

**T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİ İLE ÜRETİLEN
AL5083/AL₂O₃ ve AL5083/AL₂O₃+h-BN KOMPOZİTLERİN
AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Tugay Sonsuz SERT

Danışman: Doç. Dr. Özlem BARAN ACIMERT

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ERZİNCAN
2021**

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİ İLE ÜRETİLEN AL5083/AL₂O₃ ve AL5083/AL₂O₃+h-BN KOMPOZİTLERİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tugay Sonsuz SERT

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Özlem BARAN ACIMERT

Bu çalışmada, Al5083 alüminyum alaşımasının yüzeyine sürtünme karıştırma prosesi (SKP) ile Al₂O₃ ve h-BN parçacıkları takviye edilip yeni kompozit yüzey tabakaları elde edilmiştir. SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile %100Al₂O₃, %99Al₂O₃+%1h-BN, %97Al₂O₃+%3h-BN, %95Al₂O₃+%5h-BN ve %92Al₂O₃+%8h-BN takviye oranlarında tozlar kullanılarak Al5083/Al₂O₃, Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN, Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN, Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN ve Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakaları prosenin aynı yönlü iki paso uygulanmasıyla üretilmiştir. SKP ile kompozit tabakalarını üretmek için 600 kg yük altında 1250 rpm takım dönüş hızı, 55 mm/dak ilerleme hızı ve 3° takım açısı uygulanmıştır. Takviyesiz ve çeşitli oranlarda yapılan takviyeli Al5083 alüminyum alaşımasının yüzeyinde oluşturulan kompozit tabakaların mikro yapı, sertlik ve aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma deneyleri, ball-on disk aşınma deney düzeneğinde 5N yük altında 900 sn boyunca Al₂O₃ bilyeler kullanılarak yapılmıştır. Aşınma deneyleri sonucunda numuneler taramalı elektron mikroskobu ve 3D optik profilometre ile incelenmiştir. SKP ile Al5083 alaşımı yüzeyinde kompozit tabakalar başarılı bir şekilde üretilmiştir. Üretilen kompozit tabakalar SKP uygulanmış Al5083 alaşımasının tane boyutunu küçültmüş ve sertlik değerini artırmıştır. Yapılan aşınma deneyleri sonucunda, en iyi aşınma direnci Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakada elde edilmiştir.

2021, 57 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Al₂O₃, Al5083, Aşınma, h-BN, Kompozit Tabaka, Sürtünme Karıştırma Prosesi

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF WEAR PROPERTIES OF Al5083/Al₂O₃ AND Al5083/Al₂O₃+h-BN COMPOSITES PRODUCED BY FRICTION STIR PROCESS

Tugay Sonsuz SERT

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Özlem BARAN ACIMERT

In this study, a new composite surface layer was obtained by reinforcing Al₂O₃ and h-BN particles on the surface of Al5083 aluminum alloy by friction stir process (FSP). Al 5083 alloy with SKP applied and Al5083/Al₂O₃, Al5083/99%Al₂O₃+1%h-BN, Al5083/97%Al₂O₃+3%h-BN, Al5083/95%Al₂O₃+5%h-BN and Al5083/92%Al₂O₃+8%h-BN composite layers using powders at reinforcement ratios of 100%Al₂O₃, 99%Al₂O₃+1%h-BN, 97%Al₂O₃+3%h-BN, 95%Al₂O₃+5%h-BN and 92%Al₂O₃+8%h-BN were produced with SKP by applying two passes of the process in the same direction. To produce composite layers with SKP, 1250 rpm tool rotation speed, 55 mm/min feed rate and 3° tool angle were applied under 600 kg load. The microstructure, hardness and wear behavior of the composite layers formed on the surface of the reinforced Al5083 aluminum alloy made without reinforcement and at various rates were investigated. Wear tests were carried out using Al₂O₃ balls for 900 seconds under 5N load in a ball-on disc wear test setup. At the conclusion of the wear tests, the samples were examined with scanning electron microscope and 3D optical profilometer. Composite layers were successfully produced on the surface of Al5083 alloy with SKP. The produced composite layers reduced the grain size of the SKP applied Al5083 alloy and increased the hardness value. As a result of the wear tests, the best wear resistance was obtained in Al5083/92%Al₂O₃+8%h-BN composite layer.

2021, 57 Pages

Keywords: Al₂O₃, Al5083, Composite Layer, Friction Stir Process, h-BN, Wear

TEŞEKKÜR

Akademik kariyerime başlangıç adımı atmış olduğum bu yolda gerek derslerim gerekse yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca danışmanım olarak yalnızca akademik tecrübeleriyle değil, hayat tecrübesiyle de yanımda olan değerli hocam Doç. Dr. Özlem BARAN ACIMERT'e, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarını kullanmama ve akademik olarak bana her türlü desteği sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU'na, tez çalışmamda desteğini esirgemeyen Hitit Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ayşenur KELEŞ DAYAUÇ'a, laboratuvar çalışmalarında hiçbir desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Yaşar SERT'e, Teknisyen Harun ASLANER ve Teknisyen Abdulaziz GÜNEŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca beni hiçbir zaman yalnız bırakmayıp, desteklerini esirgemeyen ve bugünlere gelmemi sağlayan canım aileme ve dostlarıma da teşekkürü borç bilirim.

Tugay Sonsuz SERT
Ekim, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları.....	5
2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması	8
2.2.1. Dövme Al alaşımları	8
2.2.2. Döküm Al alaşımları	10
2.2.3. Alüminyum – magnezyum alaşımları (Al-Mg, 5xxx).....	11
2.2.3.1. Alüminyum – magnezyum alaşımları kullanım alanları.....	12
2.2.3.2. Al5083 alaşımı	13
2.3. Sürtünme Karıştırma Teknolojisi	13
2.4. Aşınma Mekanizmaları	20
2.4.1. Adhezif aşınma.....	20
2.4.2. Abrasif aşınma	21
2.4.3. Yorulma aşınması.....	22
2.4.4. Korozyon aşınması	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	24
3.1. Materyal	24
3.2. Yöntem	24
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	31
4.1. Yapısal Analiz Sonuçları.....	31
4.2. Mekanik Test Sonuçları	34
4.3. Tribolojik Test Sonuçları	37
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	48
EKLER.....	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Alüminyum 5XXX serisinin kullanıldığı bazı alanlar	12
Şekil 2.2.	Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi	13
Şekil 2.3.	Sürtünme karıştırma işleminin gösterimi	15
Şekil 2.4.	Üretim süreçlerinin DIN 8580' göre sınıflandırılması	16
Şekil 2.5.	TMAZ (solda) ve kaynak dikişi (sağda) sınırında karakteristik, ince taneli mikroyapı.	17
Şekil 2.6.	Aşınma mekanizmaları.....	20
Şekil 2.7.	Adhezif aşınmaya ait bir yüzey görüntüsü	21
Şekil 2.8.	Abrazif aşınma	22
Şekil 2.9.	Yorulma aşınması sonucunda yüzeyde çatlak oluşumu ve büyümesi	22
Şekil 3.1.	a) Freze tezgahı genel görünüm b) Kanal açma işlemi uygulama görüntüsü	24
Şekil 3.2.	Kanal açılmış taban malzeme	25
Şekil 3.3.	Sürtünme karıştırma proses düzeneği	26
Şekil 3.4.	Proses uygulama aşaması	26
Şekil 3.5.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDAX genel görünümü	27
Şekil 3.6.	X ışını difraksiyonu (XRD) cihazı genel görünümü	28
Şekil 3.7.	Mikro sertlik ölçüm cihazı	28
Şekil 3.8.	Aşınma deney düzeneği genel görünüm	29
Şekil 3.9.	“Ball-on Disk” deney düzeneği	29
Şekil 3.10.	3D Optik profilometre	30
Şekil 4.1.	Al5083 alaşımı üzerinde SKP ile üretilen bir Al ₂ O ₃ +h-BN yüzey kompozitinin karıştırma bölgesinin optik mikroskop görüntüsü	31
Şekil 4.2.	SKP uygulanmış Al5083 alaşımının karıştırma bölgesinden elde edilen optik mikroskop görüntüsü	32
Şekil 4.3.	SKP ile Al5083 alaşımı üzerinde üretilen Al ₂ O ₃ kompozit katmanın karıştırma bölgesinden elde edilen optik mikroskop görüntüsü	32
Şekil 4.4.	SKP ile Al5083 alaşımı üzerinde üretilen %92Al ₂ O ₃ +%8h-BN kompozit katmanın karıştırma bölgesinden elde edilen optik mikroskop görüntüsü ..	33
Şekil 4.5.	XRD grafiği.....	34
Şekil 4.6.	Al5083 taban malzeme ve kompozit yüzeylerin sürtünme katsayısı-zaman grafiği	38

Şekil 4.13. Al5083 alaşımının aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü	42
Şekil 4.14. Al5083/Al ₂ O ₃ kompozit tabakanın aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü	42
Şekil 4.15. Al5083/%99Al ₂ O ₃ +%1h-BN kompozit tabakanın aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü	43
Şekil 4.16. Al5083/%97Al ₂ O ₃ +%3h-BN kompozit tabakanın aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü	43
Şekil 4.17. Al5083/%95Al ₂ O ₃ +%5h-BN kompozit tabakanın aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü	44
Şekil 4.18. Al5083/%92Al ₂ O ₃ +%8h-BN kompozit tabakanın aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü	44



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Alüminyumun fiziksel özellikleri.....	5
Tablo 2.2. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	9
Tablo 2.3. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	11
Tablo 4.1. XRD analizleri sonucu elde edilen ortalama tane boyutları.....	34
Tablo 4.2. Sertlik değerleri	35
Tablo 4.3. SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile elde edilen kompozit katmanların ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma oranları.....	38

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

<i>Al</i>	Alüminyum
<i>Al₂O₃</i>	Alüminyum Oksit (Alümina)
<i>B₄C</i>	Bor Karbür
<i>Bi</i>	Bizmut
<i>cal</i>	Kalori
<i>cm</i>	Santimetre
<i>Cr</i>	Krom
<i>Cu</i>	Bakır
<i>dev/dak</i>	Devir/Dakika
<i>Fe</i>	Demir
<i>FeCr₂O₄</i>	Kromit
<i>h-BN</i>	Hegzagonal Bor Nitrür
<i>Li</i>	Lityum
<i>Mg</i>	Magnezyum
<i>mm/dak</i>	Milimetre/Dakika
<i>mm/sn</i>	Milimetre/Saniye
<i>Mn</i>	Manganez
<i>N</i>	Newton
<i>Ni</i>	Nikel
<i>nm</i>	Nanometre
<i>Pb</i>	Kurşun
<i>rpm</i>	Dakikadaki Devir Sayısı
<i>Si</i>	Silisyum
<i>SiC</i>	Silisyum Karbür
<i>SiO₂</i>	Silika
<i>TiO₂</i>	Titanyum Dioksit
<i>Zn</i>	Çinko
<i>Zr</i>	Zirkonyum
°	Derece
°C	Santigrat Derece
μ	Mikron
μm	Mikrometre
%	Yüzde

Kısaltmalar

CNT	Karbon Nanotüp
COF	Sürtünme Katsayısı
DXZ	Dinamik Olarak Yeniden Kristalize Bölge
HAZ	Isıdan Etkilenen Bölge
HV	Vickers Sertliği
MMK	Metal Matrisli Kompozit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SKP	Sürtünme Karıştırma Prosesi
TMAZ	Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge
XRD	X-Işını Difraksiyonu

1. GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları başta otomotiv, havacılık ve uzay, denizcilik olmak üzere sanayinin birçok alanında kullanılmakta ve kritik bir rol oynamaktadır. Alüminyum, oldukça yüksek mukavemet seviyelerine kadar ısıtılabilir ve nispeten düşük maliyetli, hafif bir metaldir. Üretiminin kolay olması maliyetinin düşük olmasına sebep olmuştur. Yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahiptir ve kriyojenik sıcaklıklardan orta sıcaklıklara kadar iyi performans gösterir. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının dezavantajları, düşük elastisite modülü, oldukça düşük yüksek sıcaklık kapasitesi ve korozyona yatkınlığı içerir (Campbell, 2006; Kaufman, 2000).

Alüminyum ve alaşımlarının pozitif özelliklerinin yanında aşınma direnci genellikle düşüktür. Al matrisinin sert seramik parçacıklarla takviye edildiği metal matrisli kompozit (MMK) teknolojisi, Al alaşımlarının sertliğini ve aşınma direncini geliştirmek için yaygın olarak kabul edilen bir yöntemdir (Shyam Kumar vd., 2016).

Bununla birlikte, metalik parçacıkların elementel formda takviye elemanı olarak tutulması zorlu bir durum olduğundan bu tür kompozitleri bilinen işleme yöntemleri ile işlemek zordur. Metalik parçacıklar ya metal matris ile reaksiyona girecek ve kırılgan intermetalikler oluşturacak ya da matris içerisinde çözünürlüğe sahiplerse çözüneceklerdir (Morsi, 2001; Marcelo vd., 2002).

Bir katı hal birleştirme tekniği olan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK), 1991 yılında Cambridge Kaynak Enstitüsü (The Welding Institute) tarafından icat edilmiştir. Bu yöntemde bir pin ile özel olarak tasarlanmış bir alet kullanılarak, taban malzeme eritilmeden yan yana olan iki plaka birleştirilir. Takımın yapmış olduğu enine hareket ve dönüş hareketi, takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeden dolayı ciddi plastik deformasyona ve bölgesel ısınmaya neden olur. Oluşan bu bölgesel ısınma ayrıca malzemeyi yumuşatır ve bu nedenle malzemenin pinin önünden arkaya doğru hareket etmesine izin verir. Böylece, katı halde birleştirilir (Mishra ve Ma, 2005).

Ayrıca kaynak sonrası mikroyapıda farklı alanlar oluşmaktadır. Threadgill (1997), mikroyapıda oluşan alanları ilk zamandan beri yaygın olarak kullandıkları sınıflandırmalardan biri olarak tanımlamıştır. Mikroyapıda oluşan bu alanlar,

etkilenmemiş malzeme, ısıdan etkilenen bölge, termomekanik olarak etkilenen bölge (TMAZ) ve kaynak dikişi olarak ifade edilmiştir (Mishra vd., 2011).

Geleneksel takımlar kullanıldığında asimetrik bir kaynak dikişi üretilir. Bunun nedeni, takımın kaynak yönü boyunca dönme ve ileri hareketinin üst üste binmesinden kaynaklanır. Kaynağın bir tarafında takım dönüş yönü (kaynağın dış kenarında) takım hareket yönüne paraleldir ve bu taraf “ilerleyen taraf” olarak adlandırılır. Kaynağın diğer tarafında ise bu yönler birbirine zıttır ve “geri çekilme tarafı” olarak adlandırılır.

Yüksek sıcaklıktaki plastik deformasyon, gelişmiş bir mikroyapı ile sonuçlanır. Böylece kaynak sonucunda iyi mekanik özellikler elde edilir. SKK prensiplerine göre, Mishra ve Mahoney (2001) yekpare iş parçaları konseptini uygulamak için Sürtünme Karıştırma Prosesini (SKP) geliştirmiştir.

SKP, SKK’nın çalışma prensibine dayanır ve malzemeyi yumuşatmak ve deforme etmek için dönen bir aletten gelen sürtünme ısını kullanır (Mishra ve Ma, 2005). Bu teknik, ince tane yapısı ile sonuçlanan çok yönlü bir işleme aracı olarak ortaya çıkmıştır. Demir ve demir dışı malzemelerin aşınma özelliklerini iyileştirmek için de kullanılmıştır (Thapliyal ve Dwivedi, 2016; Yasavol ve Ramalho, 2015). İşlem sırasındaki malzeme akışı ve karıştırma hareketi, yüzey kompozitlerini imal etmek için ikinci faz parçacıklarının eklenmesini de sağlar (Mishra vd., 2003). Yapılan çalışmalar, SKP’nin geliştirilmiş mukavemet ve iyi süneklik ile metal parçacık takviyeli kompozitleri imal etmek için etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir (Yadav ve Bauri, 2010, 2011).

Alüminyum alaşımları arasında Al5083, denizcilik ve diğer yapısal uygulamalarda kullanım alanı bulunan önemli bir alaşımdır. Al5083, iyi mukavemet, kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci sergiler. Al5083 ısıtılma işlem görmediğinden, alaşımın mukavemetini ve sertliğini iyileştirmenin yalnızca sınırlı yolları vardır (Evirgen ve Öveçoğlu, 2010; Shyam Kumar vd., 2016).

Al5083 (Al-Mg Alaşımı), düşük yoğunluğu, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, mükemmel korozyon direnci ve iyi şekillendirilebilirliği nedeniyle havacılık ve ulaşım endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çözelti ile güçlendirilmiş alaşımlardan biri olan Al5083, yalnızca işlem sertleştirme ve mikro alaşımlama ile güçlendirilebilir

(Chen vd., 2016). Alüminyum ve alaşımlarının genel problemi olan düşük aşınma direnci, Al5083 alaşımının da bir problemidir (Venkataraman ve Sundararajan, 2000). Prasada Rao vd. (2004), alüminyum ve alaşımlarının aşınma direncinin ve yük taşıma kapasitesinin iyileştirilmesinin tane yapılarının inceltilmesi ile olacağını belirtmiştir.

Dobatkin vd. (2005), Al5083'e aşırı plastik deformasyon uygulayarak iş parçasının tamamında ince taneli mikroyapılar elde etmiştir. Bu çalışmanın sonucunda elde edilen ultra ince taneli mikroyapı Al alaşımlarının sertliğini ve mukavemetini artırıcı özellik göstermiştir.

SKP'nin, alüminyum alaşımlarındaki tane boyutunu inceltmek mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli bir işlem yöntemi olduğunu kanıtlanmıştır (Mishra ve Ma, 2005; Santella vd., 2005). Behnagh vd. (2016), yapmış oldukları çalışmada Al5083'ün mukavemetini artırmaya yönelik SKP uygulamaları ve mekanik bileşen yüzeyinin lokal olarak değiştirmeye uygun olduğunu göstermişlerdir.

Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan SKP sonucu malzemelerde sertlik, mukavemet, aşınma ve yorulma dirençlerinin arttığı birçok çalışma ile ispat edilmiştir (Mishra vd., 2003). Ayrıca çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan birçok araştırma SKP'nin malzemelerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerinde iyileştirici etkileri olduğunu kanıtlamıştır (Mishra vd., 1999; Johannes vd., 2007; Cui vd., 2009).

Sürtünme karıştırma prosesi (SKP), kompozit bir tabaka üretmek için kullanılan bir modifikasyon tekniğidir. Katı hal prosesi olan bu teknik ile mikrometreden milimetreye kadar olan tabaka kalınları elde edilebilmektedir (Yuvaraj vd., 2015). SKP ile alüminyum esaslı metal matris alaşımları elde etmek için SiC, B₄C, Al₂O₃, SiO₂, TiO₂ gibi birçok takviye edici partikül kullanılmıştır (Azizieh vd., 2011; Dolatkhan vd., 2012; Khodabakhshi vd., 2014; Yuvaraj vd., 2015).

Du vd. (2016) ile Parumandla ve Adepu (2018) tarafından yapılan çalışmalarda farklı alüminyum alaşımlarının yüzeylerinde oluşturulan Al₂O₃ kompozitlerinin bu alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirildiği bildirilmiştir. Bor bileşikler, kuru ve yağlanmış kayma koşullarında düşük sürtünme ve aşınma sergiler. Bunlardan hegzagonal bor nitrür (h-BN), düşük sıcaklıkta karıştırıldığında sürtünmeyi ve aşınmayı önemli ölçüde azaltma kapasitesine sahiptir (Chkhartishvili vd., 2016).

Yukarıda açıklanan koşullar ve yapılan çalışmalar neticesinde, bu çalışma Al5083 alaşımında takviye elemanı olarak farklı oranlarda Al₂O₃ ve h-BN'nin kullanımını ve bu kullanılan partiküllerin Al5083'ün mekanik ve tribolojik özelliklerine katkılarını araştırmak amacıyla yapılmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Alüminyum, yeryüzünde en yaygın olarak bulunan üçüncü elementtir. Dünyada %47 oksijen, %28 silikondan sonra yaklaşık %8 ile en çok bulunan elementtir. Alüminyum silikatlar, kilin önemli bir bileşenidir ve en önemli alüminyum cevheri boksittir. Boksit, sıcak ve çok nemli ortamlarda granitlerin hızlı bozunmasıyla oluşur ve ana boksit kaynakları Jamaika, Gine ve Avustralya gibi tropikal iklime sahip ülkelerdir. Orijinal boksit %52 Al_2O_3 (alümina), %27.5 Fe_2O_3 ve su içerir.

Alüminyum üretmek için, boksit ilk olarak 240 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda kostik soda içerisinde çözülür. Bu işlem, alüminanın çoğunu çözer ve büyük ölçüde demir oksit ve silikadan oluşan çözünmez bir tortu bırakır. Birincil alüminyum daha sonra erimiş tuz içerisinde bir elektrolitik işlem kullanılarak üretilir. Alümina, bir kriyolit banyosunda (Na_3AlF_6) erime noktasının önemli ölçüde altındaki bir sıcaklıkta çözündürülür ve karbon anotlar oksitlenirken indirgenir.

Alüminyumdaki tipik safsızlıklar silikon, demir, bakır, çinko ve magnezyumdur. Alüminyumun özellikleri saflığına bağlıdır. Alüminyum, düşük yoğunluğu, yüksek elektriksel ve termal iletkenliği, kolay şekillendirilebilirliği ve yüksek korozyon direnci ile bilinir. Tablo 2.1'de alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve diğer metaller ile karşılaştırılması verilmiştir. Alüminyum, $a = 0,40496$ nm kafes parametresi ile yüzey merkezli kübik (YMK) kafes yapısına sahiptir (Davis, 1993).

Bakır, silikon, manganez, magnezyum, lityum ve çinko, mekanik özelliklerini, korozyon davranışını, şekillendirilebilirliğini ve kaynaklanabilirliğini iyileştirmek için alüminyuma kontrollü şekilde eklenir. Öte yandan, belirli özelliklere ulaşmak için nikel, krom, titanyum, zirkonyum ve skandiyum da eklenir. Genel olarak, eklenen alaşım elementleri iki tipte sınıflandırılabilir:

- Katı çözelti güçlendirme ve ince çökelti sertleştirme fazları oluşturarak mekanik ve fiziksel özellikleri geliştirenler. Bunlara bakır, manganez, çinko, magnezyum silikon ve zirkonyum dâhildir.

- Başlangıçta alüminyumda demir (Fe) ve silikon (Si) gibi safsızlıklar bulunanlar. Bunlar, sınırlı katı çözünürlükleri nedeniyle nispeten kaba bir katodik bileşen ikinci fazlar oluşturma eğilimindedir (Ambat vd., 2006).

Tablo 2.1. Alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve diğer metaller ile karşılaştırılması (Taban, 2004)

Özellik	Al	Fe	Ni	Cu	Ti
Kristal Kafes Yapısı	YMK	HMK	YMK	YMK	SPH
Yoğunluğu (g/cm³)	2.7	7.85	8.9	8.93	4.5
Ergime Sıcaklığı °C	660	1536	1455	1083	1670
Özgül Isısı (J/kgK)	930	448	440	385	470
Isıl İletkenliği (W/mK)	235	79.6	92.1	389.4	15.5
Isıl Genleşme Katsayısı (Δl/°C)	33.9x10 ⁻⁶	12 x10 ⁻⁶	1 x10 ⁻⁶	16.5 x10 ⁻⁶	8.2 x10 ⁻⁶
Elektrik Direnci (μΩcm)	2.65	9.7	6.8	1.67	55
Elastisite Modülü E (N/mm²)	6.7x10 ⁴	21 x10 ⁴	21 x10 ⁴	12.4 x10 ⁴	10.8 x10 ⁴
Maksimum Çekme Mukavemeti (N/mm²)	65	235	300	210	245

Alaşım elementlerinin alüminyum özelliklerine etkisi şu şekilde özetlenebilir:

- Bakır (Cu), katı çözelti sertleştirme yoluyla iyi bir güç seviyesi sağlar. Öte yandan alüminyumun korozyon direncini, sünekliğini ve kaynaklanabilirliğini azaltır (Al-Rawajfeh ve Qawabah, 2009).
- Manganez (Mn) alüminyuma eklendiği zaman tane inceltici görevi görür ve alüminyumun mukavemetini artırırken, sünekliğini ise azaltır (Court vd., 2001).
- Silikon (Si) alüminyumun akışkanlığını, dökülebilirliğini, mukavemetini ve sünekliğini iyileştirir. Magnezyum ile ilave edildiğinde çökelti sertleşmesi oluşturur (Davis, 1999).
- Magnezyum (Mg), alüminyumun kaynaklanabilirliğini, korozyon direncini, mukavemetini ve pekleşme kabiliyetini geliştirir (Davis, 1999).
- Magnezyum ve bakır içeren çinko (Zn), çökeltme sertleşmesine izin vererek alüminyumun mukavemetini artırır (Carroll vd., 2000).

- Alüminyuma demir (Fe) eklenmesi, korozyon direncini azaltırken, mukavemeti ve elektrik iletkenliğini artırır (Vargel, 2004).
- Nikel (Ni), döküm kabiliyetini iyileştirir ve alüminyumun yüksek sıcaklık performansını artırır.
- Krom (Cr), alüminyum alaşımlarının gerilme korozyon direncini artırır.
- Zirkonyum (Zr), tane inceltici görevi görür (Ocenasek ve Slamova, 2001; Kang vd., 2006).
- Lityum (Li), mukavemeti artırır. Young modülü çökelme sertleşmesini sağlar ve yoğunluğu azaltır (Davis, 1999).
- Skandiyum (Sc), yaşlandırma sertleştirme etkisi ile alüminyum mukavemetini artırır, kaynaklanabilirliği iyileştirir ve tane inceltici görevi görür (Ocenasek ve Slamova, 2001).
- Kurşun (Pb) ve bizmut (Bi), kolay işleme alaşımlarında talaş oluşumuna yardımcı olur (Davis, 1999).

Alüminyum ve alaşımları, bazı avantajlarından ötürü endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır.

- Alüminyum ve alaşımları yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, iyi korozyon direnci ve kolay şekillendirilebilme gibi özelliklerinden dolayı otomotiv ve havacılık endüstrisinde sıkça kullanılır.
- Yüzeylerinde yalıtkan, ince, yapışkan ve kendi kendini iyileştiren oksit film oluşumu sayesinde atmosfere, nötr çözeltilere ve bazı asidik çözeltilere karşı iyi korozyon direnci gösterir. Korozyon direnci, anotlama ve lazer yüzey eritme ile artırılabilir.
- Yüksek elektriksel iletkenliği, elektrik gücünün kullanıldığı uygulamalarda kullanılmasına olanak sağlar.
- Manyetik olmama özelliği, ark kaynağı sırasında oluşan ark üfleme sorununu ortadan kaldırır.
- Yüksek elastisite modülü, darbe yüklemesine (impact loading) karşı direnci artırır ve yükleme enerjisinin absorbe edilmesini sağlar.
- Düşük sıcaklıklarda, iyi tokluk direnci göstermesi kriyojenik uygulamalarda kullanım için avantaj sağlar.

- Derin çekme, ekstrüzyon ve soğuk iş şekillendirme gibi çeşitli şekil verme yöntemleri alüminyuma kolay şekillendirebilme olanağı sağlar.
- Zehirsiz ve renksiz korozyon ürünleri, kimyasal ve gıda işleme endüstrisinde kullanımlarını kolaylaştırır.
- Erime noktasının düşük olması, geri dönüşüm ve yeniden işleme maliyetinin düşük olmasına olanak sağlar.

Bu avantajlarının yanında alüminyum ve alaşımları düşük yorulma ve aşınma direncine sahiptir. Yüksek veya orta akış türbülanslarında ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılması uygun değildir (Mathers, 2002).

2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarında kullanılan alaşım elementleri genel olarak bakır, silisyum, magnezyum, çinko, mangan, kurşun ve lityumdur. Alüminyum alaşımları, genel olarak iki grupta sınıflandırılır. Bunlar, dövme ve döküm alüminyum alaşımlarıdır.

Dövme alüminyum alaşımları kendi içerisinde ısıtılma işlemi görmeyen dövme alüminyum alaşımları ve ısıtılma işlemi görmüş dövme alüminyum alaşımları olarak ikiye ayrılmaktadır. Dövme alüminyum alaşımları arasında en çok kullanılanlar, 2XXX, 5XXX, 6XXX ve 7XXX alüminyum alaşımlarıdır. 5XXX serisi ve 6XXX serisi yüksek korozyon direncine sahiptir. Bu iki alaşım serisi arasında 5XXX yüksek mukavemete sahipken 6XXX serisi ise diğerine göre daha orta seviyede mukavemete sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı Al5083 ve Al6082 alaşımları genel olarak gemilerde yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Campbell, 2006).

2.2.1. Dövme Al alaşımları

Isıl işlem görmeyen dövme alaşımlar çökelme sertleştirme işlemi ile güçlendirilemezler. Bu alaşımlar soğuk işleme ile sertleştirilirler. Isıl işlem görmeyen dövme alaşımlar arasında ticari olarak saf alüminyum serisi (1xxx), alüminyum-mangan serisi (3xxx), alüminyum-silikon serisi (4xxx), ve alüminyum-magnezyum serisi (5xxx) bulunur. 4xxx serisi alüminyum alaşımlarından bazıları ısıtılma işlemi ile sertleştirilebilirken, diğerleri yalnızca soğuk işlemeyle sertleştirilebilir. Isıl işlem görmeyen dövme alaşımlar

endüstri içerisinde büyük ticari öneme sahip olsalar da, genellikle yapısal uçak gövdesi uygulamaları için aday değildirler (Campbell, 2006).

Isıl işlem görmüş dövme alaşımlar, oldukça yüksek mukavemet seviyelerine çıkartılabilmek için çöktürülerek sertleştirilebilir. Bu alaşımlar arasında 2xxx serisi (Al-Cu ve Al-Cu-Mg), 6xxx serisi (Al-Mg-Si), 7xxx serisi (Al-Zn-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu) ve 8xxx alaşım serisinin alüminyum-lityum alaşımları bulunur. En yüksek mukavemet seviyelerine sahip 2xxx ve 7xxx alaşımları, havacılık sanayiinde metalik gövde bileşenleri için kullanılan ana alaşımlardır. Ancak, 6xxx ve 8xxx alaşımları da havacılık ve uzay sanayisinde bazı küçük uygulamalarda kullanılmaktadır. 2xxx serisinin Al-Cu alaşımları, Al-Mg-Si (6xxx) ve 7xxx serisinin Al-Zn-Mg alaşımları orta mukavemetli alaşımlardır ve bazıları ergitme kaynağı ile kaynaklanabilirken, 2xxx serisinin Al-Cu-Mg alaşımları ve 7xxx serisinin Al-Zn-Mg-Cu alaşımları genellikle daha yüksek mukavemete sahipken bunlara ergitme kaynağı yapılamaz (Campbell, 2006).

Dövme alüminyum alaşımları, Alüminyum Derneği (Aluminum Association) tarafından geliştirilen dört basamaklı bir sayısal sistemle adlandırılır. İlk rakam, alüminyum serisinin ana alaşım malzemesini gösterir. İkinci rakam ise orijinal temel alaşımdaki varyasyonları gösterir; bu rakam her zaman orijinal kompozisyon için sıfır (0), ilk varyasyon için bir (1), ikinci varyasyon için iki (2) vb. şeklinde gösterilir. Varyasyonlar tipik olarak eklenen elementin seviyesine bağlı olarak %0.15-0.50 veya daha fazla alaşım elementindeki farklılıklar ile tanımlanır. Üçüncü ve dördüncü rakamlar ise serideki özel alaşımı belirtir (Kaufman, 2000; Campbell, 2006). Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Campbell, 2006)

Seriler	Al İçeriği veya Ana Alaşım Elementi
1xxx	En az %99.00
2xxx	Bakır
3xxx	Mangan
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Magnezyum ve Silisyum
7xxx	Çinko
8xxx	Lityum
9xxx	Diğer elementler

2.2.2. Döküm Al alaşımları

Döküm alüminyum alaşımları da kendi içerisinde ısıtıl işlem uygulanabilen ve ısıtıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları olmak üzere ikiye ayrılır. Bunun haricinde üretim yöntemine yani yapılan döküm yöntemine göre de sınıflandırılabilirler. Bu yöntemler, tek kullanımlık kum kalıp yöntemi (sand casting), basınçsız tek kullanımlık kalıplama ve basınçlı dökümdür. Bu yöntemler içerisinde kum kalıplama yönteminde tasarımda ve ölçü şekillerinde bir sınırlama olmadığından çok kaliteli ürünler elde edilebilmektedir. Kalıp malzemesi olarak Silika (SiO_2), Zirkonya (ZrO_2), Olivin ($(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$), Kromit (FeCr_2O_4) gibi kumlar kullanılmaktadır. Bu kumlardan en fazla tercih edileni ise Silika ile Zirkonyadır. Daha büyük hacimli parçalar üretmek için basınçsız kalıplama yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemde iki veya daha çok parça kullanılır ve bu parçalar döküm işlemi yapılırken açılıp kapanır.

Basınçsız kalıplama yönteminde, diğer yöntem olan kum kalıplamaya göre daha hassas ölçüm yapılabilir, elde edilen parçalar daha ünitordur ve daha iyi mekanik ve yüzey özellikleri elde edilir. Ayrıca bu yöntem, kum kalıplamada olduğu gibi sürekli yeni bir kalıba ihtiyaç duyulmadığından seri üretim için daha uygundur. Bahsedilen iki yöntemde ergimiş metal yerçekimine bağlı olarak hareket edip kalıbı doldururken, basınçlı döküm yönteminde bu ergimiş metal, kalıp içersine bir pompa veya benzeri bir alet ile hareket ettirilir. Düşük basınç uygulanan kalıp yöntemi ile basınçsız kalıplama yönteminde uygulanan yöntemler birbirine benzer yöntemlerken yüksek basınçlı kalıplama uygulamasında kalıp malzemesi basınca dayanıklı olmak zorundadır. Bu basınca dayanıklı metal kalıplar pahalı olduğundan bu yöntem ekonomik açıdan diğer yöntemlere göre daha pahalıdır (Totten ve McKenzie, 2003).

Döküm alüminyum alaşımlarında ilk rakam dövme alüminyum alaşımlarında olduğu gibi alaşım elementini ifade ederken, ikinci ve üçüncü rakam ise özel alaşımı ifade eder. Bir noktadan sonra alaşımda gösterilen sıfır, alaşımın döküm ürünü olduğunu gösterir. Eğer alaşımın gösteriminde noktadan sonra sıfır rakamı yerine bir rakamı gelirse, ürünün dökümhaneye gönderileceği anlamını taşımaktadır (Kaufman, 2000; Campbell, 2006).

Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Campbell, 2006)

Seriler	Al İçeriği veya Ana Alaşım Elementi
1XX.0	En Az %99
2XX.0	Bakır
3XX.0	Silisyum ile Bakır ve/veya Magnezyum
4XX.0	Silisyum
5XX.0	Magnezyum
6XX.0	Kullanılmayan
7XX.0	Çinko
8XX.0	Kalay
9XX.0	Diğer Elementler

2.2.3. Alüminyum – magnezyum alaşımları (Al-Mg, 5xxx)

5xxx serisi alaşımlar alüminyum-magnezyum alaşımlarıdır ve % 0.5-13 arasında değişiklik gösteren oranlarda magnezyum içeriğine sahiptirler. Oran olarak düşük magnezyum içeren alüminyum-magnezyum alaşımları plastik şekil vermeye elverişli iken yüksek oranda magnezyum içeriği olan alaşımlar ise döküm için elverişlidir. Alaşımın sertlik ve mukavemet değeri artan magnezyum oranıyla doğru orantılı olarak artar. Alüminyum-Magnezyum alaşımlarına yapılan mangan ve krom katkısı bu alaşımların mukavemet değerini ciddi oranda artırmaktadır. 5xxx serisi alüminyum-magnezyum alaşımları oldukça sünek yapıdadır ve talaşlı imalat için çok uygundur. Ayrıca bu alaşımlar deniz suyunun neden olduğu korozyon aşınmasına karşı yüksek direnç gösterirler (Savaşkan, 2018).

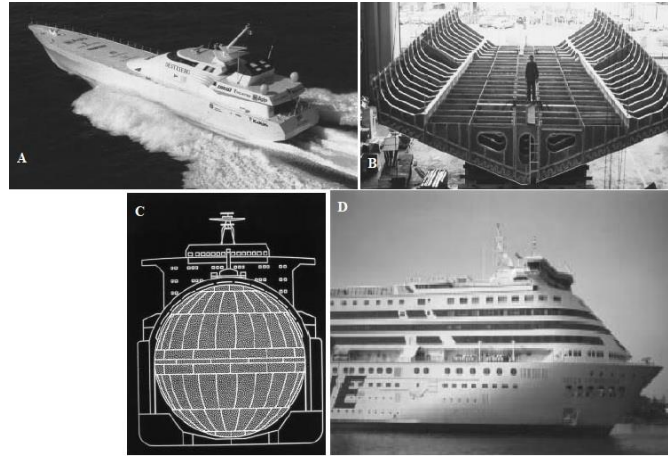
5XXX serisinin alüminyum-magnezyum alaşımları gerinimle sertleştirilebilir ve orta derecede yüksek mukavemete, tuzlu suda bile mükemmel korozyon direncine ve mutlak sifıra yakın kriyojenik sıcaklıklarda bile çok yüksek tokluğa sahiptir. 20 cm'ye kadar kalınlıklarda bile çeşitli tekniklerle kolayca kaynaklanabilirler (Kaufman, 2000).

Alüminyum-Magnezyum alaşımları iki grupta incelenmektedir. Bunlar; döküm alüminyum alaşımları ve dövme alüminyum alaşımlarıdır. Ticari olarak kullanılan dövme alaşımlarının çoğu %5'den daha düşük oranlarda magnezyum içerirken, döküm alaşımlarının çoğu ise %5 oranından daha yüksek oranlarda magnezyum içerirler. Bu alaşımlar içerisinde bulunan magnezyum oranına göre numaralandırılırlar. Dövme alaşımlarının mukavemet değeri orta düzeyde olup üstün korozyon direncine ve çok iyi kaynak kabiliyetine sahiptirler. Ancak bu alaşımların çoğu ısıtılma işlemi için uygun

değildirler. Bu gruba dâhil olan alaşımlar sanayinin çeşitli yerlerinde kullanılmaktadır. (Savaşkan, 2018).

2.2.3.1. Alüminyum – magnezyum alaşımları kullanım alanları

Alüminyum-Magnezyum alaşımları endüstride çok çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. İnşaat sektöründe geniş bir uygulama alanı mevcuttur; köprüler ve otoyol yapıları gibi. Bunun dışında depolama tankları, basınçlı kaplar, -270 °C'ye kadar düşük veya mutlak sifıra yakın sıcaklıklardaki kriyojenik tankaj ve sistemleri ile özellikle yüksek korozyon direncine sahip olmasından dolayı denizcilik uygulamalarında tercih edilmektedir. 5052, 5086 ve 5083 alaşımları, daha yüksek magnezyum içeriğine sahip olduklarından bununla bağlantılı olarak daha yüksek mukavemete sahiptirler ve bu durum da bahsedilen alaşımların yapısal açıdan kullanım alanlarının daha fazla olmasına neden olmaktadır. Al5083 alaşımı yüksek korozyon direncine sahip olmasından dolayı denizcilik uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir. Yüksek hızlı, tek gövdeli gemiler, gövde takviyeleri, güverte ve üst yapı için sıkça kullanılmaktadır (Kaufman, 2000). Alüminyum 5XXX serisinin bazı kullanım alanlarına ait görseller Şekil 2.1'de verilmiştir.



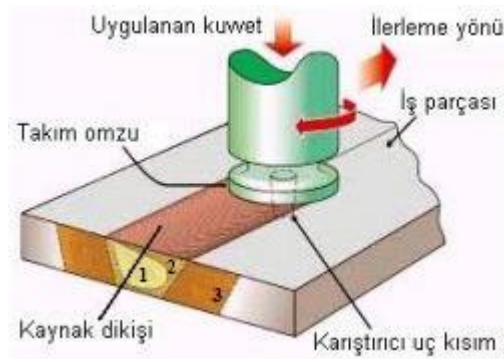
Şekil 2.1. Alüminyum 5XXX serisinin kullanıldığı bazı alanlar: **(a)** güverte ve gövde yapısı olarak kullanılan 5083 alaşımı, **(b)** yüksek hızlı yatlarda iç gövde yapısı sertleştiricisi, **(c)** sıvılaştırılmış doğalgazın gemide taşınabilmesi için oluşturulan kaynaklı yapıda kullanılan 5083 alaşımı, **(d)** hafif ve mükemmel korozyon direncinden dolayı gemilerde üst yapı malzemesi olarak kullanılan 5XXX serisi (Kaufman, 2000).

2.2.3.2. Al5083 alaşımı

Al5083 alaşımı ağırlıkça %44.9 Mg ve ağırlıkça %0.4-1 Mn içeren ısıl işlem görmeyen bir alüminyum alaşımıdır. Bu alaşım yüksek korozyon direnci, süper plastisite özelliği, iyi kaynak kabiliyeti ve yüksek mukavemet gibi özelliklere sahip nispeten ucuz bir alaşımdır. Bu özelliklerinden dolayı endüstrinin birçok alanında kullanılırken en fazla tercih edildikleri alan ise denizcilikte gemi yapı malzemesidir (Totten ve McKenzie, 2003).

2.3. Sürtünme Karıştırma Teknolojisi

Bir katı hal birleştirme tekniği olan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK), 1991 yılında Cambridge Kaynak Enstitüsü (The Welding Institute - TWI) tarafından icat edilmiştir. Bu yöntemde bir pin ile özel olarak tasarlanmış bir alet kullanılarak, taban malzeme eritilmeden yan yana olan iki plaka birleştirilir. Takımın yapmış olduğu enine hareket ve dönüş hareketi, takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeden dolayı ciddi plastik deformasyona ve bölgesel ısınmaya neden olur. Oluşan bu bölgesel ısınma ayrıca malzemeyi yumuşatır ve bu nedenle malzemenin pinin önünden arkaya doğru hareket etmesine izin verir. Böylece, plakalar şekil 2.2’de gösterildiği gibi katı halde birleştirilir (Mishra ve Ma, 2005).



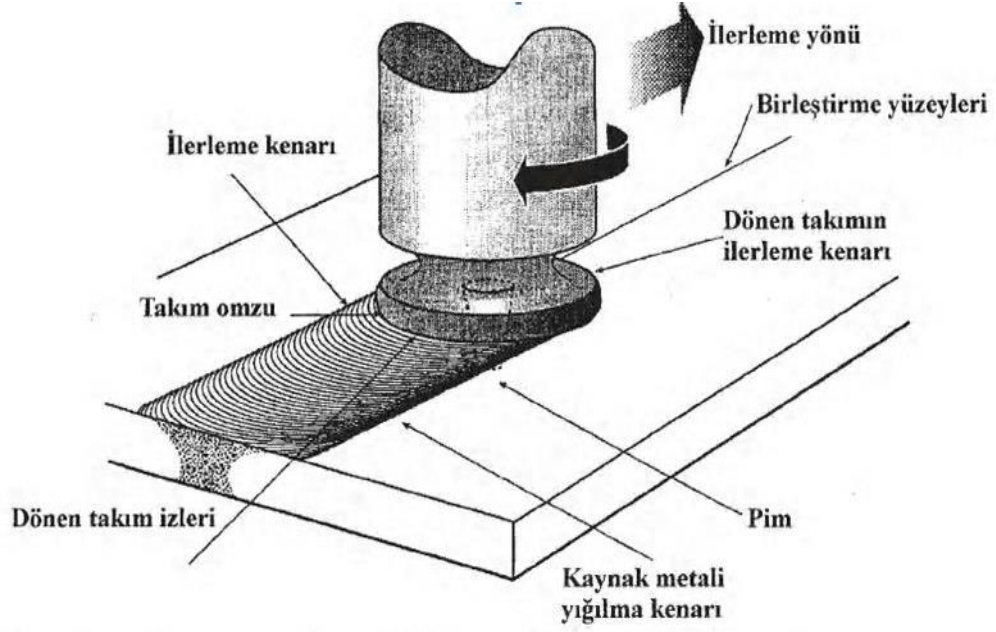
Şekil 2.2. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi (Mert ve Mert, 2013).

Şekil 2.2 ayrıca kaynak sonrası mikroyapıda oluşan farklı alanları göstermektedir. Threadgill (1997), mikroyapıda oluşan alanları ilk zamandan beri yaygın olarak kullandıkları sınıflandırmalardan biri olarak tanımlamıştır (Mishra vd., 2011).

- *Etkilenmemiş malzeme (Şekil 2.2. Bölge 3):* Bu bölgede malzemede herhangi bir deformasyon olmaz ve malzeme ısıdan etkilenmez. Bu nedenle mikroyapı ve mekanik özelliklerde herhangi bir değişiklik meydana gelmez. Ancak kaynaktan dolayı bir termal döngü yaşanabilir.
- *Isıdan etkilenen bölge (Şekil 2.2. Bölge 2):* Malzeme bu bölgede de deformasyona uğramaz. Ancak kaynak merkezine daha yakın mesafe ve ısıya maruz kalma nedeniyle mikroyapıda ve mekanik özelliklerde değişimler olur.
- *Termomekanik olarak etkilenen bölge (TMAZ) (Şekil 2.2. Bölge 1):* Bu bölgede malzeme, SKK / SKP takımı tarafından plastik deformasyona uğratılır ve sürtünme sonucu oluşan ısıdan etkilenir. Bunun sonucu olarak mikroyapı ve mekanik özelliklerde değişiklikler meydana gelir. Genel olarak bu bölge kaynak dolgusu için ayrı bir sınır gösterir.
- *Kaynak dikişi:* Bu bölge, takım pini tarafından işgal edildiği için yeniden kristalize edilmiştir. Sürtünme karıştırma prosesi için karıştırma bölgesi terimi bu alanı ifade eder. Karmaşık malzeme akışı nedeniyle, kaynak dikişi bölgesinin mikroyapısı genellikle homojen değildir.

Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, geleneksel takımlar kullanıldığında asimetrik bir kaynak dikişi üretilir. Bunun nedeni, takımın kaynak yönü boyunca dönme ve ileri hareketinin üst üste binmesinden kaynaklanır. Kaynağın bir tarafında takım dönüş yönü (kaynağın dış kenarında) takım hareket yönüne paraleldir ve bu taraf “ilerleyen taraf” olarak adlandırılır. Kaynağın diğer tarafında ise bu yönler birbirine zıttır ve “geri çekilme tarafı” olarak adlandırılır.

Yüksek sıcaklıktaki plastik deformasyon, gelişmiş bir mikroyapı ile sonuçlanır. Böylece kaynak sonucunda iyi mekanik özellikler elde edilir. SKK prensiplerine göre, Mishra ve Mahoney (2001) Şekil 2.3’de gösterildiği gibi yekpare iş parçaları konseptini uygulamak için Sürtünme Karıştırma Prosesini (SKP) geliştirmiştir.



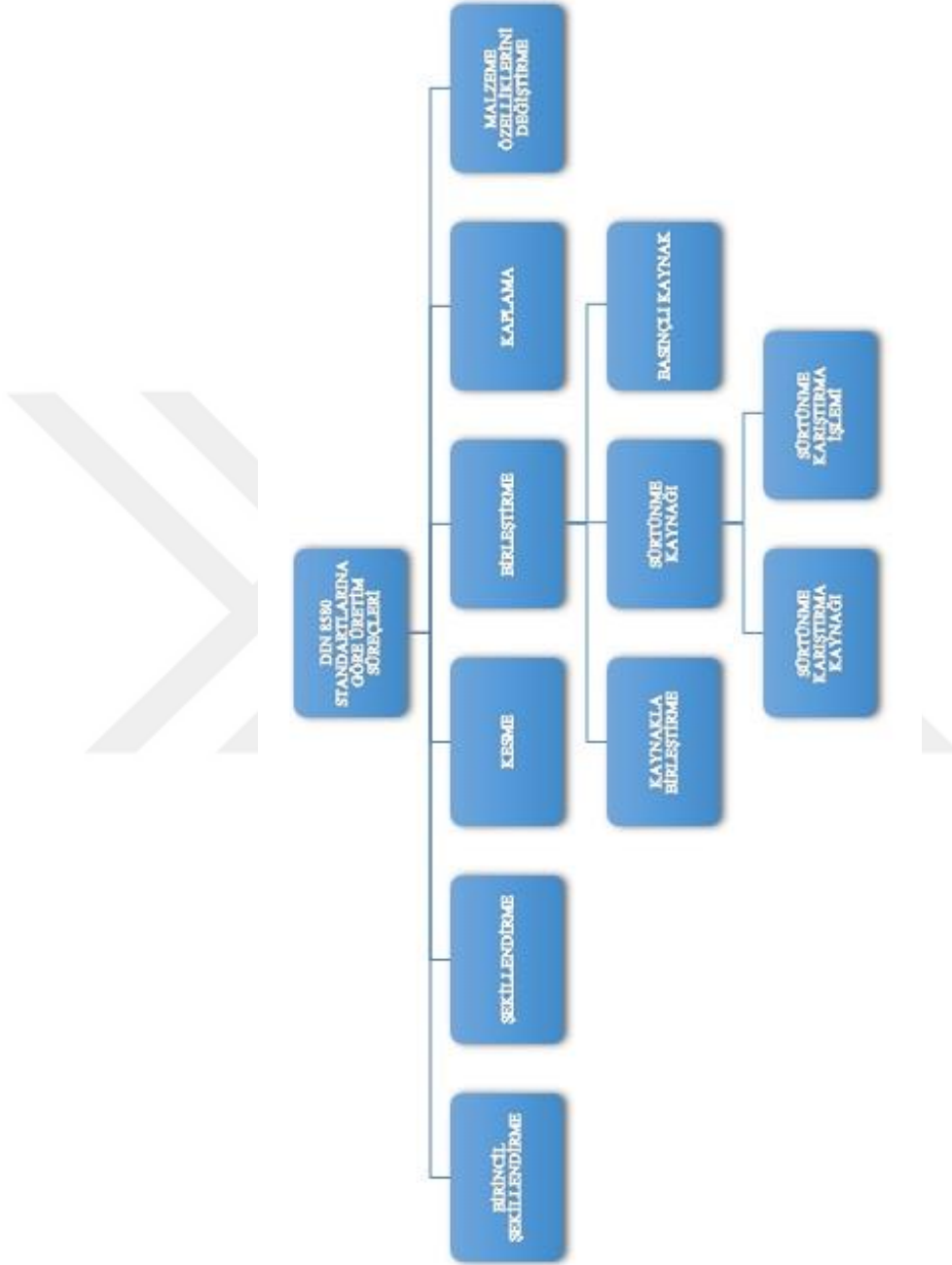
Şekil 2.3. Sürtünme karıştırma işleminin gösterimi (Taban, 2004).

DIN 8580'e göre üretim süreçlerinin ana sınıflandırmasıyla ilgili olarak SKK, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi basınçlı kaynak alt grubu olan sürtünme kaynağına atanabilir. Bu durumda, toplu metal ve amorf tozdan bir kompozit üretildiği için SKP'de bu gruba atanmıştır.

Yapılan bir araştırma, “SKP parametreleri, takım geometrisi, malzeme kimyası, iş parçası sıcaklığı, dikey basınç ve aktif soğutmanın” tane boyutunu önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir (Ma, 2008).

Bu nedenle, mekanik özellikler belirli parametreleri değiştirerek istenilen hale getirilebilir. Örneğin bir malzemenin mikrosertliği, tane boyutunun azalmasıyla birlikte artış gösterir. Ayrıca, süperplastisitenin oluşması, daha yüksek deformasyon hızlarında veya daha düşük sıcaklıklarda elde edilebilir.

Ayrıca takımın karıştırma etkisini kullanarak yüzeye toz parçacıkları ilave edilmesiyle metal matrisli kompozitler (MMK) üretme imkânı da vardır. Bu nedenle, gelişmiş mekanik özelliklere ve homojen parçacık dağılımına sahip yüzey kompozitleri, bileşenleri güçlendirmek için üretilebilir.



Şekil 2.4. Üretim süreçlerinin DIN 8580' göre sınıflandırılması.

SKP'de sürtünme kaynaklı ısıtma ve yoğun deformasyonun kombinasyonu, karıştırılan bölgede yeniden kristalleşmeye neden olur. İlk olarak, tane sınırları dislokasyonların hareketini engellediği için gerinim sertleşmesi meydana gelir. Kritik deformasyon sınırını ve erime sıcaklığının yaklaşık %50'sini aşan kristalleşme meydana gelir ve yeni

taneler oluşur. Alaşımlı metallerde, çözünmüş alaşım atomları iki etki yaratır. Birincisi, dislokasyon hareketini engelleyerek yumuşamayı önlerler, ikinci olarak da normalde tane oluşumunun hemen ardından meydana gelen tane büyümesini yavaşlatırlar. Böylece, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi ince taneli bir mikroyapı elde edilir.



