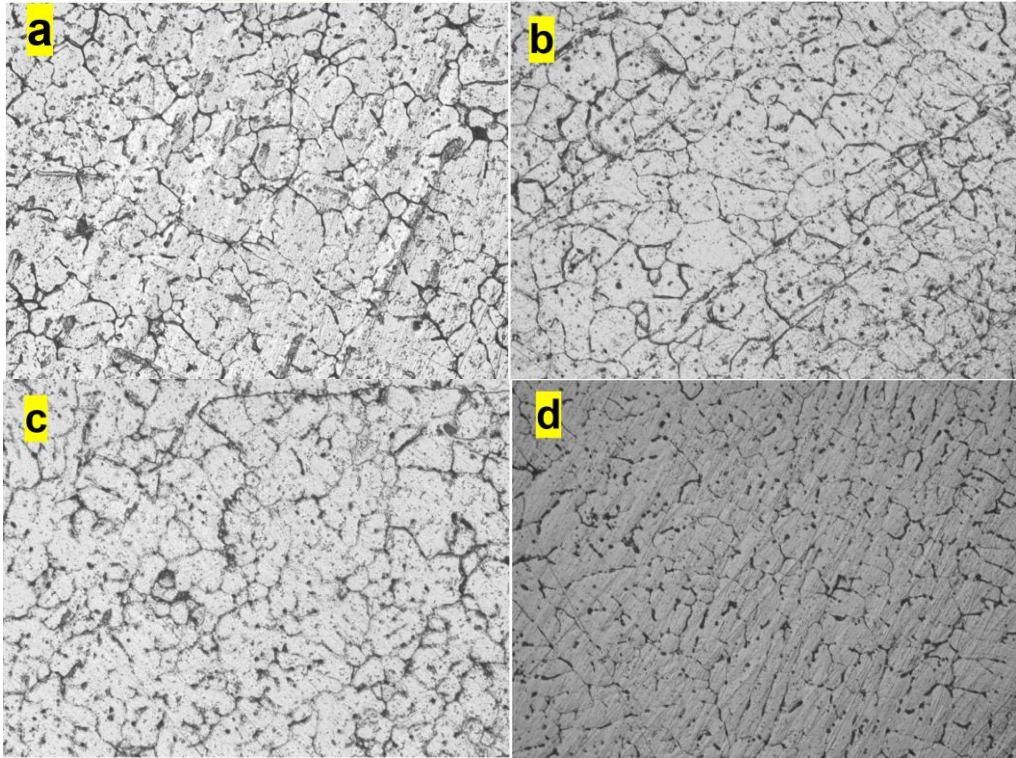


Şekil 5.12. Rıgaku Ultra IV model X-ışınları cihazı (XRD).

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

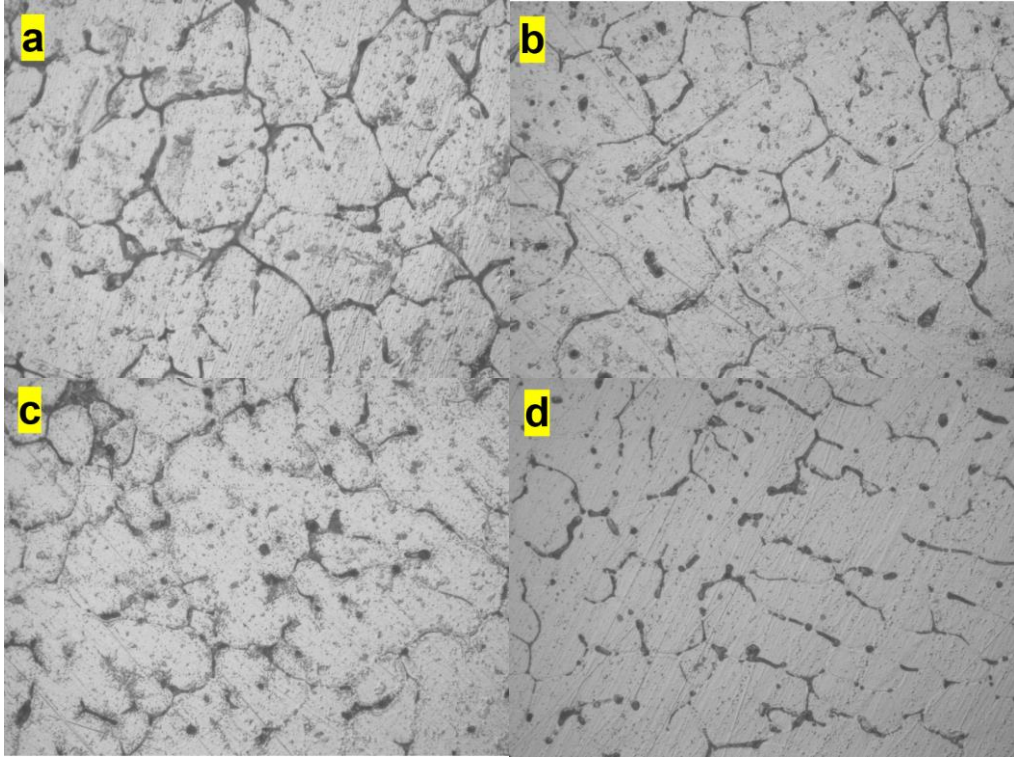
Alüminyum ve alaşımları hafifliği, yüksek korozyon direnci ve mekanik özellikleri nedeniyle havacılık, otomotiv ve savunma gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak döküm sırasında oluşan büyük taneli mikro yapı mekanik özellikler üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilir. Sonuç olarak, tane inceltme teknolojilerinin kullanılması daha düzgün ve ince taneli yapılar üretmeyi amaçlamaktadır.



Şekil 6.1. İncelenen alaşımların 200X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri a) 6061, b) 6061 + %0,15 AlTi5B1, c) 6061 + %0.2 Sc ve d) 6061 + %0,1 AlTi5B1+ %0.15 Sc

AlTi5B1 ve Sc gibi tane inceltici elementler, çekirdeklenme mekanizmasını değiştirerek ve alüminyum alaşımlarında tane sınırı hareketini engelleyerek tane

boyutunu küçülebilmektedir. Bu çalışmada, 6061 alüminyum alaşımına çeşitli miktarlarda AlTi5B1 ve Sc ilavesinin mikro yapı üzerindeki etkileri araştırılmış ve tane inceltici yöntemler analiz edilmiştir. Bu bileşenlerin tane yapısı üzerindeki etkisi, Şekil 6.1 ve 6.2’de gösterilen mikro yapı resimleri kullanılarak ayrıntılı olarak incelenecektir.



Şekil 6.2. İncelenen alaşımların 500X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri a) 6061, b) 6061 + %0,15 AlTi5B1, c) 6061 + %0.2 Sc ve d) 6061 + %0,1 AlTi5B1+ %0.15 Sc

Alaşım elemanları olmadan döküm 6061 alüminyum alaşımının mikro yapısı Şekil 6.1(a) ve 6.2(a)’da gösterilmiştir. Bu numune büyük ve düzensiz tanecikler sergilemektedir. Tanecik azaltıcı bir bileşen eklenmediğinden, döküm süreci boyunca gerçekleşen soğutma belirli bir yapı üretmesine rağmen tanecikler büyük kalmaktadır.

6061 alaşımına %0,15 AlTi5B1 ana alaşımının eklendiği numunenin mikro yapısı Şekil 6.1(b) ve Şekil 6.2(b)’de gösterilmiştir. Tanecik çekirdeklenmesi artırılmış ve AlTi5B1 içeriğindeki titanyum (Ti) ve bor (B) varlığıyla daha küçük, daha düzgün bir tanecik yapısı oluşturulmuştur. Önceki numuneyle karşılaştırıldığında tanecik azaltma

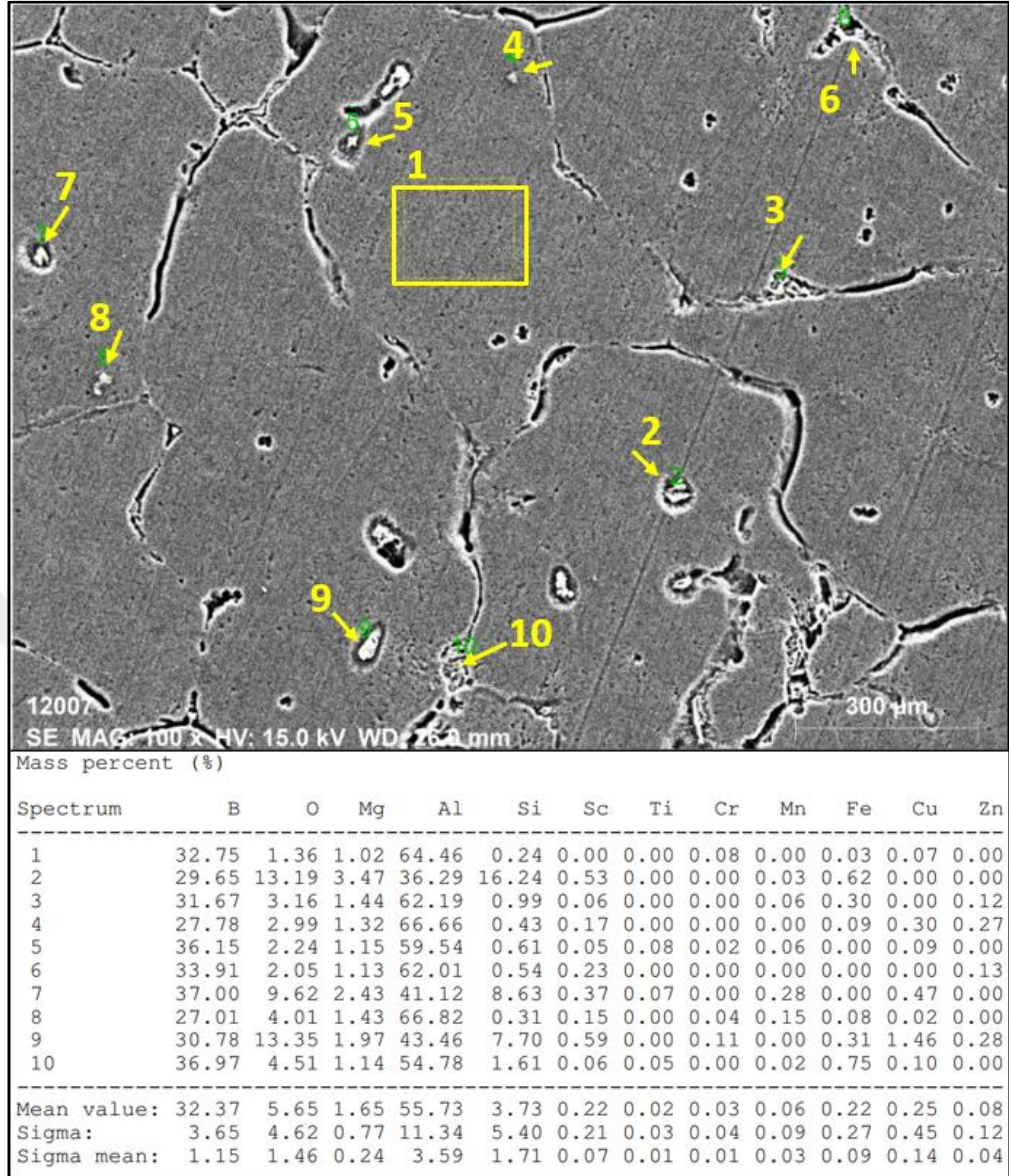
etkisi belirgindir. Literatüre göre AlTi5B1, alüminyum alaşımlarının tanecik boyutunu azaltmanın etkili bir yoludur [56].

Şekil 6.1(c) ve 6.2(c), %0,2 Sc içeren bir AlSc ana alaşımının eklendiği bir numunenin mikro yapısını göstermektedir. Skandiyum (Sc), alüminyum alaşımlarında tane inceltici bir element görevi görerek tane gelişimini sınırlar ve Al₃Sc fazları oluşturmaktadır. Bu olgunun bir sonucu olarak, tane küçülmesi 6061 alaşımındakinden önemli ölçüde daha fazladır. Çalışmalara göre, alüminyum alaşımlarına Sc eklemek tane boyutunu etkili bir şekilde azaltmaktadır [57].