Şekil 2.5. TMAZ (solda) ve kaynak dikişi (sağda) sınırında karakteristik, ince taneli mikroyapı.

2.3.1. Alüminyum Matriks Kompozitlerin Sürtünme Karıştırma İşlemi

SKP kullanılarak partiküllerle/parçacıklarla güçlendirilmiş alüminyum alaşımlarının özellikleri birçok çalışmada araştırılmıştır. Shafiei-Zarghani vd. (2011), nano boyutlu Al_2O_3 'ü AA6082 alüminyum alaşımına dâhil ederek parçacıklı bir kompozit yüzey tabakası oluşturmak için SKP'yi kullanmıştır. Al_2O_3 parçacıklarının ortalama boyutu yaklaşık 50 nm'dir. Yüzey kompoziti ile AA6082 taban malzeme arasında mükemmel bir adezyon elde edilmiştir. Çalışmada mikrosertlik ve aşınma direncini içeren mekanik özellikler test edilmiştir. Sonuçlar, SKP geçişlerinin sayısının artmasının, nano boyutlu alümina parçacıklarının daha düzgün dağılımına yol açtığını göstermiştir. Yüzeyin mikrosertliği, AA6082 taban malzeme kıyasla üç kat artırılmıştır. AA6082 taban malzemeye kıyasla nano kompozit yüzeyli Al'de aşınma direncinde önemli bir artış elde edilmiştir. SKP ile elde edilmiş kompozit tabakanın aşınma oranı, AA6082 taban malzemenin üçte birine düşürmüştür.

Bauri vd. (2015), SKP'yi kullanarak Ni partikülleri ile güçlendirilmiş Al5083/Ni yüzey kompozitinin üretiminde proses parametrelerinin ve takım geometrisinin etkilerini incelemiştir. İşlem parametreleri ve takım geometrisi, karıştırma bölgesindeki partikül dağılımında önemli bir rol oynamıştır. Çalışma sonucunda Al5083'e Ni partiküllerini dâhil etmek için minimum 1200 rpm takım dönüş hızı ve 0,4 mm/sn hareket hızı gerekli olduğu ve pim ile omuz üzerinde geometrik özelliklere sahip olan aletin, Ni partiküllerinin Al5083'de homojen olarak dağılmasında etkili olduğu görülmüştür. İnce partiküller, kaba partiküllere kıyasla karıştırma bölgesinde daha homojen bir şekilde dağılmıştır. SKP, dinamik yeniden kristalleştirme etkisiyle matrisin tane boyutunu 25 μ m'den 3 μ m'ye kadar inceltmiştir. Kompozitin sertlik ve çekme özellikleri, Al5083 taban malzemeye kıyasla önemli ölçüde iyileşmiş ve daha da önemlisi kompozitte yüksek bir süneklik korunmuştur.

Dolatkhah vd. (2012), SKP ile üretilen Al5052/SiC metal matrisli kompozitin mikro yapısal ve mekanik özellikleri üzerinde proses parametrelerinin etkilerini araştırmıştır. Al5052 levhalar üzerinde yüzey kompozit tabakası başarıyla oluşturulmuştur. En iyi toz dağılımı (test edilen parametrelerimiz arasında) sırasıyla 1120 dev/dak ve 80 mm/dak takım dönüş ve hareket hızı ile elde edilmiştir. Daha fazla SKP geçişi ve geçişler arasındaki takım dönüş yönünün değiştirilmesi, metal matris kompozitte SiC parçacıklarının önemli ölçüde daha homojen yayılmasına yol açmıştır. Keskin plastik deformasyon ve dinamik yeniden kristalleşme nedeniyle SKP, karıştırılan bölgede ince bir eş eksenli tane mikro yapısı oluşturmuştur. SiC parçacıklarının eklenmesi, tane incelmelerini yoğunlaştırmıştır. En iyi sonuçlar nano boyutlu SiC tozu ile elde edilmiştir. Bu durumda SKP, ortalama tane uzunluğu 243 μ m olan ilk mikro yapıyı, ortalama tane boyutu 0,9 μ m olan ultra ince taneli bir mikro yapıya dönüştürmüştür. Güçlendirici SiC parçacıklarının eklenmesi, daha fazla sayıda SKP geçişi, geçişler arasında takım dönüş yönünün değiştirilmesi ve SiC parçacıklarının boyutunun küçültülmesi, sertliğin ve aşınma direncinin artmasına neden olmuştur. Al5052/SiC metal matrisli kompoziti ile Al5052 taban malzemenin mikrosertlik değeri %55'e kadar artırılmış ve aşınma oranı yaklaşık 9,7 kat azalmıştır.

Liu vd. (2012), SKP ile güçlendirilmiş kompozit malzemeler oluşturmak için karbon nanotüpler (CNT) gibi nano ölçekli takviyeler kullanmıştır. Çalışma sonucunda, SKP'nin CNT kümelerini parçalayabildiği, CNT'leri matrise dağıtabildiği ve CNT'lerin

dağılım homojenizasyonunun artan SKP geçişi ile arttığı gözlemlenmiştir. SKP ile üretilen CNT/Al2009 kompozitlerinin tane boyutu, SKP uygulanmış Al2009 ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde incelmıştır. SKP CNT/Al2009 kompozitinin mekanik mukavemeti, özellikle akma gerilmesi, SKP Al2009 ile karşılaştırıldığında önemli gelişmeler göstermiştir. CNT konsantrasyonunun ağırlıkça %0'dan %3'e yükseltilmesi akma gerilmesinde artışa neden olmuştur. Nihai çekme mukavemeti, CNT konsantrasyonunun ağırlıkça %0'dan %1'e çıkarılmasıyla artmış, ancak CNT konsantrasyonu ağırlıkça %3'e yükseldikçe azalmıştır. CNT/Al2009 kompozitlerinin akma gerilmesini tahmin etmek için yük aktarımına ve tane inceltmesine dayalı bir akma gerilmesi denklemi önerilmiştir. Tahmin edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olmuştur. Bu, CNT/Al2009 kompozitlerindeki akma gerilmesi artışının, matristen CNT'lere yük aktarımına ve tane inceltme işlemine bağlı olduğunu göstermiştir.

Arora vd. (2012), SKP yöntemini kullanarak kompozit üretimini gözden geçirmiş ve SKP'nin dökme veya dövme alüminyum bazlı alaşımların tane boyutunun inceltmesi için etkili ve verimli bir süreç olabileceğini göstermiştir.

Shafiei-Zarghani vd. (2009) ve Mahmoud vd. (2008), Al_2O_3 ve SiC partiküllerini Al, Cu ve Fe alaşımları gibi taban malzemelere dâhil etmiş ve sonuçta taban malzemelerin aşınma direncinde bir gelişme gözlemlemişlerdir.

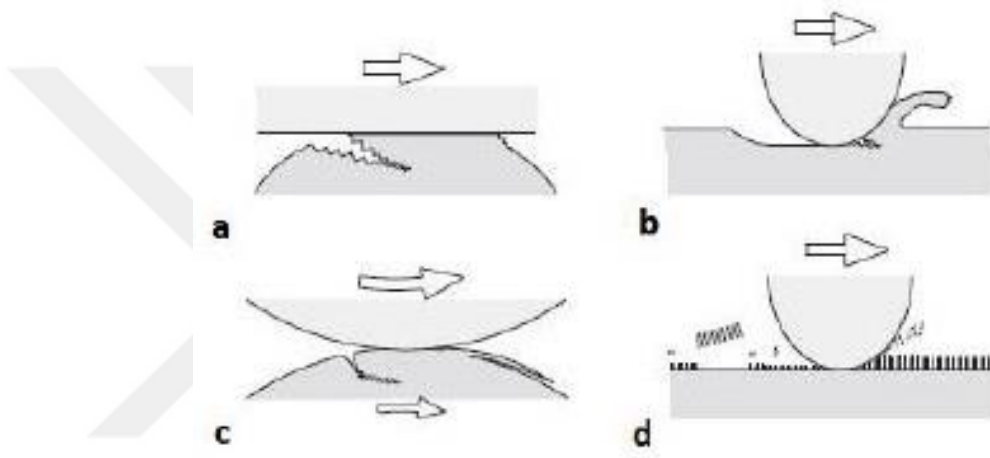
Mishra vd. (2003), 0.7 mm SiC partikülleri ile Al5083 alaşımından bir yüzey kompoziti üretmiş ve alaşıma SiC sert partiküllerin ilave edilmesinin bir sonucu olarak üretilen yüzey kompozitinin sertliğinin ana metalden %10 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Qian vd. (2012), SKP'yi kullanarak Al-Al₃Ni in situ kompozitlerini sentezlemiş ve kompozitin gelişmiş sertlik ve çekme özelliklerine sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Lee vd. (2008), SKP ile üretilen bir Al-Fe in situ nanokompozitinin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Ayrıca Al matrisinde ikinci faz parçacıklarının (Al₁₃Fe₄) düzgün bir şekilde yayıldığını belirtmişlerdir. Parçacıkların ince dağılımı, ultra ince taneli yapıya sahip bir alüminyum matris ile sonuçlanmıştır.

2.4. Aşınma Mekanizmaları

Aşınma, temas eden iki yüzey arasındaki mekanik etkileşimden kaynaklanan ilerleyici madde kaybı olarak tanımlanabilir. Genel olarak bu yüzeyler, kayma veya yuvarlanma şeklinde ve yük altında nispi hareket halindedirler. Aşınma, yüksek gerilimli ara yüzey bölgelerinin lokal mekanik arızası nedeniyle oluşur ve arıza modu genellikle çevresel faktörlerden etkilenir. Endüstride aşınma, büyük problemlere yol açan ve istenmeyen bir durumdur. En yaygın aşınma mekanizmaları aşağıda Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Bhushan, 2000).

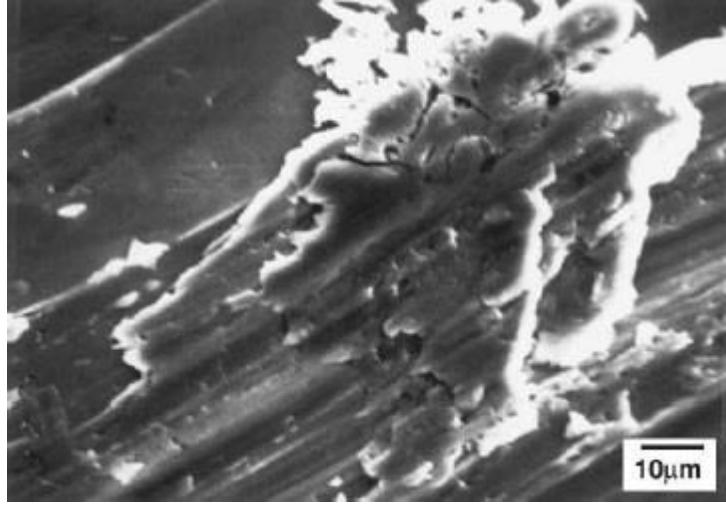


Şekil 2.6. Aşınma mekanizmaları: **(a)** adheziv aşınma, **(b)** abrasif aşınma, **(c)** yorulma aşınması, **(d)** korozyon aşınması (Bhushan, 2000).

2.4.1. Adheziv aşınma

Birbiriyle izafi olarak hareket eden iki malzeme yüzeyinin temas halinde bulunması ve adheziv yapışma direnci oluşturacak kadar plastik temasta olması durumunda temas yüzeyinde büyük bir plastik deformasyon meydana gelir. Bu temas yüzeylerindeki plastik deformasyon sonucunda çatlak oluşumu başlayarak bu çatlaklar büyümeye devam eder. Çatlak, temas yüzeyine ulaştığında aşınma parçacığı oluşarak adheziv transfer sonlanmış olur. Temas yüzeyinde yeterli yapışmayı meydana getiren bu aşınma türü adheziv aşınma olarak adlandırılmıştır (Bhushan, 2000).

Şekil 2.7'de de görüldüğü üzere adheziv aşınma sonucunda yüzeyden kopan parçacıklar hareket eden iki yüzey arasında kalarak bir ara katman oluştururlar.



Şekil 2.7. Adhezif aşınmaya ait bir yüzey görüntüsü (Bhushan, 2000).

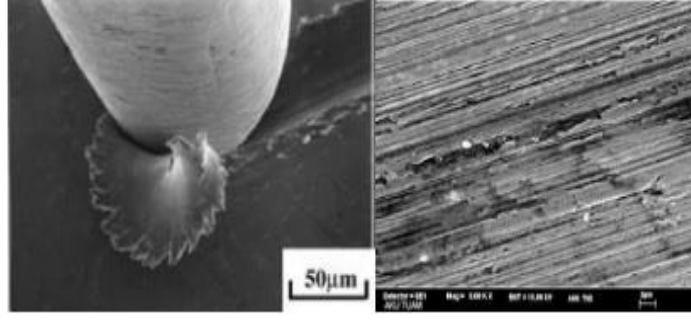
Temas yüzeylerinde bulunan pürüzlülükler birbirlerine temas ederek temas alanını artırır. Pürüzlülüklerin temas ettiği bu alanlarda fiziksel ya da kimyasal yollarla oluşan bağlar sonucu bir yapışma meydana gelir. Birbirine göre izafî olarak hareket eden iki yüzey arasında temas yerlerinden kopmalar meydana gelir. Adhezif aşınmaya yatak sarma olayı örnek verilebilir (Can, 2006).

2.4.2. Abrazif aşınma

Birbirine göre eğimli veya kıvrımlı temas halinde bulunan iki yüzeyin temas ara yüzeyinde hareketleri esnasında çizikler meydana gelir. Çizik oluşmasıyla birlikte yüzeyden bir miktar malzeme kaybı oluşur. Mekanik özellikleri zayıf olan yüzey üzerinde ise kanallar oluşacaktır. Bu aşınma türüne ise abrazif aşınma adı verilmektedir (Bhushan, 2000).

Kırılma tokluğu yüksek olan yumuşak metaller, seramikler kayma esnasında sert parçalar tarafından plastik deformasyona maruz bırakılırlar, kırılma tokluğu yüksek olan gevrek malzemelerde ise yüzey pürüzlerinin kırılması sonucu yüzeyde malzeme kayıpları meydana gelir (Can, 2006).

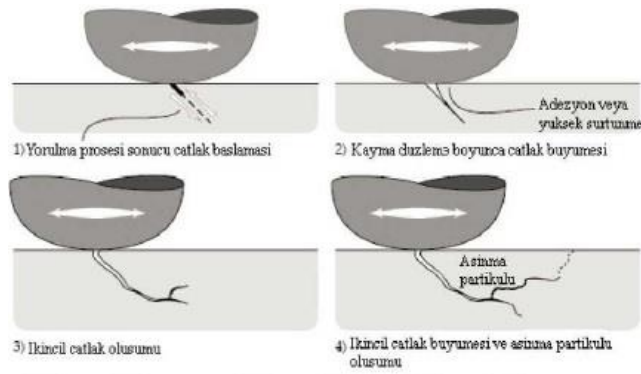
Metal şekillendirme yöntemlerinden bir tanesi olan ve yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinin temeli abrazif aşınmaya dayanmaktadır. Şekil 2.8’de görüldüğü üzere sert parçacıklar yumuşak metale batarak abrazif aşınmaya neden olmaktadır (Can, 2006).



Şekil 2.8. Abrazif aşınma(Bhushan, 2000).

2.4.3. Yorulma aşınması

Titreşim etkisi altında oluşan zorlanmalardan kaynaklı yorulma kırılması hasarları, yorulma aşınmasını meydana getirmektedir. Şekil 2.9’da yorulma aşınması şematik olarak gösterilmiştir. Değişken ve tekrarlı yüklemeler yorulma aşınmasını meydana getirir. Genel olarak yüzeyde bulunan, büyüklüğü zamana ve konuma bağlı olarak değişen mekanik gerilmeler ile meydana gelen tribolojik zorlamalar sonucunda bu aşınma türü birçok aşınma prosesinde görülür. Bu aşınma mekanizması sonucunda malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur ve bu oluşan çatlakların sonucunda yüzeyden parçacıklar kopar, çukur ve oyuklar oluşur (Buytoz, 2004). Aşağıda Şekil 2.9’da yüzeydeki çatlak oluşumu ve ilerleme mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Yorulma aşınması sonucunda yüzeyde çatlak oluşumu ve büyümesi (Buytoz, 2004).

2.4.4. Korozyon aşınması

Kayma işlemi eğer korozyon ortam içerisinde oluyorsa bu durumda korozyon ya da kimyasal aşınma meydana gelir. Havanın içerisinde bulunan oksijen korozyon etki

oluşturur. Oksijen metal yüzeyinde oksit tabakası oluşturur ve temas eden parçalarla bu oksit tabakası aşınır. Ortam içerisinde hava dolayısıyla oksijen sürekli bulunduğundan bu işlem bu şekilde sürekli oluşabilir (Can, 2006).