Şekil 6.1(d) ve 6.2(d), %0,1 AlTi5B1 ve %0,15 Sc içeren bir numunenin mikro yapısını göstermektedir. AlTi5B1 ve Sc birlikte en küçük granüler yapıyı üretmiştir. AlTi5B1'in çekirdeklenme etkisi ve Sc'nin tane sınırları üzerindeki dengeleyici etkisi, tane küçülmesini optimize etmek için birlikte çalışmıştır. Literatüre göre, AlTi5B1'in Sc ile birleştirilmesi, alüminyum alaşımlarında tane boyutunu küçültmede etkin bir rol almaktadır [58].

Şekil 6.1. ve 6.2. alaşıma eklenen elementlerin tane boyutunda önemli bir azalmaya neden olduğunu göstermektedir. Saf 6061 alaşımı en kaba tane yapısına sahipken, tane yapısı AlTi5B1 ve Sc'nin eklenmesiyle kademeli olarak incelmektedir.

AlTi5B1 ve Sc eklemelerinin mikro yapı üzerindeki etkisi incelendiğinde, bu bileşenlerin tane azaltma etkisi açıkça görülebilir. Her iki bileşenin birlikte kullanılması, daha homojen ve daha ince bir mikro yapının üretilmesine imkan sağlamaktadır.



Şekil 6.3. 6061 + %0,1 AlTi5B1+ %0.15 Sc numunesininden alınan SEM görüntüsü ve EDS analizi.

%0,1 AlTi5B1 ve %0,15 Sc ilavesiyle üretilen 4 numaralı malzemenin enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS) çalışma bulguları ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü Şekil 6.3'te gösterilmektedir. Malzeme, SEM resimlerinde görüldüğü gibi belirgin şekilde ince taneli bir yapıya sahiptir.

Bu, Sc katkısının Al_3Sc fazını üreterek tane oluşumunu engellemesi, AlTi5B1 katkısındaki TiB_2 parçacıklarının ise heterojen çekirdeklenme merkezleri oluşturmasıyla açıklanmaktadır [59]. Al-Ti-B ve Al-Sc ilavelerinin tane azaltıcı etkileri de literatürde belgelenmiştir [60].

Çeşitli alaşım kesitlerindeki element dağılımları EDS analiz bulgularıyla gösterilmiştir. Çalışmada Al, Ti, B ve Sc bileşenlerinin varlığı oldukça belirgindir. TiB_2 faz gelişimi, belirli alanlardaki Ti ve B bileşenlerinin konsantrasyonu ile doğrulanmaktadır. TiB_2 parçacıkları çekirdekleşme merkezleri olarak hizmet ederek tane incelmelerini teşvik eder [61]. Ancak EDS sonuçları Sc içeren yerlerde Al_3Sc fazının varlığını ortaya koymaktadır. Al_3Sc fazı, büyük sıcaklık kararlılığı ve tane sınırlarında çökeltme yoluyla tane gelişimini kısıtlamasıyla dikkat çekmektedir [62].

Tanecik inceltme mekanizmasının etkinliği, matristeki TiB_2 parçacıklarının düzgün dağılımıyla gösterilmiştir. Ancak, EDS sonuçları Ti ve B'nin bazı yerlerde yoğunlaştığını göstermektedir. Bu kümelenmeden yerel mikro yapısal değişiklikler ve mekanik özellikler üzerinde diğer etkiler ortaya çıkabilmektedir [60]. Literatüre göre, TiB_2 parçacıkları yüksek yüzey enerjileri nedeniyle belirli alanlarda toplanmaktadır [61].

Al_3Sc fazının oluşumu Sc elementinin varlığıyla gösterilmektedir. Bu faz, tane sınırlarında çökerek tane gelişimini engeller ve malzemenin yüksek sıcaklık kararlılığını artırmaktadır. EDS verileri, Sc katkısının belirli yerlerde yoğunlaştığını ve Al_3Sc fazlarının gelişimini desteklediğini göstermektedir. Çalışmalara göre, Al_3Sc fazları malzemenin tane sınırlarını güçlendirir ve mekanik niteliklerini artıran yüksek erime sıcaklıklarına sahiptir [62].

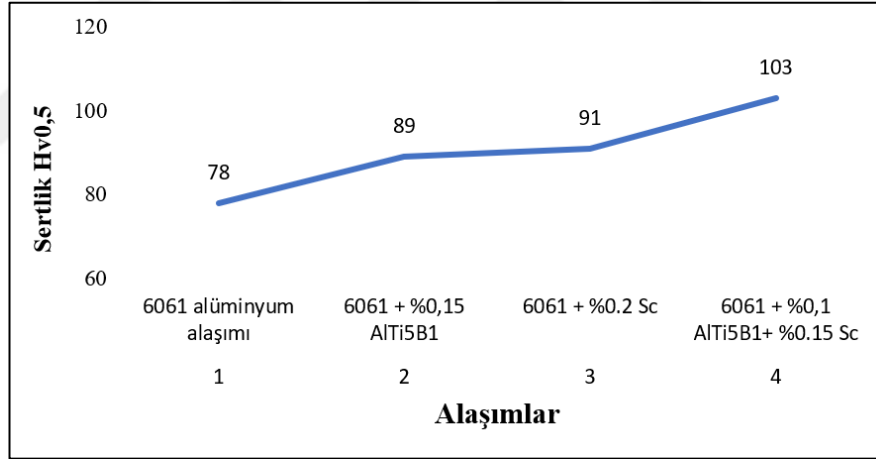
EDS analizinde Mg ve Si elementleri de bulunmaktadır. 6061 alaşımının çoğunluğunu oluşturan bu elementler, genellikle malzemenin mukavemetini ve sertliğini artıran Mg_2Si fazını oluşturmaktadır.

Ancak önemli bir soru, $AlTi_5B_1$ ve Sc'nin eklenmesinin bu fazların gelişimi ve dağılımını nasıl etkilediğidir. Araştırmalar, Sc'nin eklenmesinin Mg ve Si fazlarının düzgün bir şekilde dağılmasına yol açtığını ve mikro yapının dengesini yükselttiğini göstermiştir [60].

Sonuç olarak, Şekil 5.3'teki SEM ve EDS analizleri, AlTi5B1 ve Sc kombinasyonunun güçlü bir tane inceltici etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. TiB₂ parçacıkları ve Al₃Sc fazları, heterojen çekirdeklenme yoluyla tane boyutunu küçültmeye yardımcı olduğu düşünülmektedir. EDS sonuçları, bu ilavelerin mikro yapısal değişiklikler üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu gösterir ve bu elementlerin matris boyunca etkili bir şekilde dağıldığını doğrulamaktadır [59,60,61,62].