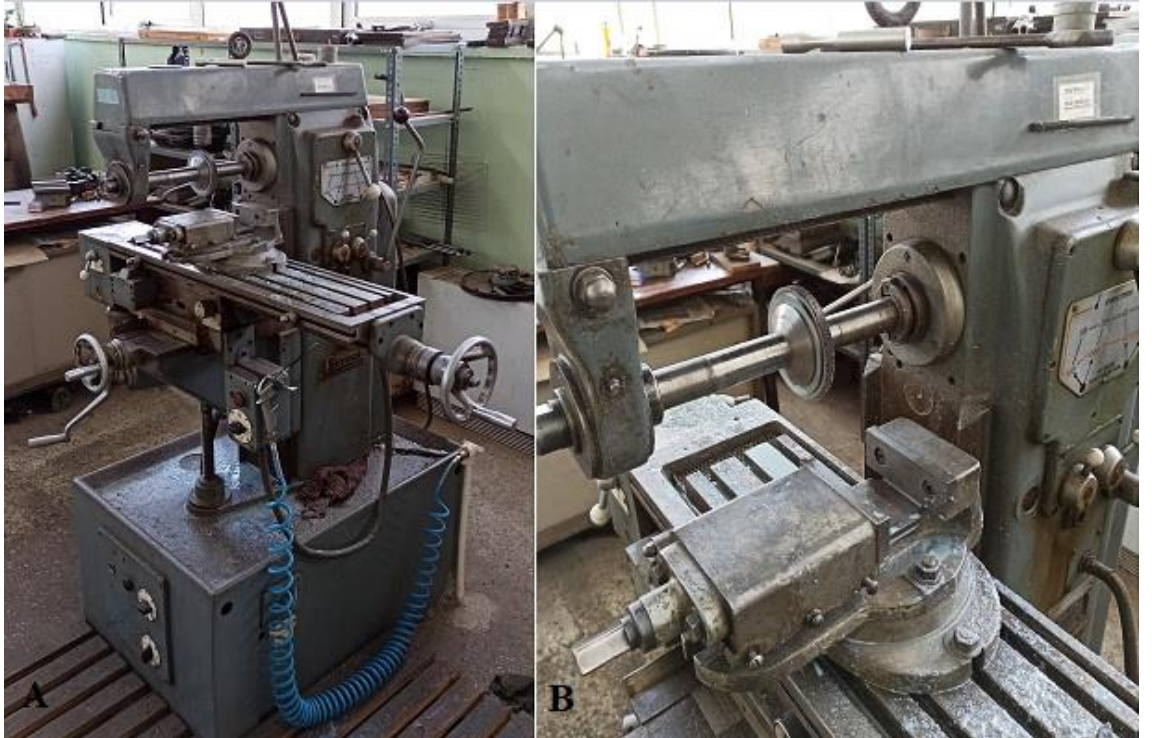
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada taban malzeme olarak 80mmX200mmX10mm boyutunda Al5083 alaşımları kullanılmıştır. SKP uygulanmadan önce Al5083 taban malzemeler 600-800-1200-2000 mesh zımparalarla ile zımparalanmış, ardından ultrasonik temizleme cihazı ile 20 dakika temizlendikten sonra etil alkol ile yıkanmış ve kurutulmuştur.

3.2. Yöntem

Bu çalışmada, Al5083 alaşımının mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için öncelikle plakaların yüzeylerine takviye edilecek toz parçacıklarının koyulabilmesi için freze tezgâhında plaka yüzeylerine 0,4mm genişliğinde 1,2mm derinliğinde 10 adet kanal açılmıştır. Kullanılan freze tezgâhı ve malzeme yüzeyine açılan kanallar sırasıyla Şekil 3.1a,b ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1.a) Freze tezgahı genel görünüm b) Kanal açma işlemi uygulama görüntüsü.



Şekil 3.2. Kanal açılmış taban malzeme.

Al5083 alaşım yüzeyleri üzerinde SKP kullanılarak Al5083/Al₂O₃, Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN, Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN, Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN ve Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakaları üretilmiştir. Kompozit tabakaları SKP ile üretmek için 600 kg yük altında 1250 rpm takım dönüş hızı, 55 mm/dak ilerleme hızı ve 3° takım açısı uygulanmıştır. Sürtünme karıştırma proses düzeneği ve proses uygulama aşaması sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de verilmiştir. Proses edilen alanlardan alınan numuneler tekrar 600-800-1200-2000 mesh zımpara ile zımparalanmıştır. Mikroyapı çalışmaları için, zımparalanmış numuneler alümina (Al₂O₃) ile parlatılmış ve 40 saniye Keller çözeltisi ile aşındırılmıştır. Çözelti içinden çıkarılan numuneler etil alkol ile yıkanmış ve daha sonra kurutulmuştur.



Şekil 3.3. Sürtünme karıştırma proses düzeneği.



Şekil 3.4. Proses uygulama aşaması.

SKP ile Al5083 alaşımı ve Al5083 alaşımı yzeyler izerinde ızretilen Al5083/Al₂O₃, Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN, Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN, Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN ve Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakaların yapısal ızellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) (FEI Quanta FEG-450SEM-EDAX) (Bkz. şekil 3.5) ve XRD (PANALİTİK EMPYREAN) (Bkz. şekil 3.6) cihazları kullanılarak analiz edilmiştir.



şekil 3.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDAX genel gırnümü.

Aşağıdaki eşitlikte verilen Scherrer formülü kullanılarak XRD analizinden tam genişlik yarı maksimum değeri ölçölmüş ve SKP uygulanmış numunelerin ortalama tane boyutları belirlenmiştir.

$$T = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.1)$$

Bu formölde, λ bakır hedefin dalga boyu, β tam genişlik yarı maksimum ve θ kırınım açısıdır.



Şekil 3.6. X ışını difraksiyonu (XRD) cihazı genel görünümü.

Numunelerin sertliği, 15 saniye boyunca 25 g yük altında Vickers uç kullanılarak belirlenmiştir (Bkz. Şekil 3.7). Sürtünme ve aşınma özelliklerini belirlemek için ball-on-disk aşınma test cihazı kullanılmıştır (Bkz. Şekil 3.8). Aşınma testleri Al_2O_3 bilyeler kullanılarak 5N yük altında 900 saniye yapılmıştır (Bkz. Şekil 3.9). Aşınma oranları, 3D optik profilometre (Bkz. Şekil 3.10) ile analiz edilerek belirlenmiştir. Aşınma izi görüntüleri SEM kullanılarak karakterize edilmiştir.



Şekil 3.7. Mikro sertlik ölçüm cihazı.



Şekil 3.8. Aşınma deney düzeneği genel görünüm.



Şekil 3.9. “Ball-on Disk” deney düzeneği.



Şekil 3.10. 3D optik profilometre.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Yapısal Analiz Sonuçları

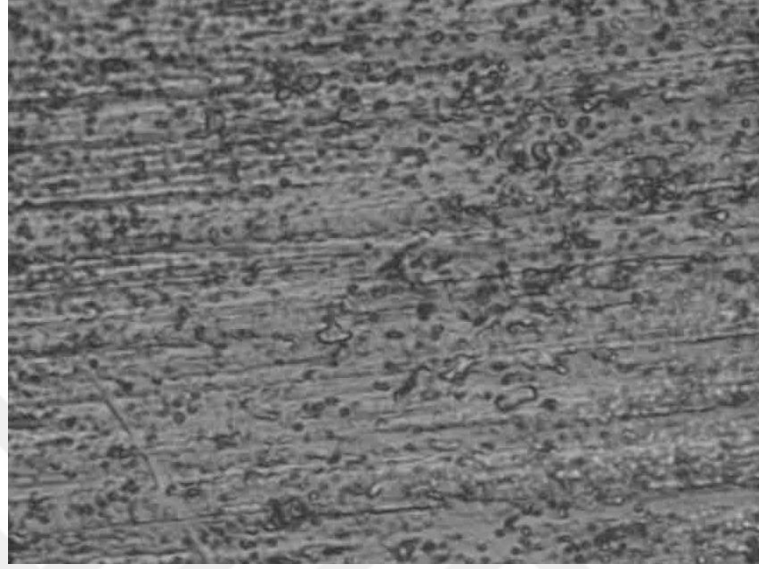
SKK/SKP sırasında karıştırılan bölge içindeki yoğun plastik deformasyonun ve yüksek sıcaklığa maruz kalmanın katkısı, karıştırılan bölge içinde yeniden kristalleşme ve doku gelişimi ile sonuçlanır ve karıştırılan bölge içinde ve çevresinde çökelme ve irileşmeye neden olur. Tanelerin ve çökeltilerin mikroyapısal karakterizasyonuna dayalı olarak, karıştırılmış (nugget) bölge, termo-mekanik olarak etkilenen bölge (TMAZ) ve ısıdan etkilenen bölge (HAZ) olmak üzere üç farklı bölge tanımlanmıştır. SKK/SKP sırasında yoğun plastik deformasyon ve sürtünmeli ısıtma, karıştırılan bölge içinde yeniden kristalize edilmiş ince taneli bir mikro yapının oluşmasına neden olur. Bu bölge genellikle külçe bölgesi (veya kaynak külçesi) veya dinamik olarak yeniden kristalize bölge (DXZ) olarak adlandırılır (Mishra ve Ma, 2005). Şekil 4.1’de Al5083 alaşımı üzerinde SKP ile üretilen bir $Al_2O_3/h-BN$ yüzey kompozitinin karıştırma bölgesinin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



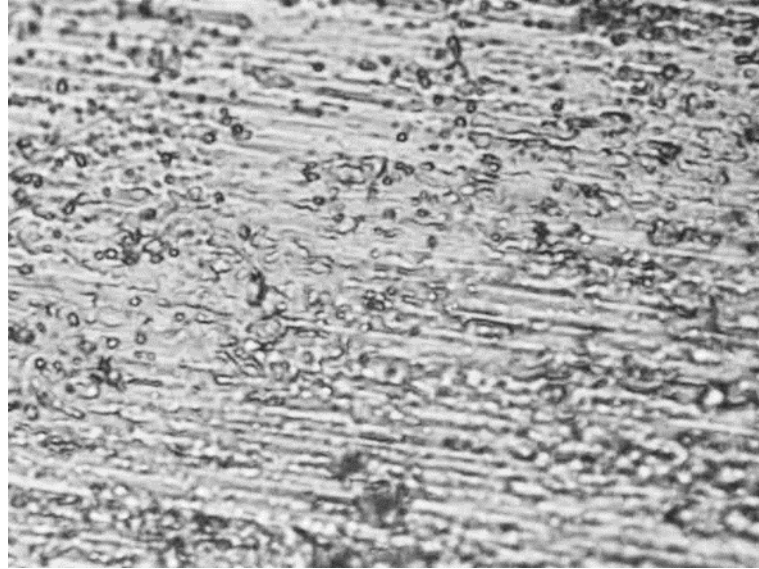
Şekil 4.1. SKP ile üretilen bir Al5083/ Al_2O_3+h-BN yüzey kompozitinin karıştırma bölgesinin optik mikroskop görüntüsü.

SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ile Al5083/ Al_2O_3 ve Al5083/%92 Al_2O_3 +%8h-BN kompozit tabakalarına ait karıştırma bölgelerinden elde edilen örnek optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.2-Şekil 4.4’de verilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri

incelendiğinde SKP uygulanmış Al5083 alaşımında çökelmelerin meydana geldiği, Al5083/Al₂O₃ ve Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakalarında Al₂O₃ ve Al₂O₃+h-BN'nin homojen bir şekilde yüzeyde dağıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. SKP uygulanmış Al5083 alaşımının karıştırma bölgesinden elde edilen optik mikroskop görüntüsü.



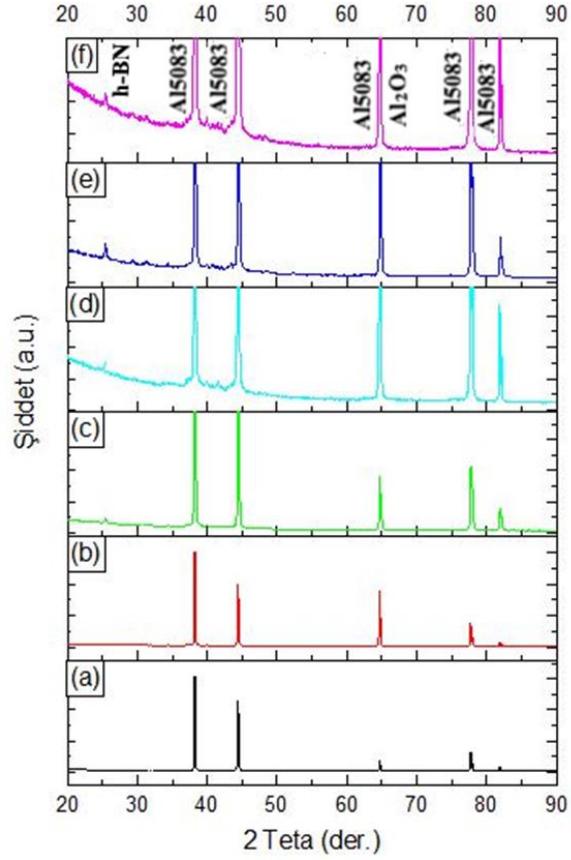
Şekil 4.3. SKP ile üretilen Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakanın karıştırma bölgesinden elde edilen optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 4.4. SKP ile üretilen Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakanın karıştırma bölgesinden elde edilen optik mikroskop görüntüsü.

SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile üretilen Al5083/Al₂O₃, Al₂O₃/%99Al₂O₃+%1h-BN, Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN, Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN ve Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakaların XRD grafiği Şekil 4.5’de verilmiştir. Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakasında Al₂O₃ (440) yapısı ve Al5083/Al₂O₃ yapısına h-BN katıldığında h-BN (002) ve Al₂O₃ (440) yapıları oluşmuştur (Ansari ve Husain, 2011; Huang vd., 2013).

SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile üretilen Al5083/Al₂O₃, Al₂O₃/%99Al₂O₃+%1h-BN, Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN, Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN ve Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakalarından XRD analizleri sonucu elde edilen ortalama tane boyutları Tablo 4.1’de verilmiştir. SKP sonrası Al5083 alaşımının ortalama tane boyutu en büyük değere sahipken (173 nm), Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakadan en küçük ortalama tane boyutu değeri (96 nm) elde edilmiştir. Al5083/Al₂O₃’e h-BN’nin ilave edilmesiyle elde edilen Al5083/Al₂O₃+h-BN kompozit tabakaların tane boyutlarında Al5083/Al₂O₃ kompozit tabaka ile kıyaslandığında büyüme meydana gelmiştir. Ayrıca Al5083/Al₂O₃+h-BN kompozit tabakalarında h-BN miktarının artması da tane boyutunda büyümeye neden olmuştur.



Şekil 4.5. XRD grafiği (a) Al5083 (b) Al5083/Al₂O₃ (c) Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN (d) Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN (e) Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN (f) Al5083/%92Al₂O₃+%8 h-BN

Tablo 4.1. XRD analizleri sonucu elde edilen ortalama tane boyutları

	Tane Boyutu (nm)
Al5083	173
Al5083/Al ₂ O ₃	96
Al5083/%99Al ₂ O ₃ +%1h-BN	100
Al5083/%97Al ₂ O ₃ +%3h-BN	123
Al5083/%95Al ₂ O ₃ +%5h-BN	135
Al5083/%92Al ₂ O ₃ +%8h-BN	146

4.2. Mekanik Test Sonuçları

SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile üretilen Al5083/Al₂O₃, Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN, Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN, Al5083/%95Al₂O₃+%5h-

BN ve Al5083/%92Al₂O₃+ %8 h-BN kompozit tabakaların sertlik değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir. SKP ile üretilen Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakası, küçülen tane boyutu nedeniyle Al5083 alaşımının sertliğini önemli ölçüde artırmıştır. Bununla birlikte Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN, Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN, Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN ve Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakaların sertlik değerleri de Al5083 alaşımının sertliğini artırmıştır. Ancak Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakası ile kıyaslandığında artan tane boyutu ile birlikte; Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakasına h-BN’nin ilave edilmesiyle elde edilen Al5083/Al₂O₃+h-BN kompozit tabakaların sertlikleri azalmıştır. h-BN ilavesi ile elde edilen Al5083/Al₂O₃+h-BN kompozit tabakalarda ise artan h-BN miktarı ile sertlik değerleri azalmıştır.

Yuvaraj vd. (2015), takviye elamanı olarak B₄C kullanarak SKP ile Al5083/B₄C yüzey kompoziti üretmiş ve üretilen kompozit tabakanın Al5083 alaşımının sertliğini artırdığını rapor etmişlerdir. Bauri vd. (2015), metal partikül takviyeli kompoziti üretmek için SKP ile Al5083 (ortalama sertliği 81HV) alaşımına Ni partikülleri ilave etmiş ve Al5083/Ni kompozitinin sertliğini 91HV olarak elde etmişlerdir.

Tablo 4.2. Sertlik değerleri

	Sertlik değeri (HV_{0,25})
Al5083	89
Al5083/Al₂O₃	132
Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN	124
Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN	119
Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN	115
Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN	99

Zahmatkesh ve Enayati (2010), Al₂O₃ partiküllerinin Al matrisinde homojen dağılımı nedeniyle, SKP ile üretilen Al2024/Al₂O₃ yüzey kompozitinin karıştırma bölgesinde Al2024 malzemeye göre daha yüksek sertlik değeri elde etmişlerdir. Raafat vd. (2011), A390/Al₂O₃ ve A390/grafit yüzey kompozitlerinin mikrosertlik değerinin, A390 malzemenin sertliğinden daha yüksek sertlik sergilediğini ve tane incilmesi ile takviye

parçacıklarının daha yüksek sertliği nedeniyle sertliğin arttığını bildirmişlerdir. Khan vd. (2018), SKP ile karbon nanotüpler ve bor karbür partikülleri içeren Al5083 yüzey kompozitleri üretmiş ve karıştırma bölgesindeki sertlikteki artışı proseste kullanılan takımın neden olduğu ciddi plastik deformasyon ve bunun sonucunda oluşan tane incelmeleri ile açıklamışlardır.

Tane boyutunun sertlikle ilişkisi Hall-Petch denklemi ile açıklanabilir.

$$H_c = H_0 + K D^{-1/2} \quad (4.1)$$

Burada H_c tane çapının bir fonksiyonu olarak sertlik, H_0 temel malzemenin sertliği, K bir sabit ve D ortalama tane çapıdır. Hall-Petch ilişkisi, sertliğin tane boyutu ile ters korelasyona sahip olduğunu ifade eder. Darras vd. (2007) ve Asadi vd. (2012), SKP ile üretilen AZ91/SiC nano kompozitinin sertliğinin, SiC parçacıklarının düzgün dağılımı ve AZ91 malzemenin tane boyutunun iyileştirilmesi nedeniyle arttığının gözlemlendiğini bildirmiştir. Burada aynı koşullarda SKP ile SiC parçacıklarının eklenmesiyle elde edilen örneklerin mikrosertliklerinin, SiC parçacıklarının kendi sertliklerinden ve Orowan mekanizmasından dolayı arttığını belirtmişlerdir. Bu mekanizma, dislokasyonların kesilemeyen SiC parçacıkları ile etkileşimini açıklamaktadır. Bu mekanizmaya göre dislokasyonlar ilmek yapar ve parçacıkları geçer. Aslında parçacıklar dislokasyon hareketinin önünde bir bariyer görevi görerek kompozit numunelerin mukavemet ve sertliğinin artmasına neden olur.