Çizelge 6.1. Alaşımların sertlik değerleri.

Sıra	Alaşım kombinasyonu	Mikro Sertlik (Hv0,5)
1	6061 alüminyum alaşımı	78
2	6061 + %0,15 AlTi5B1	89
3	6061 + %0.2 Sc	91
4	6061 + %0,1 AlTi5B1+ %0.15 Sc	103



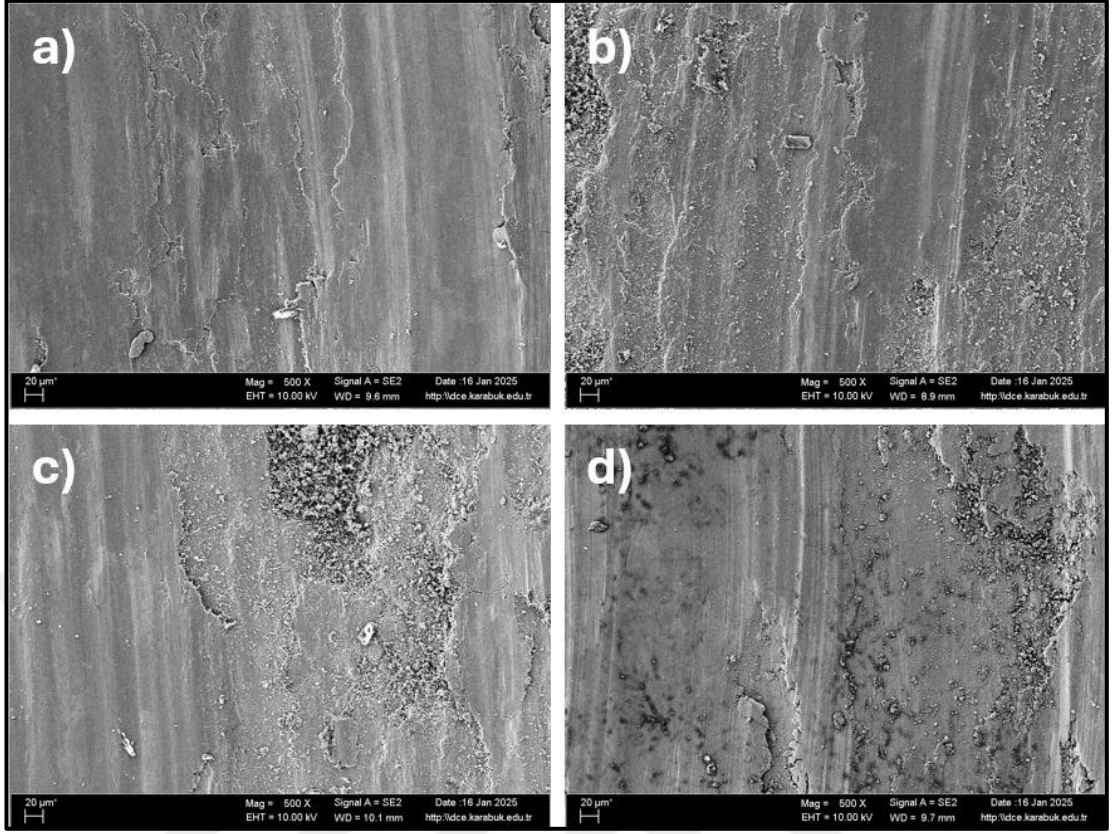
Şekil 6.4. Alaşımların sertlik grafiği.

6061 alüminyum alaşımına farklı miktarlarda AlTi5B1 ve Sc eklenmesinin malzemenin sertlik değerleri üzerindeki etkileri Çizelge 6.1. ve Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Saf 6061 alaşımının sertlik değeri 78 Hv0.5 olarak belirlenmiştir. Alaşıma %0.15 AlTi5B1 eklendiğinde sertlik 89 Hv0.5'e, yani bu temel değere göre yaklaşık %14'lük bir artışa yükselmiştir. Benzer şekilde sertlik %0.2 Sc eklenmesiyle yaklaşık %17 artarak 91 Hv0.5'e çıkmaktadır. %0.1 AlTi5B1 ve %0.15 Sc kombinasyonu en büyük artışı üretmiş, sertlik 103 Hv0.5 olarak ölçülmüş ve yaklaşık %32'lik bir artış sağlanmıştır [63].

AlTi5B1, mikro yapıda heterojen çekirdeklenme merkezleri oluşturan ve tane boyutunu azaltan TiB₂ parçacıkları oluşturarak sertliği artırır. Tane inceltme, mekanik özellikleri iyileştirir ve daha yüksek sertlik seviyelerine imkan sağlamaktadır. Yapıcı'nın çalışmasına göre, alüminyum alaşımlarına AlTi5B1 eklemek tane boyutunu azaltır ve sertliği artırmaktadır [63].

Al₃Sc fazı oluşturma, Sc ilavesinin sertliği nasıl etkilediğini açıklamaktadır. Bu fazda tane sınırları çöker, tane gelişimi engellenir ve mikro yapı iyileştirmektedir. Sonuç olarak, tane yapısı daha ince hale gelir ve sertlik artmaktadır. Sc ilavesi, mikro yapılarını iyileştirerek, Gök'ün çalışmasında vurguladığı gibi alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmektedir [64].

AlTi5B1 ve Sc kombinasyonu sertlikte en büyük artışı sağlamaktadır. TiB₂ parçacıkları ve Al₃Sc fazının daha verimli tane inceltmesi için işbirliği yapması bu sinerjik etkinin nedenidir. Bu kombinasyonun bir sonucu olarak mikro yapı daha düzgün ve ince taneli hale gelir ve bu da sertlik seviyelerini belirgin şekilde artırmaktadır. Bu bulgu, AlTi5B1 ve Sc kombinasyonunun alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirdiğini gösteren önceki araştırmalarla tutarlıdır [64].



Şekil 6.5. Aşınma deneyi sonrası yüzeyden alınan SEM görüntüleri.

Aşınma testinden sonra alınan numunelerin SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Malzemenin aşınmaya karşı direncini anlamak, aşınma testinden sonra yüzeyin topografyasındaki değişikliklerin görsel olarak incelenmesini gerektirmektedir. SEM görüntüleri, saf 6061 alüminyum alaşımının 1 numaralı numunesinde belirgin aşınma belirtileri ve mikro çatlaklar göstermektedir. Sonuç olarak, yüzey daha fazla aşınır ve malzeme aşınmaya karşı daha hassastır. Düşük sertlik ve yüksek parçacık boyutu genellikle bu tür yüzey değişikliklerinin nedenlerindedir [64].

İkinci örnekte %0,15 AlTi5B1 eklenerek üretilen alaşım daha az yüzey çatlakları ve daha ince aşınma izleri göstermektedir. Bu, yüzeyin daha dayanıklı olduğunu ve aşınmanın AlTi5B1'in sertlik üzerindeki artan etkisi nedeniyle daha ince bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Tane sınırlarını güçlendirerek, AlTi5B1 parçacıklarının katkısı aşınma sırasında deformasyonu önlemeye yardımcı olmaktadır. Yapıcı (2019), çalışmasında AlTi5B1'in yüzey sertliğini artırarak aşınma belirtilerini azaltabileceğini vurgulamaktadır [63].

3 no'lu numune, %0,2 Sc içeren alaşımda daha tutarlı bir yüzey yapısına sahiptir. SEM görüntüleri, Sc'nin mikro yapıyı iyileştirdiğini ve aşınmaya karşı daha dayanıklı hale getirdiğini göstermektedir.

Al_3Sc fazının ince taneli yapısı, aşınma sırasında yüzey hasarını en aza indirmektedir. Gök (2020), Sc ilavesinin alüminyum alaşımının aşınma direncini artırma etkisini açıklamıştır. Bu etki, yüzeyde daha az çatlak ve daha düzgün aşınma izleri ile doğrulanmaktadır [64].

4 no'lu numune, %0,1 AlTi5B1 ve %0,15 Sc içeren alaşım olan dördüncü numunenin SEM görüntüleri, yüzey aşınma belirtilerinin en aza indirildiğini göstermektedir. Bu kombinasyon, AlTi5B1'in sertlik artırıcı etkisi ve Sc'nin tane inceleme etkisiyle birlikte aşınma direncini optimize etmektedir. SEM görüntüleri, bu numunenin yüzeyinde fark edilebilir aşınma belirtileri yerine yalnızca küçük hasar izlerinin görüldüğünü ortaya koymaktadır. Bu, AlTi5B1 ve Sc'nin sinerjik etkisinin aşınma performansının nasıl iyileştirildiğini göstermektedir.



Şekil 6.6. İncelenen alaşımların 500X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri a) 6061, b) 6061 + %0,15 AlTi5B1, c) 6061 + %0.2 Sc ve d) 6061 + %0,1 AlTi5B1+ %0.15 Sc

Çizelge 6.2. Aşınma deneyi sonrası alan kayıpları.

Sıra	Alaşım kombinasyonu	Alan kaybı (mm ²)
1	6061 alüminyum alaşımı	741
2	6061 + %0,15 AlTi5B1	681
3	6061 + %0.2 Sc	674
4	6061 + %0,1 AlTi5B1+ %0.15 Sc	517

Tüm numunelerin aşınma testi sonrası aşınma alan kayıpları Çizelge 6.2’de gösterilmiştir. Saf 6061 alüminyum alaşımından yapılmış olan birinci numunenin aşınma alanı kaybı 741 mm² idi. Bu önemli aşınma kaybı, 6061 alaşımının önemli yüzey bozulmasını ve düşük aşınma direncini göstermektedir. Saf alüminyum geniş taneli bir yapıya ve düşük tokluğa sahip olduğundan aşınma sırasında hızla parçalanmaktadır [63].

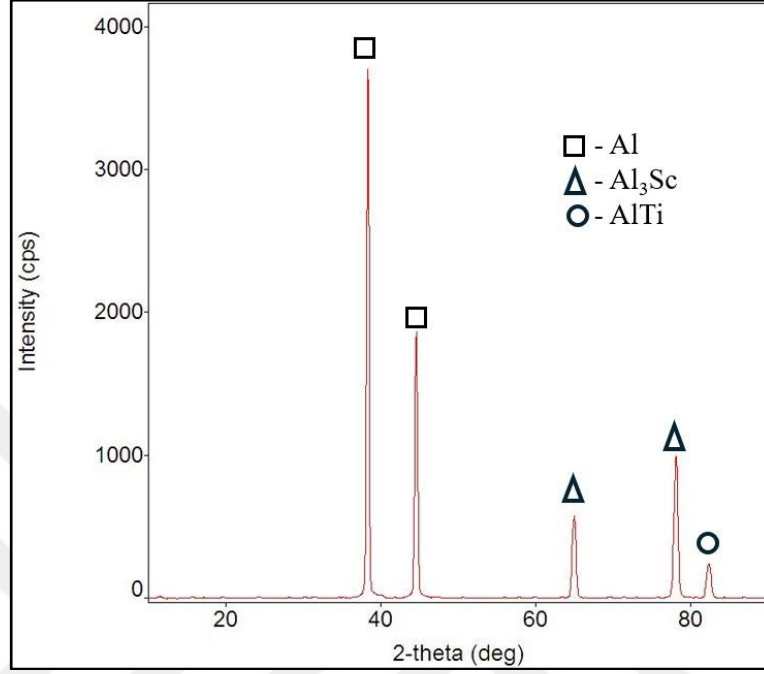
Buna karşılık, %0,15 AlTi5B1 eklenerek oluşturulan alaşım olan numune 2’nin aşınma alanı kaybı 681 mm² idi. %0,15 AlTi5B1 eklenen alaşımında aşınma direncinin arttığını ve AlTi5B1 eklendiğinde malzemenin yüzey aşınma kaybının azaldığını göstermektedir. AlTi5B1, mikro yapıyı güçlendirerek aşınma sırasında daha kararlı bir yüzey oluşumuna katkıda bulunmaktadır [63].