$\Delta\sigma_{\text{Orowan}}$ aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\Delta\sigma_{\text{Orowan}} = \frac{K G_m b}{\lambda} \ln \frac{d_p}{2b} \quad (4.2)$$

Burada b Burgers vektörü, d_p parçacıkların ortalama çapı, G_m matrisin kesme modülü, λ parçacıklar arası boşluk ve K deneyle belirlenen bir sabittir.

Mostafapour Asl ve Khandani (2013), SKP ile Al5083/Graphite_p/Al₂O_{3p} hibrit bir yüzey nanokompoziti üretmiştir. Elde edilen nanokompozit yüzeylerde, alümina parçacıklarının ortalama parçacıklar arası boşluğundaki azalma nedeniyle; Al₂O_{3p} miktarı arttıkça sertlik, akma mukavemeti ve nihai çekme mukavemeti değerleri artmış ancak spesifik bir Al₂O_{3p} miktarından sonra azalma göstermiştir. Nanokompozit

yüzeylerde Graphite_p miktarındaki değişimle sertlik arasında direk bir ilişki kurulamamıştır.

4.3. Tribolojik Test Sonuçları

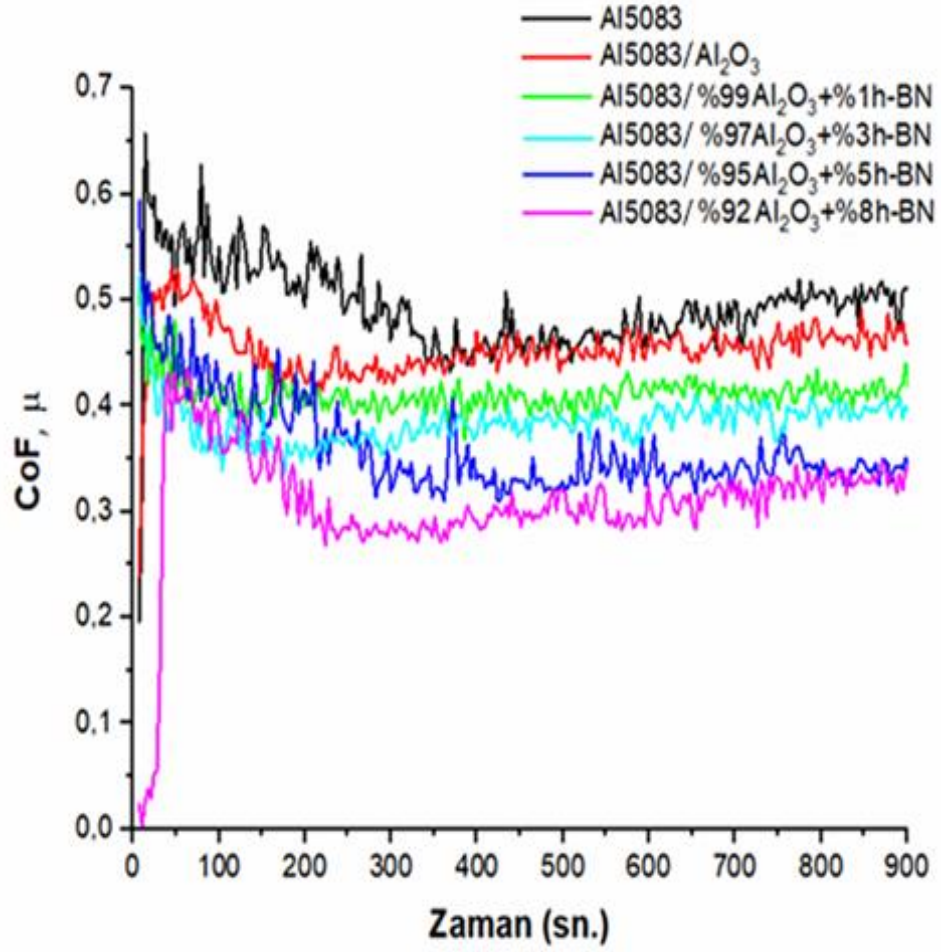
SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile üretilen Al5083/Al₂O₃, Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN, Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN, Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN, Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakaların sürtünme katsayısı (CoF)-zaman grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir.

Ayrıca, SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile üretilen Al5083/Al₂O₃, Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN, Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN, Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN ve Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakaların sürtünme katsayısı değerleri ve aşınma oranı değerleri Tablo 4.3'de verilmiştir.

Al5083 alaşımı üzerine SKP ile üretilen bütün kompozit tabakalar Al5083 alaşımının sürtünme katsayısını önemli ölçüde düşürmüştür. Ayrıca Al5083/Al₂O₃+h-BN kompozit tabakalarda ilave edilen h-BN miktarı arttıkça sürtünme katsayısında azalma meydana gelmiştir. En düşük sürtünme katsayısı SKP ile üretilen Al5083/%92Al₂O₃+ %8h-BN kompozit tabakada 0,31 olarak elde edilmiştir.

Benzer bir etki Mostafapour Asl ve Khandani (2013) tarafından elde edilmiştir. Mostafapour Asl ve Khandani (2013) SKP ile Al5083/Graphite_p/Al₂O₃ hibrit nanokompozit bir yüzey üretmiş ve bu yüzeyin kayma aşınma özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda hibrit kompozit yüzeyde artan grafit oranıyla birlikte grafitin yağlayıcılık özelliği nedeniyle sürtünme katsayısının azaldığını rapor etmişlerdir. Bu çalışmada da artan h-BN katı yağlayıcılık etkisiyle (Chkhartishvili vd., 2016) hem Al5083'ün hem de Al5083/Al₂O₃ kompozitinin sürtünme katsayısını önemli oranda düşürmüştür.

Sürtünme katsayısı ile aşınma oranı arasında doğru orantılı bir ilişki gözlemlenmiştir. Bu durum literatür ile uyuşmaktadır (Senhadji vd., 2016). Düşük sürtünme katsayısı, temas yüzeyinin altındaki tabakaya daha düşük kayma gerilimi aktarımından sorumludur, bu da daha düşük aşınma hızına neden olabilir (Basavarajappa vd., 2007).



Şekil 4.6. SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile üretilen kompozit tabakaların sürtünme katsayısı (COF) - zaman grafiği.

Tablo 4.3. SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile üretilen kompozit tabakaların ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma oranları

	Ortalama Sürtünme Katsayısı, μ	Aşınma Oranı (10^{-6} mm^3/Nm)
Al5083	0,496	6,519
Al5083/Al ₂ O ₃	0,455	6,449
Al5083/%99Al ₂ O ₃ +%1h-BN	0,412	6,322
Al5083/%97Al ₂ O ₃ +%3h-BN	0,386	5,346
Al5083/%95Al ₂ O ₃ +%5h-BN	0,359	4,648
Al5083/%92Al ₂ O ₃ +%8h-BN	0,31	4,453

Mostafapour Asl ve Khandani(2013), SKP ile ürettikleri Al5083/Graphite_p/Al₂O_{3p} hibrit nanokompozit yüzeyin aşınma özelliklerini incelemiş ve artan grafit miktarıyla sürtünme katsayısı ile birlikte aşınma oranının azaldığını rapor etmiştir.

Kishan vd. (2018), 6061-T6 alüminyum alaşımı üzerine farklı hacimlerde TiB₂ parçacıklarının SKP ile takviye edilmesiyle nanokompozit yüzey tabakalarını başarıyla üretmiş ve tribolojik davranışını incelemiştir. Aşınma direncinin artan hacim yüzdesi ile iyileştiğini rapor etmiştir.

Kumar ve Kumar (2019), yaptıkları çalışmada yüzey kompozitlerini (Al1120-PNA-TiB₂) iki geçişli sürtünme karıştırma işlemi ile başarılı bir şekilde üretmiş ve TiB₂ ile hibrit partikül takviyeli yüzey kompozitlerinin matris malzemesine göre %56 ve %37 daha az aşınma oranına sahip olduğunu rapor etmiştir.

Yuvaraj vd. (2015), SKP ile Al5083/B₄C yüzey kompozitini üretmiş ve bu kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişler ve nano partiküllü B₄C içeren yüzey kompozitlerinin Al5083'den daha iyi aşınma direnci sergilediğini rapor etmişlerdir.

Yüksek sertlik ve sert seramik partüküllerin varlığı bu kompozitlerde aşınma direncini iyileştirmiştir. Archard denklemine göre aşınma oranı malzemenin sertliği ile ters orantılıdır. Nano parçacıkların yüksek sertlikleri ve bağlanma yapıları nedeniyle, nanoparçacıklar karşı malzeme tarafından yüzeye nüfuz etmeye ve kesmeye karşı direnç gösterir (Deuis vd., 1997; Mazaheri vd., 2014; Alidokht vd., 2011).

Alidokht vd. (2011), SiC ve MoS₂ partiküllerini tek geçişli SKP ile A356 alaşımına takviye etmiştir. Al/SiC kompozitinde kayma koşulunun ilk aşamasında takviye parçacıklarının pim (numune) yüzeyinden ayrılmasından dolayı artan aşınma oranı gözlemlenmiştir. Kayma mesafesi arttıkça SiC partikülleri karşı yüzeye sürterek pim ile disk arasında demir oksitlerin oluşmasına neden olmuştur. Pim yüzeyinde alüminyum oksitlerle birlikte SiC ve demir oksitler kompozit numunenin aşınma oranını azaltan tribomekanik olarak karıştırılmış bir katman oluşturmuştur. Al/SiC/MoS₂ numunesinde, MoS₂ partiküllerinin yüzeye çekilmiş ve aşınma debrisleri ile karışmıştır; böylece tribo tabaka oluşumu ile hibrit kompozitlerin aşınma direncini artırmıştır.

Rejil vd. (2012), SKP ile AA6360/TiC/B₄C hibrit yüzey kompoziti üretmiştir ve en düşük aşınma oranı yüzeyde ince tribofilm oluşumu ve matris alt tabakasında takviye

partiküllerinin düzgün dağılımı ile elde edilmiştir. Ayrıca bu sonucun, sert B_4C ile TiC partiküllerinin yağlayıcı birleşik etkisinden kaynaklandığı rapor edilmiştir.

Raaf vd. (2011), tribofilm oluşumunun, hafif aşınmadan şiddetli aşınmaya geçişi geciktirdiğini belirtmişlerdir.

Sudhakar vd. (2015), SKP ile A7075'in mikroyapısal bölgesinde B_4C parçacıklarının homojen dağılımının kompozitlerin sertliğini artırdığını bildirmişlerdir. Artan sertlik ile aşınma oranı azalmıştır. B_4C partikülleri ile birlikte MoS_2 'nin eklenmesi, numune yüzeyinde yağlayıcı bir film oluşması nedeniyle aşınmayı daha da azaltmıştır.

Thangarasu vd. (2015), SKP ile AA6082'ye TiC partiküllerinin dâhil edilmesinin tane yapısını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve kompozitlerin sertlik ve aşınma direncinde değişiklik sağladığını belirtmişlerdir.

Narimani vd. (2016), SKP ile B_4C ve TiB_2 partiküllerinin eklenmesinin, takviyeli kompozit numunenin sertlik değerinde daha iyi yükselme nedeniyle AA6063 kompozitlerinin aşınma direncini artırdığını rapor etmişlerdir.

Mirjavadi vd. (2017), SKP ile ZrO_2 partiküllerini Al5083'e takviye etmiş ve elde edilen sonuçlar, ZrO_2 partiküllerinin taban matrisi üzerindeki düzgün dağılımının, aşınma mekanizmasını şiddetli aşınmadan hafif aşınmaya geçirdiğini göstermiştir.

Du ve Li (2004), Al_2O_3/Al matrisinin aşınma direnci karakterini artıran bağlanma kuvvetinin, SiC/Al 'den daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir.

Mazaheri vd. (2011), A390 alaşımında daha iyi aşınma direncini, SKP işlemi ile Al_2O_3 partiküllerinin takviye edilmesiyle yüzeyde ayrılmamış tribofilm oluşumu sonucu gözlemlemiştir.

Mistry ve Gohil (2017), A6061-T6'nın aşınma direncini, SiC partikülleri takviye ederek önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu iyileşmenin, yük taşıma kapasitesi ve sertlik değerindeki iyileşmeden kaynaklandığını rapor etmişlerdir.

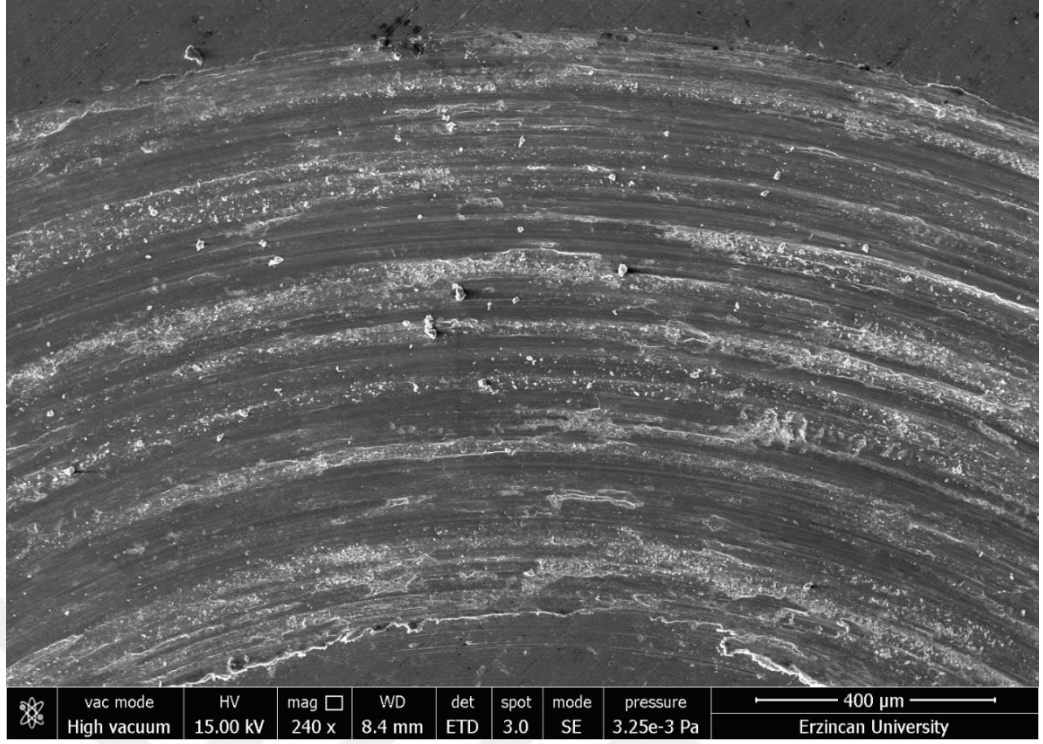
Mahmoud vd. (2010), SKP ile AA1050 üzerinde farklı ağırlık oranlarında Al_2O_3 ve SiC takviye elemanlar ile üretilen hibrit yüzey kompozitlerinin, farklı yük koşulları için aşınma özelliklerini belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda, Al_2O_3 'ün yüzde artışının 2 N

yükte daha iyi aşınma özellikleri sağladığını görülmüştür. 5 N yük koşullarında %80 SiC+%20 Al₂O₃ yüzey kompozitinin, diğer ağırlık oranlarına göre daha üstün tribolojik özellikler sergilediği belirtilmiştir. Her iki takviyenin kombinasyonunun, 10 N yük koşullarında aşınma direncini büyük ölçüde azalttığı rapor edilmiştir.

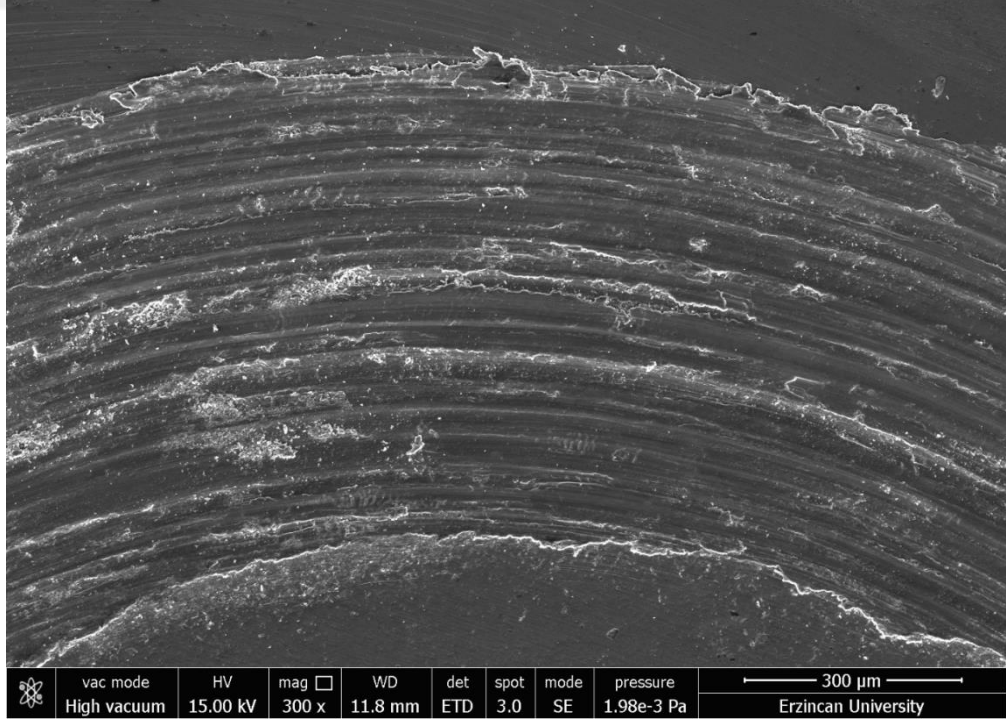
Palanivel vd. (2016), AA6082/TiB₂/BN hibrit numuneleri, optimize edilmiş SKP parametreleri kullanılarak üretilmiştir. Elde edilen sonuç, TiB₂'nin dağılmış etkisi ile birleşen BN partiküllerinin katı yağlama etkisinin kompozitlerin aşınma direncini etkili bir şekilde arttırdığını göstermiştir.

İncelenen literatür çalışmalarının ışığında mikro ve nano boyuttaki takviye elemanlarının çeşitli Al alaşımlarının tribolojik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Bu çalışmadaki sonuçlar göre de takviye elemanı olarak seçilen katı yağlayıcılık özelliğine sahip h-BN ilavesi ile elde edilen Al5083/Al₂O₃+h-BN kompozit tabakaların, Al5083 alaşımı ve Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakanın tribolojik özellikleri üzerinde iyileştirici etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

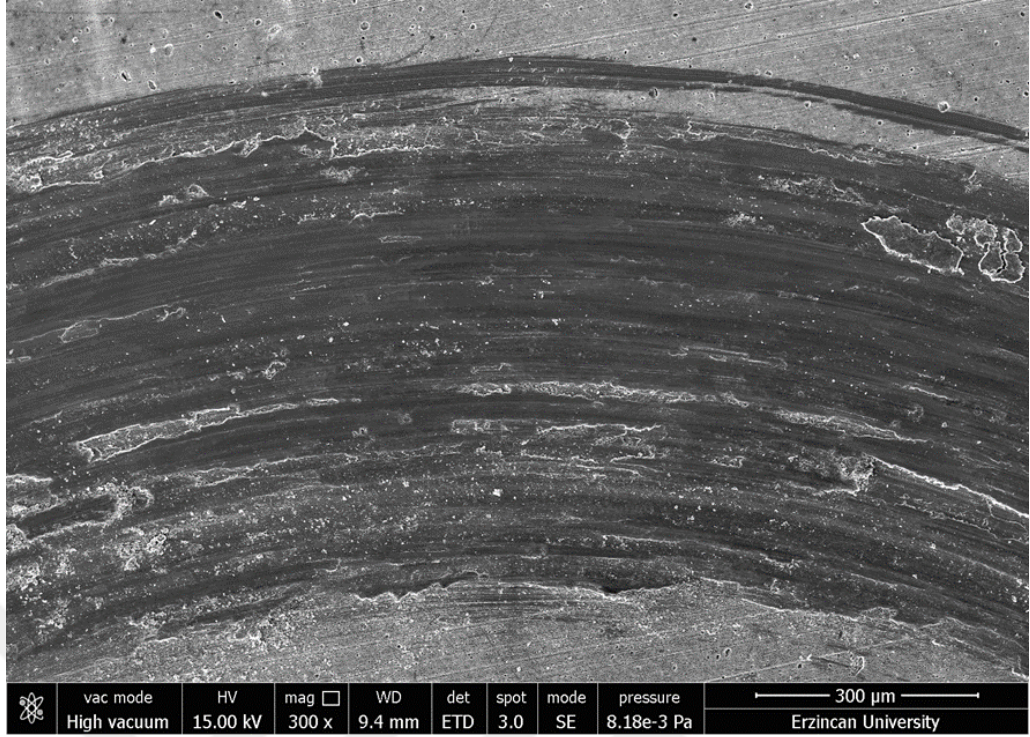
SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile üretilen Al5083/Al₂O₃, Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN, Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN, Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN ve Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakaların aşınma izlerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 4.13 - 4.18'de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde; SKP uygulanmış Al5083 alaşımında abrasif aşınmanın meydana geldiği ve abrasif aşınma sonucu aşınma izi üzerinde abrasif aşınma partiküllerinin bulunduğu gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 4.13). Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakasına uygulanan aşınma testi sonucunda da abrasif aşınma meydana gelmiştir (Bkz. Şekil 4.14). Al5083/Al₂O₃+h-BN kompozit tabakaların aşınma izleri incelendiğinde ise abrasif aşınmanın yanı sıra plastik deformasyonun olduğu gözlemlenmiştir.



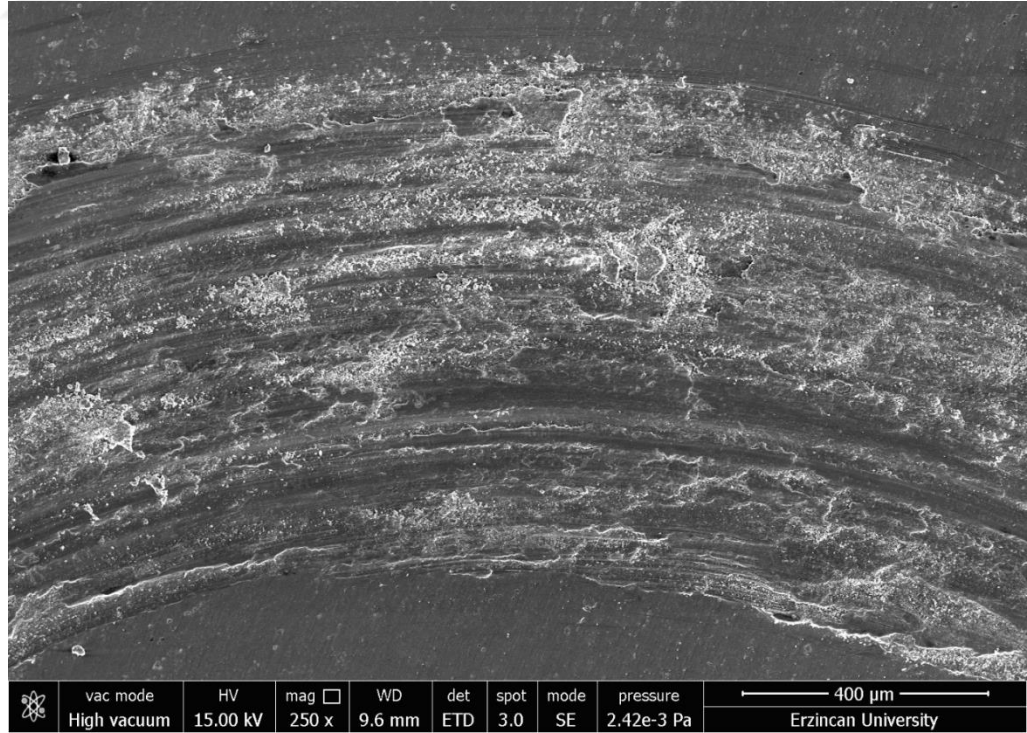
Şekil 4.13. SKP uygulanmış Al5083 alaşımının aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü.



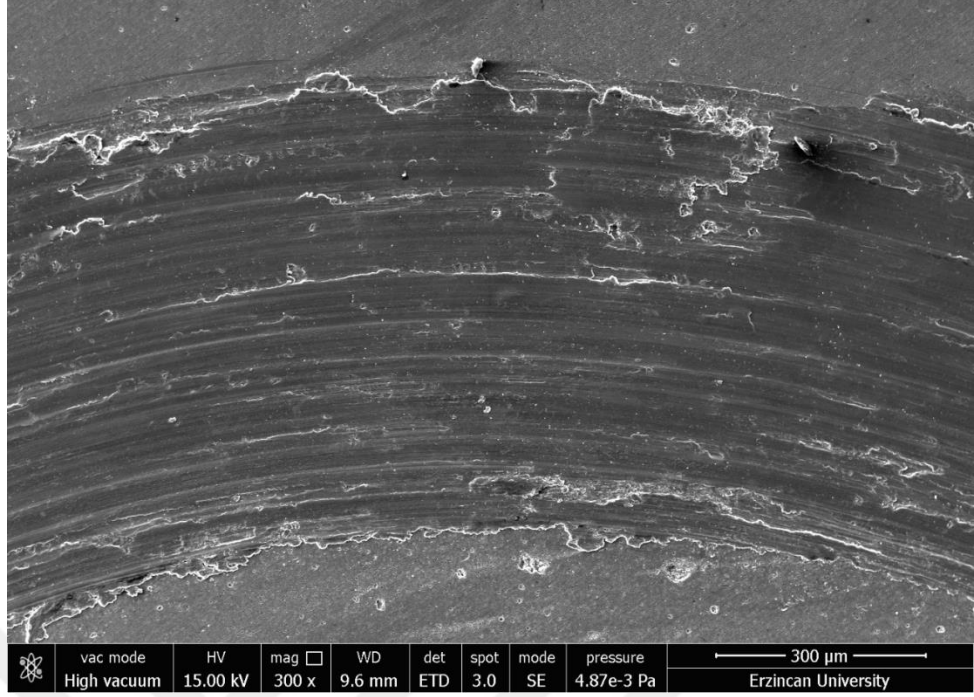
Şekil 4.14. SKP ile üretilen Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakanın aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü.



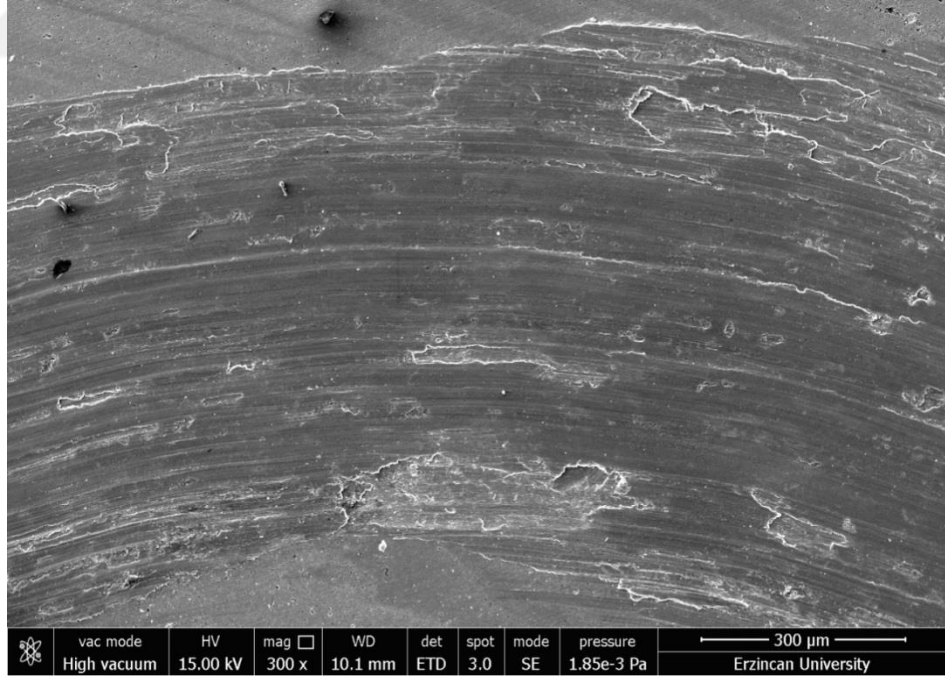
Şekil 4.15. SKP ile üretilen Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN kompozit tabakanın aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü.



Şekil 4.16. SKP ile üretilen Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN kompozit tabakanın aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü.



Şekil 4.17. SKP ile üretilen Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN kompozit tabakanın aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü.



Şekil 4.18. SKP ile üretilen Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakanın aşınma deneyinden elde edilen aşınma izinin SEM görüntüsü.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, Al5083 alaşımına SKP işlemiyle farklı oranlarda Al_2O_3 ve h-BN parçacıkları takviye edilerek bu alaşım üzerinde yeni yüzey kompozit tabakaları oluşturup alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Al5083 üzerinde SKP ile %100 Al_2O_3 , %99 Al_2O_3 +%1h-BN, %97 Al_2O_3 +%3h-BN, %95 Al_2O_3 +%5h-BN ve %92 Al_2O_3 +%8h-BN takviye oranlarında tozlar kullanılarak Al5083/ Al_2O_3 , Al5083/%99 Al_2O_3 +%1h-BN, Al5083/%97 Al_2O_3 +%3h-BN, Al5083/%95 Al_2O_3 +%5h-BN ve Al5083/%92 Al_2O_3 +%8h-BN kompozit tabakaları prosesin aynı yönlü iki paso uygulanmasıyla üretilmiştir ve bu işlemin etkileri aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

- SKP, Al5083 alaşımına başarılı bir şekilde uygulanmıştır.
- Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde SKP uygulanmış Al5083 alaşımı yüzeyinde çökelmeler olduğu gözlemlenmiştir. SKP ile üretilen Al5083/ Al_2O_3 ve Al5083/%92 Al_2O_3 +%8h-BN kompozit yüzeylerinde Al_2O_3 ve Al_2O_3 +h-BN tozlarının dağılımının homojen olduğu gözlemlenmiştir.
- SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile üretilen Al5083/ Al_2O_3 , Al5083/%99 Al_2O_3 +%1h-BN, Al5083/%97 Al_2O_3 +%3h-BN, Al5083/%95 Al_2O_3 +%5h-BN ve Al5083/%92 Al_2O_3 +%8h-BN kompozit tabakalarının XRD verileri incelendiğinde; Al5083/ Al_2O_3 kompozit tabakada Al_2O_3 (440) yapısı ve Al5083/ Al_2O_3 kompozit tabakasına h-BN katıldığında elde edilen Al5083/ Al_2O_3 +h-BN kompozit tabakalarda h-BN (002) ve Al_2O_3 (440) yapılarının olduğu gözlemlenmiştir.
- XRD analizleri incelendiğinde; SKP uygulanmış Al5083 alaşımının ortalama tane boyutu en büyük değere sahipken (173 nm), Al5083/ Al_2O_3 kompozit tabakadan en küçük ortalama tane boyutu değeri (96 nm) elde edilmiştir. Al5083/ Al_2O_3 'e h-BN'nin ilave edilmesiyle elde edilen Al5083/ Al_2O_3 +h-BN kompozit tabakalarının tane boyutunda büyüme meydana gelmiştir. Ayrıca Al5083/ Al_2O_3 +h-BN kompozit tabakalarda artan h-BN miktarının tane boyutunun büyümesine neden olduğu gözlemlenmiştir.
- SKP ile üretilen Al5083/ Al_2O_3 kompozit tabakası, küçülen tane boyutu nedeniyle SKP uygulanmış Al5083 alaşımının sertliğini önemli ölçüde artırmıştır. Bununla birlikte Al5083/ Al_2O_3 +h-BN kompozit tabakaların sertlik

değerleri de SKP uygulanmış Al5083 alaşımının sertliğini artırmıştır. Ancak Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakası ile kıyaslandığında artan tane boyutu ile birlikte; Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakasına h-BN'nin ilave edilmesiyle elde edilen Al5083/Al₂O₃+h-BN kompozit tabakaların sertlikleri azalmıştır. h-BN ilavesi ile elde edilen Al5083/Al₂O₃+h-BN kompozit tabakalarda ise artan h-BN miktarı ile sertlik değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek sertlik değeri 132HV ile Al5083 alaşımına %100Al₂O₃ katkısında elde edilmişken, en düşük sertlik değeri ise Al5083 alaşımında 89HV olarak ölçülmüştür.

- Al5083 alaşımı üzerinde SKP ile üretilen kompozit tabakaların tamamının SKP uygulanmış Al5083 alaşımının sürtünme katsayısını önemli ölçüde düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca Al5083/Al₂O₃+h-BN kompozit tabakalarda ilave edilen h-BN miktarı arttıkça bu takviye elemanının katı yağlayıcılık özelliğinden dolayı sürtünme katsayısında azalma meydana geldiği görülmüştür. En düşük sürtünme katsayısı SKP ile üretilen Al5083/%92Al₂O₃+ %8 h-BN kompozit tabakada 0,31 olarak elde edilmiştir.
- Sürtünme katsayısı ile aşınma oranı arasında doğru bir orantının olduğu gözlemlenmiş olup, sürtünme katsayısı düştükçe oluşturulan kompozit tabakalardaki aşınma oranının da düştüğü görülmüştür.
- Aşınma izlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde SKP uygulanmış Al5083 alaşımında abrasif aşınmanın meydana geldiği ve abrasif aşınma partiküllerinin bulunduğu, Al5083/Al₂O₃ kompozit tabakasında abrasif aşınmanın meydana geldiği ve Al5083/Al₂O₃-h+BN kompozit tabakalarda ise abrasif aşınmanın yanı sıra plastik deformasyonun olduğu görülmüştür.
- Bu çalışma, SKP ile yüzeyine farklı oranlarda katkı maddeleri eklenerek yeni yüzey kompozitleri elde edilen Al5083 alaşımının mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştirilebilirliği konusunda etkili olduğunu göstermiş ve bu alaşımın kullanım alan sınırlarının dışına çıkabileceğini göstererek yeni çalışmalara umut vermiştir.
- Bu çalışmada, SKP parametreleri sabit tutularak SKP uygulanmış Al5083 alaşımı ve SKP ile üretilen Al5083/Al₂O₃, Al5083/%99Al₂O₃+%1h-BN, Al5083/%97Al₂O₃+%3h-BN, Al5083/%95Al₂O₃+%5h-BN, Al5083/%92Al₂O₃+%8h-BN kompozit tabakaların mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Bu nedenle sonraki yapılacak çalışmalarda, farklı SKP

parametreleri ile proses edilip farklı karışım oranlarında katkı maddesi kullanılan Al5083 alaşımının mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi ve elde edilen sonuçlar üzerinde optimum proses parametrelerinin ve katkı oranlarının belirlenmesi önerilmektedir. Ayrıca Al5083 alaşımının denizcilikte yaygın olarak kullanılmasından kaynaklı olarak bu elde edilen yeni kompozit yüzeylerde korozyon etkinin de incelenmesi önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- Al-Rawajfeh, A.E. and Qawabah, S.M.A. Al (2009) "Investigation of Copper Addition on the Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Commercially Pure Aluminum". *Emirates Journal for Engineering Research*, 14(1) 47–52.
- Alidokht, S.A., Abdollah-zadeh, A., Soleymani, S. and Assadi, H. (2011) "Microstructure and tribological performance of an aluminium alloy based hybrid composite produced by friction stir processing". *Materials & Design*, 32(5) 2727–2733.
- Ambat, R., Davenport, A.J., Scamans, G.M. and Afseth, A. (2006) "Effect of iron-containing intermetallic particles on the corrosion behaviour of aluminium". *Corrosion Science*, 48(11) 3455–3471.
- Ansari, S.A. and Husain, Q. (2011) "Immobilization of Kluyveromyces lactis β galactosidase on concanavalin A layered aluminium oxide nanoparticles—Its future aspects in biosensor applications". *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 70(3–4) 119–126.
- Arora, H.S., Singh, H. and Dhindaw, B.K. (2012) "Composite fabrication using friction stir processing - A review". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(9–12) 1043–1055.
- Asadi, P., Givi, M.K.B., Rastgoo, A., Akbari, M., Zakeri, V. and Rasouli, S. (2012) "Predicting the grain size and hardness of AZ91/SiC nanocomposite by artificial neural networks". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(9–12) 1095–1107.
- Azizieh, M., Kokabi, A.H. and Abachi, P. (2011) "Effect of rotational speed and probe profile on microstructure and hardness of AZ31/Al₂O₃ nanocomposites fabricated by friction stir processing". *Materials & Design*, 32(4) 2034–2041.
- Basavarajappa, S., Chandramohan, G., Mahadevan, A., Thangavelu, M., Subramanian, R. and Gopalakrishnan, P. (2007) "Influence of sliding speed on the dry sliding wear behaviour and the subsurface deformation on hybrid metal matrix

composite". **Wear**, 262(7–8) 1007–1012.