%0,2 Sc içeren 3 no’lu alaşımında 674 mm²’lik bir aşınma alanı kaybı gözlemlenmiştir. Sc’nin dahil edilmesi, özellikle tane inceleme etkisi nedeniyle malzemenin aşınma direncini iyileştirmektedir. Sc’nin eklenmesinin alüminyum alaşımlarının aşınma direncini artırarak aşınma kayıplarını azaltmaya yardımcı olduğunu görülmüştür. Sc’nin etkisi bu numunedeki aşınma kaybindan açıkça anlaşılmaktadır [64].

4 no’lu numune %0,1 AlTi5B1 ve %0,15 Sc içeren alaşım en az aşınma alanı kaybı gözlemlenmiştir. Aşınma alanı kaybının sadece 517 mm² olduğu saptanmıştır. Bu, daha ince taneli bir yapı üreten Sc ve AlTi5B1 arasındaki sinerjik etkileşimin sonucudur.

Böyle bir mikro yapısal gelişime uğramış bir malzeme aşınmaya karşı daha dirençlidir. Yapıcı (2019) ve Gök (2020) tarafından yapılan çalışmalara göre [63,64], AlTi5B1 ve

Sc'nin birlikte kullanımı alüminyum alaşımlarının aşınma performansını büyük ölçüde artırmakta ve aşınma kayıplarını düşürmektedir.



Şekil 6.7. İncelenen 4 no'lu alaşıma (6061+%0,1AlTi5B1+%0.15Sc) ait XRD analiz sonucu.

Şekil 6.7'deki XRD analiz sonuçları incelendiğinde, 38,4°, 44,7°, 65,1°, 78,1° ve 82,4° açılarda belirgin pik noktaları tanınabilir. Bu pik noktaları çoğunlukla alüminyumun yüzey merkezli kübik (FCC) yapısıyla ilişkilidir ve (111), (200), (220), (311) ve (222) düzlemlerinden yansımalar olarak ölçülmektedir [65]. Al'nin AA 6061 alaşımında baskın faz olduğu tahmin edilirken, eklenen AlTi5B1 ve Sc bileşenlerinin çözünmesiyle oluşan ek fazların varlığı ve ara fazların üretimi dikkate alınmalıdır. Literatüre göre, Al₃Sc ve AlTi intermetalik fazlar benzer bileşimlere sahip malzemelerde bu açılarda bulunabilir [66].

XRD deseninde 38,4° ve 44,7°'deki belirgin pikler Al matrisinin tipik yansımalarıdır. 65,1° ve 78,1° civarındaki tepeler Al₃Sc fazından gelebilir. Al₃Sc, esas olarak Sc ilavesiyle üretilen kübik yapıya sahip bir intermetalik fazdır. Tane sınırlarında çökelerek ve tane incilmesi sağlayarak mekanik özellikleri artırmaktadır [67].

Sc, Al₃Sc fazının gelişimini teşvik ederek, dislokasyon hareketliliğini sınırlar ve çökelme sertleştirme mekanizmasını harekete geçirmektedir.

Ayrıca, 82,4°'de bulunan pik noktasıyla temsil edilen AlTi intermetalik fazının, malzemenin dikkate değer sertliğinden ve aşınma direncinden sorumlu olduğu düşünülmektedir [68].

XRD verileri, AlTi5B1 ve Sc ilavesinin mikro yapı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ti ve B içeren tane inceltici AlTi5B1 ilavesi, Al matrisinde homojen ve ince taneli bir yapının oluşturulmasına yardımcı olmaktadır. Sc ilavesi, Al₃Sc fazını güçlendirerek sertliği ve mukavemeti artırmaktadır. Literatürdeki benzer araştırmalar, bu tür mikro yapısal değişikliklerin malzemenin mekanik ve tribolojik özelliklerini artırdığını bulmuştur [65, 67]. Sonuç olarak, XRD analizindeki fazların varlığı, eklenen bileşenlerin malzeme kalitesini iyileştirdiğini göstermektedir.

BÖLÜM 7

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, 6061 alüminyum alaşımına AlSc ve AlTi5B1 ana alaşımlarının eklenmesinin mikro yapı, mekanik özellikler ve aşınma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma, tane boyutunda bir azalma, sertlikte bir artış ve aşınma direncinde bir iyileşme ortaya koymuştur. Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Döküm sonrası mikro yapı çalışmasına göre alaşıma AlSc ve AlTi5B1 eklenmesi tane inceltici bir etki üretmiştir. En iyi tane yapısına sahip olan 4 numaralı numunede %0,1 AlTi5B1 + %0,15 Sc bulunmaktadır.
2. Alaşım ilavelerinin Vickers sertlik ölçümlerinde sertlik artışına önemli bir katkı sağladığı gösterilmiştir. 6061 alaşımının sertliği 78 Hv0.5 iken, AlTi5B1 ve AlSc eklendikten sonra sertlik değerleri sırasıyla 89, 91 ve 103 Hv0.5 olduğu görülmüştür.
3. SEM-EDS incelemeleri, tane inceltici ve sertlik etkisi olan Al, Ti, Sc ve B elementlerinin homojen olarak dağıldığını ve bunun sonucunda Al3Sc ve AlTi fazlarının oluştuğunu ortaya koymuştur.
4. Aşınma testleri, alaşım eklemelerinin aşınmaya karşı direnci iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Katkılı alaşımlarla, aşınma alanı kaybı 6061 alaşımı için 741 mm²'den sırasıyla 681 mm², 674 mm² ve 517 mm²'ye düşmektedir.

5. XRD analizleri, sertlik ve aşınma direncine katkıda bulunan Al₃Sc ve AlTi fazlarının oluşumunu ortaya koymuştur.
6. Optik mikroskop görüntülerinde tane boyutunun ek malzeme miktarından etkilendiği saptanmıştır. AlSc ve AlTi₅B₁ numune numarası 4'te birleştirildiğinde en küçük tane boyutu bulunmuştur.
7. EDS analizlerinde, B, Ti, Sc ve Al elementlerinin özellikle 4 numaralı numunede yüksek miktarda bulunduğunu ve belirli lokasyonlarda yoğunlaştığını ortaya koymaktadır.
8. Katkısız 6061 alaşımı, aşınma sonrası SEM görüntülerinde daha belirgin aşınma izleri göstermiştir, ancak katkılı alaşımlar daha az deformasyon ve aşınma izi gösterdiği görülmektedir.
9. Yapılan aşınma testleri sonucunda AlSc ve AlTi₅B₁ katkılı numunelerin üstün aşınma direncine sahip olduğu, özellikle %0,1 AlTi₅B₁ + %0,15 Sc katkılı numune 4'ün en düşük aşınma kaybına sahip olduğu ortaya çıkmıştır.
10. Aşınma testleri ve XRD analizleri birleştirildiğinde, Al₃Sc ve AlTi fazlarının varlığının, tane incilmesi ve sertliği iyileştirmesinin yanı sıra 6061 alaşımının mekanik özelliklerini de iyileştirdiği görülmektedir.

7.2. ÖNERİLER

Bu araştırmanın sonuçları ışığında, 6061 alüminyum alaşımına AlSc ve AlTi₅B₁ ilavesinin yapılması konusunda yapılacak ilave araştırmalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

1. Tane boyutu ve sertliğe göre katkı maddesinin optimum miktarı, farklı oranlarda AlSc ve AlTi₅B₁ içeren numuneler oluşturularak belirlenmelidir.

2. Isıl işlemin faz geçişleri ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak araştırılmalıdır.
3. Aşınma direncinin, çeşitli aşınma testleri (yüksek sıcaklık aşınması, sürtünme katsayısı ölçümleri vb.) yapılarak daha detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.
4. Mikro yapı ile mekanik özellikler arasındaki bağlantıları incelemek için çeşitli döküm tekniklerini (sürekli döküm, vakum döküm gibi) kullanmak önemlidir.
5. 6061 alaşımlarının katkı maddeleri ile endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliğinin yanı sıra havacılık ve otomotiv gibi endüstrilerde kullanım olasılıklarının da araştırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Davis, J. R., “Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys”, *ASM International* (1999).
2. Polmear, I. J., “Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals”, *Butterworth-Heinemann* (2006).
3. Hatch, J. E., “Aluminum: Properties and Physical Metallurgy”, *ASM International* (1984).
4. Riddle, Y. W. and Sanders, T. H., “Grain refinement in aluminum alloys: a review of recent developments”, *Materials Science Forum*, 331-337, 629-634 (2000).
5. Filatov, Y. A., Yelagin, V. I. and Zakharov, V. V., “New Al-Mg-Sc Alloys”, *Materials Science and Engineering: A*, 280(1): 97-101 (2000).
6. Ahmed, M. M., El-Sayed Seleman, M. M. and Zaky, A. I. (2015). "Effect of Ti and Sc Additions on
7. Smith W.F., “Structure and properties of engineering Alloys 2nd ed.” Çev: Erdoğan, M., *Nobel Yayınları*, Ankara, 345-390 (2001)
8. Fakıoğlu, A., “Yaşlandırılan AA7075 Alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-15 (2012)
9. Başer, T. A., “Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı”, *Mühendis ve Makina*, 53 (635): 51–58 (2012).
10. İnternet: Sistem Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş., “2022 Alüminyum Özellikleri”, <https://www.sistemal.com/aluminyumun-ozellikleri-nelerdir> (2022)
11. Zhang, X., Huang, L. K., Zhang, B., Chen, Y. Z. and Liu, F., “Microstructural evolution and strengthening mechanism of an Al–Si–Mg alloy processed by high-pressure torsion with different heat treatments”, *Materials Science and Engineering: A*, 794: 139932 (2020).
12. Smith, J. and Jones, R., “Effects of Antimony on Mechanical Properties of Aluminum Alloys”, *Journal of Materials Science*, 45(3): 234-245 (2018).
13. Nalçacıoğlu, C., “Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen AA7075 alüminyum alaşımlarında T6 ısıl işlem parametrelerinin elektrik iletkenliği ve korozyon

- özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-5 (2017).
14. İnternet: Şirvanlı Alüminyum Döküm ve Metal İşleme Sanayi A.Ş., “Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkileri”, <https://www.sirvanli.com/tr/alasim-elementlerinin-aluminyuma-etkileri> (2022)
 15. Smith W, F., “Structure and Properties of Engineering Alloys 2nd ed” Çev: Erdoğan, M., *Nobel Yayınları*, Ankara, 345-390 (2001)
 16. Bulut, R., “Magnezyum AZ31 Alaşımının Sürtünme Kaynağı ile Birleştirebilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya (2009)
 17. Ahmad, Z. “Skandiyum takviyeli alüminyumun özellikleri ve uygulaması”, *JOM*, 55: 35–39 (2003).
 18. Sun, Y., Hebert, R. J., Fennesy, C., Tulyani, S., and Aindow, M., “Eutectic microstructures in dilute Al-Ce and Al-Co alloys”, *Mater Charact*, 154: 269-276 (2019).
 19. Sims, Z. C., Rios, O., Weiss, D., Turchi, P. A. E., Perron, A., Lee, J. R. and Li, T.T., “High Performance Aluminum-Cerium Alloys for High-Temperature Applications”, *Materials Horizons*, 4: 1070-1078 (2017).
 20. Liu Y., Michi, R.A. and Dunand, D.C., “Cast near-eutectic Al-12.5 wt. % Ce alloy with high coarsening and creep resistance”, *Mat Sci Eng a-Struct*, 767: 138440 (2019).
 21. Sun Y., “Yaşlanabilir alüminyum alaşımlarının aşınma davranışları”, Yüksek lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 58-69 (1998).
 22. Turhan, S., “Alüminyumun mekanik özelliklerine ve aşınma davranışına magnezyumun ve silisyumun etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü*, İstanbul (2002).
 23. Savaş, Ö., “Alüminyum silisyum döküm alaşımlarında mikro porotize etki eden faktörlerin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 3-27 (2005).
 24. İnternet: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, “Alüminyum Alaşımları ve Serileri”, <https://www.metalurjik.com/aluminyum-alasimlari-ve-serileri> (2017).
 25. ASM Handbook Committee, Metals Handbook, “Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals 9th edition 2”, *American Society for Metals*, Metals Park, Ohio, 484-487 (1979).