Bauri, R., Janaki Ram, G.D., Yadav, D. and Shyam Kumar, C.N. (2015) "Effect of Process Parameters and Tool Geometry on Fabrication of Ni Particles Reinforced 5083 Al Composite by Friction Stir Processing". **Materials Today: Proceedings**, 2(4–5) 3203–3211.

Behnagh, R.A., Shen, N., Abdollahi, M. and Ding, H. (2016) "Ultrafine-Grained Surface Layer Formation of Aluminum Alloy 5083 by Friction Stir Processing". **Procedia CIRP**, 45 243–246.

Bhushan, B. (2000) *Modern tribology handbook, two volume set*.

Buytoz, S. (2004) *AISI4340 Çeliğin Nitritasyon ve Gta Kaynak Yöntemi ile Yüzey Modifikasyonu İşlemleri Sonrası Mekaniksel Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Campbell, F.C. (2006) *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. F.C. Campbell (ed.). Oxford: Elsevier Ltd.

Can, A.Ç. (2006) Malzeme Bilgisi, **Birsen Yayınevi Ltd. Şti.**, İstanbul, 317.

Carroll, M.C., Gouma, P.I., Mills, M.J., Daehn, G.S. and Dunbar, B.R. (2000) "Effects of Zn additions on the grain boundary precipitation and corrosion of Al-5083". **Scripta Materialia**, 42(4) 335–340.

Chen, Y., Ding, H., Li, J., Cai, Z., Zhao, J. and Yang, W. (2016) "Influence of multi-pass friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of Al-5083 alloy". **Materials Science and Engineering: A**, 650 281–289.

Chkhartishvili, L., Tabatadze, G., Nackebia, D., Bzhalava, T., Kalandadze, I. (2016) "Hexagonal Boron Nitride as Solid Lubricant Additive". **International Atomic Energy Agency (IAEA)**, 51(44) 91–98.

Court, S.A., Gatenby, K.M. and Lloyd, D.J. (2001) "Factors affecting the strength and formability of alloys based on Al-3 wt.% Mg". **Materials Science and Engineering A**, 319–321 443–447.

- Cui, G.R., Ma, Z.Y. and Li, S.X. (2009) "The origin of non-uniform microstructure and its effects on the mechanical properties of a friction stir processed Al–Mg alloy". *Acta Materialia*, 57(19) 5718–5729.
- Darras, B.M., Khraisheh, M.K., Abu-Farha, F.K. and Omar, M.A. (2007) "Friction stir processing of commercial AZ31 magnesium alloy". *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1–3) 77–81.
- Davis, J.R. (1993) *ASM Handbook Aluminum and Aluminum Alloys*.
- Davis, J.R. (1999) *Corrosion of aluminum and aluminum alloys*.
- Deuis, R.L., Subramanian, C. and Yellup, J.M. (1997) "Dry sliding wear of aluminium composites - A review". *Composites Science and Technology* 57 (4) p.415–435.
- Dobatkin, S. V., Bastarache, E.N., Sakai, G., Fujita, T., Horita, Z. and Langdon, T.G. (2005) "Grain refinement and superplastic flow in an aluminum alloy processed by high-pressure torsion". *Materials Science and Engineering: A*, 408(1–2) 141–146.
- Dolatkhah, A., Golbabaei, P., Besharati Givi, M.K. and Molaiekiya, F. (2012) "Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing". *Materials & Design*, 37 458–464.
- Du, Z.L., Tan, M.J., Guo, J.F. and Wei, J. (2016) "Dispersion of Al₂O₃ reinforcements in Al composites via friction stir processing". *Materials Science Forum*, 861 236–240.
- Du, Z.M. and Li, J.P. (2004) "Study of the preparation of Al₂O₃/SiC p/Al composites and their wear-resisting properties". *Journal of Materials Processing Technology*, 151(1-3 SPEC. ISS.) 298–301.
- Evirgen, A. and Öveçoğlu, M.L. (2010) "Characterization investigations of a mechanically alloyed and sintered Al–2 wt%Cu alloy reinforced with WC particles". *Journal of Alloys and Compounds*, 496(1–2) 212–217.
- Huang, C., Chen, C., Ye, X., Ye, W., Hu, J., Xu, C. and Qiu, X. (2013) "Stable colloidal boron nitride nanosheet dispersion and its potential application in catalysis".

Journal of Materials Chemistry A, 1(39) 12192–12197.

Johannes, L.B., Charit, I., Mishra, R.S. and Verma, R. (2007) "Enhanced superplasticity through friction stir processing in continuous cast AA5083 aluminum". *Materials Science and Engineering: A*, 464(1–2) 351–357.

Kang, S.B., Kim, J.W. and Kim, H.W. (2006) "Effect of Deformation Route and Sc and Zr Addition on Ultra-Fine Grain Formation and Superplasticity in Al-Mg Alloys". *Materials Science Forum*, 519–521 847–852.

Kaufman, J.G. (2000) *Introduction to Aluminium Alloys and Tempers*.

Khan, M., Rehman, A., Aziz, T., Shahzad, M., Naveed, K. and Subhani, T. (2018) "Effect of inter-cavity spacing in friction stir processed Al 5083 composites containing carbon nanotubes and boron carbide particles". *Journal of Materials Processing Technology*, 253 72–85.

Khodabakhshi, F., Simchi, A., Kokabi, A.H., Nosko, M., Simančík, F. and Švec, P. (2014) "Microstructure and texture development during friction stir processing of Al–Mg alloy sheets with TiO₂ nanoparticles". *Materials Science and Engineering: A*, 605 108–118.

Kishan, V., Devaraju, A. and Prasanna Lahshmi, K. (2018) "Tribological Properties of Nano TiB₂ particle Reinforced 6061-T6 Aluminum Alloy Surface Composites via Friction stir processing". *Materials Today*, 5.

Kumar, G.M. and Kumar, R.P. (2019) "Characterization of pine needle ash particulates reinforced surface composite fabricated by friction stir process". *Materials Research Express*, 6(4).

Lee, I.S., Kao, P.W. and Ho, N.J. (2008) "Microstructure and mechanical properties of Al–Fe in situ nanocomposite produced by friction stir processing". *Intermetallics*, 16(9) 1104–1108.

Liu, Z.Y., Xiao, B.L., Wang, W.G. and Ma, Z.Y. (2012) "Singly dispersed carbon nanotube/aluminum composites fabricated by powder metallurgy combined with friction stir processing". *Carbon*, 50(5) 1843–1852.

- Ma, Z.Y. (2008) "Friction stir processing technology: A review". ***Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science***, 39 A(3) 642–658.
- Mahmoud, E.R.I., Ikeuchi, K. and Takahashi, M. (2008) "Fabrication of SiC particle reinforced composite on aluminium surface by friction stir processing". ***Science and Technology of Welding and Joining***, 13(7) 607–618.
- Mahmoud, E.R.I., Takahashi, M., Shibayanagi, T. and Ikeuchi, K. (2010) "Wear characteristics of surface-hybrid-MMCs layer fabricated on aluminum plate by friction stir processing". ***Wear***, 268(9–10) 1111–1121.
- Marcelo, T., Carvalho, M.H., Lopes, E.B., Bartout, J.-D. and Bienvenu, Y. (2002) "Fabrication of Al/Al₃Ni matrix composites with a low coefficient of thermal expansion". ***Key Engineering Materials***, 230–232 189–192.
- Mathers, G. (2002) *The Welding of Aluminium and Its Alloys*. 1st ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Mazaheri, Y., Karimzadeh, F. and Enayati, M.H. (2011) "A novel technique for development of A356/Al₂O₃ surface nanocomposite by friction stir processing". ***Journal of Materials Processing Technology***, 211(10) 1614–1619.
- Mazaheri, Y., Karimzadeh, F. and Enayati, M.H. (2014) "Tribological behavior of A356/Al₂O₃ surface nanocomposite prepared by friction stir processing". ***Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science***, 45(4) 2250–2259.
- MERT, Ş. and MERT, S. (2013) "Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yönteminin İncelenmesi". ***İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi***, 2(1) 26–35.
- Mirjavadi, S.S., Alipour, M., Hamouda, A.M.S., Matin, A., Kord, S., Afshari, B.M. and Koppad, P.G. (2017) "Effect of multi-pass friction stir processing on the microstructure, mechanical and wear properties of AA5083/ZrO₂ nanocomposites". ***Journal of Alloys and Compounds***, 726 1262–1273.
- Mishra, R., Sato, M.W.M.Y., Verma, Y.H.R. and WILEY (2011) *FRICITION STIR*

- Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. (2005) "Friction stir welding and processing". ***Materials Science and Engineering: R: Reports***, 50(1) 1–78.
- Mishra, R.S., Ma, Z.Y. and Charit, I. (2003) "Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite". ***Materials Science and Engineering: A***, 341(1–2) 307–310.
- Mishra, R.S. and Mahoney, M.W. (2001) "Friction stir processing: A new grain refinement technique to achieve high strain rate superplasticity in commercial alloys". ***Materials Science Forum***, 357–359 507–514.
- Mishra, R.S., Mahoney, M.W., McFadden, S.X., Mara, N.A. and Mukherjee, A.K. (1999) "High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy". ***Scripta Materialia***, 42(2) 163–168.
- Mistry, J.M. and Gohil, P.P. (2017) "An overview of diversified reinforcement on aluminum metal matrix composites: Tribological aspects". ***Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology***, 231(3) 399–421.
- Morsi, K. (2001) "Review: reaction synthesis processing of Ni–Al intermetallic materials". ***Materials Science and Engineering: A***, 299(1–2) 1–15.
- Mostafapour Asl, A. and Khandani, S.T. (2013) "Role of hybrid ratio in microstructural, mechanical and sliding wear properties of the Al5083/Graphite p/Al 2O 3p a surface hybrid nanocomposite fabricated via friction stir processing method". ***Materials Science and Engineering A***, 559 549–557.
- Narimani, M., Lotfi, B. and Sadeghian, Z. (2016) "Evaluation of the microstructure and wear behaviour of AA6063-B4C/TiB₂ mono and hybrid composite layers produced by friction stir processing". ***Surface and Coatings Technology***, 285 1–10.
- Ocenasek, V. and Slamova, M. (2001) "Resistance to recrystallization due to Sc and Zr addition to Al-Mg alloys". ***Materials Characterization***, 47(2) 157–162.

- Palanivel, R., Dinaharan, I., Laubscher, R.F. and Davim, J.P. (2016) "Influence of boron nitride nanoparticles on microstructure and wear behavior of AA6082/TiB₂ hybrid aluminum composites synthesized by friction stir processing". *Materials & Design*, 106 195–204.
- Parumandla, N. and Adepu, K. (2018) "Effect of Al₂O₃ and SiC nano reinforcements on microstructure, mechanical and wear properties of surface nanocomposites fabricated by friction stir processing". *Medziagotyra*, 24(3) 338–344.
- Prasada Rao, A.K., Das, K., Murty, B.S. and Chakraborty, M. (2004) "Effect of grain refinement on wear properties of Al and Al–7Si alloy". *Wear*, 257(1–2) 148–153.
- Qian, J., Li, J., Xiong, J., Zhang, F. and Lin, X. (2012) "In situ synthesizing Al₃Ni for fabrication of intermetallic-reinforced aluminum alloy composites by friction stir processing". *Materials Science and Engineering: A*, 550 279–285.
- Raafat, M., Mahmoud, T.S., Zakaria, H.M. and Khalifa, T.A. (2011) "Microstructural, mechanical and wear behavior of A390/graphite and A390/Al₂O₃ surface composites fabricated using FSP". *Materials Science and Engineering A*, 528(18) 5741–5746.
- Rejil, C.M., Dinaharan, I., Vijay, S.J. and Murugan, N. (2012) "Microstructure and sliding wear behavior of AA6360/(TiC+B 4C) hybrid surface composite layer synthesized by friction stir processing on aluminum substrate". *Materials Science and Engineering A*, 552 336–344.
- Santella, M.L., Engstrom, T., Storjohann, D. and Pan, T.Y. (2005) "Effects of friction stir processing on mechanical properties of the cast aluminum alloys A319 and A356". *Scripta Materialia*, 53(2) 201–206.
- Senhadji, S., Belarifi, F. and Robbe-Valloire, F. (2016) "Experimental investigation of friction coefficient and wear rate of brass and bronze under lubrication conditions". *Tribology in Industry*, 38(1) 102–107.
- Shafiei-Zarghani, A., Kashani-Bozorg, S.F. and Hanzaki, A.Z. (2011) "Wear assessment of Al/Al₂O₃ nano-composite surface layer produced using friction stir processing". *Wear*, 270(5–6) 403–412.

- Shafiei-Zarghani, A., Kashani-Bozorg, S.F. and Zarei-Hanzaki, A. (2009) "Microstructures and mechanical properties of Al/Al₂O₃ surface nano-composite layer produced by friction stir processing". *Materials Science and Engineering: A*, 500(1–2) 84–91.
- Shyam Kumar, C.N., Bauri, R. and Yadav, D. (2016) "Wear properties of 5083 Al-W surface composite fabricated by friction stir processing". *Tribology International*, 101 284–290.
- Sudhakar, I., Madhu, V., Madhusudhan Reddy, G. and Srinivasa Rao, K. (2015) "Enhancement of wear and ballistic resistance of armour grade AA7075 aluminium alloy using friction stir processing". *Defence Technology*, 11(1) 10–17.
- Savaşkan, T. (2018) Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi 9. Baskı, *Papatya Bilim*, İstanbul, 294.
- Taban, E. (2004) "5XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının TIG, MIG ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 7-10.
- Thangarasu, A., Murugan, N., Dinaharan, I. and Vijay, S.J. (2015) "Synthesis and characterization of titanium carbide particulate reinforced AA6082 aluminium alloy composites via friction stir processing". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(2) 324–334.
- Thapliyal, S. and Dwivedi, D.K. (2016) "Study of the effect of friction stir processing of the sliding wear behavior of cast NiAl bronze: A statistical analysis". *Tribology International*, 97 124–135.
- Threadgill, P. (1997) "Friction stir welds in aluminium alloys--preliminary microstructural assessment". *TWI Bulletin*, 38(2) 30–33.
- Totten, G.E. , McKenzie, D.S. (2003) *Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes*.
- Vargel, C. (2004) *Corrosion of Aluminium*.

- Venkataraman, B. and Sundararajan, G. (2000) "Correlation between the characteristics of the mechanically mixed layer and wear behaviour of aluminium, Al-7075 alloy and Al-MMCs". *Wear*, 245(1–2) 22–38.
- Yadav, D. and Bauri, R. (2010) "Nickel particle embedded aluminium matrix composite with high ductility". *Materials Letters*, 64(6) 664–667.
- Yadav, D. and Bauri, R. (2011) "Processing, microstructure and mechanical properties of nickel particles embedded aluminium matrix composite". *Materials Science and Engineering: A*, 528(3) 1326–1333.
- Yasavol, N. and Ramalho, A. (2015) "Wear properties of friction stir processed AISI D2 tool steel". *Tribology International*, 91 177–183.
- Yuvaraj, N., Aravindan, S. and Vipin (2015) "Fabrication of Al5083/B4C surface composite by friction stir processing and its tribological characterization". *Journal of Materials Research and Technology*, 4(4) 398–410.
- Zahmatkesh, B. and Enayati, M.H. (2010) "A novel approach for development of surface nanocomposite by friction stir processing". *Materials Science and Engineering: A*, 527(24–25) 6734–6740.

EKLER

Ek-1. Tez Çalışması Süresinde Yapılan Akademik Çalışmalar

Sert T.S., Baran Acımert Ö., Keles Dayauc A., Sert Y., Kucukomeroglu T.," The effect on mechanical and tribological properties of Al-5083 alloy of Al₂O₃ layer and Al₂O₃/h-BN composite layer produced by Friction Stir Process ". **6th International Academic Studies Conference**, Online, 26-28 Temmuz 2021.