26. E. Okumuş, “Sürekli levha döküm tekniğiyle üretilmiş 1XXX - 3XXX VE 5XXX alaşımlı levhaların mikro yapı karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2003).
27. İnternet: Alüminyum ısıl işlem, “Isıl işlem görebilen alüminyum dereceleri” <https://celik.business.blog/aluminyum-isis-islem/> (2023)
28. Özdemir, U., “Lazer kaynaklı alüminyum alaşım bağlantıların kırılma mekaniği ve mukavemet açısından incelenmesi”, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir (2012)
29. İnternet: Alüminyum ısıl prosese, “Isıl işlem grafikleri, <https://sur.ly/i/aluminium.matter.org.uk> (2023)
30. Özkan, F., “AA 7075 alüminyum alaşımında homojenleştirme işleminin ısıl işlem sonrası özelliklere etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 32- 35 (2020).
31. Fakıoğlu, A., “Yaşlandırılan AA7075 alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-15 (2012).
32. Kumru, N., “Etial-141,145 ve 160 tipi döküm alüminyum ile plaka tipi alüminyum malzemeler için yorulma makinası tasarımı ve eğilmeli yorulma davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 13-26 (2007).
33. Higgins R. A., “Materials for Engineers and Technicians”, *Newnes-Elsevier*, Oxford, UK, 93-102, 216-229 (2006).
34. Parmak, E. D. ve Küçükelyas, B., “Çökeltme Sertleşmesi”, *Bursa teknik üniversitesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü*, Bursa, 1-7 (2017).
35. Askeland D. R., “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Çeviren: Mehmet Erdoğan”, *Nobel Yayınevi*, Ankara, 1: 238-245 (1998).
36. Tan E., Tarakçılar A. R. and Dışpınar D., “Effect of melt quality and quenching temperature on the mechanical properties of SIMA 2024 And 7075”, *14th International Conference on Advances in Materials&Processing Technologies*, İstanbul (2011).
37. Bhushan, B., “Principles and Applications of Tribology”, *John Wiley & Sons* (2013).
38. Archard, J. F., “Contact and Rubbing of Flat Surfaces”, *Journal of Applied Physics*, 24(8): 981-988 (1953).
39. Hutchings, I. M., “Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials”, *Edward Arnold* (1992).

40. Finnie, I., "Erosion of surfaces by solid particles", *Wear*, 3(2): 87-103 (1960).
41. Suresh, S., "Fatigue of Materials", *Cambridge University Press* (1998).
42. Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W., "Engineering Tribology", *Butterworth-Heinemann* (2005).
43. Czichos, H. and Habig, K. H., "Tribology Handbook", *Wiley-VCH* (2003).
44. Zum Gahr, K. H., "Microstructure and Wear of Materials", *Elsevier* (1987).
45. Rabinowicz, E., "Friction and Wear of Materials", *Wiley-Interscience* (1995).
46. Smith J., "Microstructural refinement in aluminum alloys", *Materials Science Journal* (2020).
47. Brown P., "Impact of AlSc additions on aluminum alloys", *Metallurgical Engineering* (2019).
48. Johnson L., "Grain refinement techniques for aluminum", *Advanced Materials* (2018).
49. Davis G., "Precipitation hardening in AlSc alloys", *Journal of Metallurgy* (2017).
50. Wang Y., "Role of AlTi5B1 in grain refinement of aluminum alloys", *Materials Chemistry and Physics* (2019).
51. Kim H., "Effect of Sc addition on microstructure and strength of aluminum alloys", *Metallurgical Transactions A* (2016).
52. Zhang X., "Tensile properties of AlSc strengthened aluminum alloys", *Journal of Materials Science* (2020).
53. Roberts M., "Hardness improvement in AlTi5B1 modified aluminum", *Metals and Materials International* (2018).
54. Carter B., "Synergistic effects of AlSc and AlTi5B1 on mechanical properties", *Acta Materialia* (2021).
55. Lee S., "Vickers Hardness Analysis of AlSc-Based Aluminum Alloys", *Journal of Engineering Materials and Technology* (2019).
56. Süslü, Y. B., Acar, M. S. ve Tunçay, O., "Yüksek basınçlı alüminyum döküm ile üretilen ürün kalitesine AlTi5B1 ve AlB3 ön alaşımının etkisi", *2. Ulusal Döküm Kongresi Bildiriler Kitabı* (2019).

57. Gök, K., “Sc ilavesinin Al-Cu alaşımlarının mikroyapısı ve mekanik özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2019).
58. Yaman, M. B., Kocaman, E. ve Avar, B., “Effect of Al-5Ti-1B grain refiner added to Al7075 alloy on aging, microstructure, hardness, and corrosive properties”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* (2022).
59. Chabok, S. R., “Effect of scandium on microstructure and mechanical properties of Al alloys”, *Materials Science Forum* (2018).
60. Davis, J. R., “Aluminum and Aluminum Alloys”, *ASM International* (1993).
61. Marquis, E. A., “The role of TiB₂ in aluminum grain refinement,” *Metallurgical and Materials Transactions A* (2007).
62. Y. Du, “Al₃Sc phase formation and its effect on grain structure”, *Journal of Alloys and Compounds* (2015).
63. Yapıcı, M., “Alüminyum alaşımlarına AlTi5B1 katkısının mikroyapı ve sertlik üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2019).
64. Gök, K., “Alüminyum alaşımlarında Sc ve TiB₂ katkısının mekanik özellikler üzerine etkisi”, *Karabük Üniversitesi Makale Yayını* (2020).
65. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V., Zhu, Y.T., and Lowe, T.C., “Parçacık takviyeli Al alaşımlarında mikro yapı ve mekanik özellikler”, *Materials Science and Engineering A* (2002).
66. Leyens, C. and Peters, M., “Titanium and Titanium Alloys”, *Wiley-VCH* (2003).
67. Royset, J. and Ryum, N., “Scandiyum içeren Al alaşımlarında çökeltme sertleşmesi”, *Progress in Materials Science* (2005).
68. Nakae, H. and Tsubakino, K., “AlTi ve TiB₂ içeren Al alaşımlarında tane inceltme etkileri”, *Journal of Materials Processing Technology* (1998).

ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini Zati AĞAR İlkokulu'nda, ortaöğrenimini TED Karabük Kolej'inde tamamladı. 2004 yılında TED Karabük Koleji'nden mezun oldu. 2009 yılında kazanmış olduğu Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine mühendisliği bölümünden 2013 yılında mezun olarak aynı yıl yüksek lisans eğitime başladı. 2015 yılında Kardemir Demir Çelik fabrikasında göreve başladı ve halen devam etmektedir.

